

Г. М. Голин, С. Р. Филонович

КЛАССИКИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАУКИ

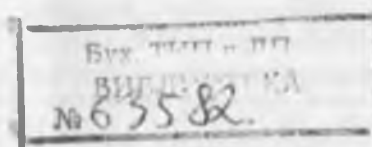
53
р-60

Г. М. Голин, С. Р. Филонович

КЛАССИКИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАУКИ

(с древнейших
времен
до начала XX в.)

68559-28489



Москва «Высшая школа» 1989

ББК 22.3Г

Г60

УДК 53

Рецензенты: сектор истории физики и механики Института истории естествознания и техники АН СССР (зам. зав. сектором Г. М. Идлис); д-р физ.-мат. наук, проф. Б. И. Спасский (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова)

Голин Г. М., Филонович С. Р.
Г60 Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил.
ISBN 5-06-000058-3

В книгу включены работы (и отрывки из них) классиков физической науки, сыгравшие выдающуюся роль в истории физики. Представлены как теоретические, так и экспериментальные исследования, охватывающие все разделы классической физики. Оригинальные тексты сопровождаются краткими вступительными статьями и комментариями, которые способствуют правильному пониманию самих текстов и их исторической оценке.

Г 1604010000—497 105—89
001(01)—89

ББК 22.3Г
53(09)

ISBN 5-06-000058-3

© Г. М. Голин, С. Р. Филонович,
1989

Содержание

стр.

Предисловие	5
Аристотель. О «физических началах» и движении	7
Лукреций. Об атомах	14
Архимед. О статике и гидростатике	21
Леонардо да Винчи. О науке	31
Н. Коперник. О гелиоцентрической системе мира.	39
Г. Галилей. О движении	50
Р. Декарт. О радуге	65
Э. Торричелли. Об атмосферном давлении	73
Б. Паскаль. О равновесии жидкостей	78
О. Герике. Опыты с пустотой	85
Р. Бойль. О законе сжатия и расширения газов	95
Ф. Гримальди. О дифракции света	106
Р. Гук. О законе упругости	112
О. Ремер. О скорости света	117
Х. Гюйгенс. О проблемах механики О теории света	121
И. Ньютон. О началах механики Об оптике	142
Д. Бернулли. О течении жидкостей	170
Л. Эйлер. Об изложении механики	180
М. В. Ломоносов. О природе тепла	188
Б. Франклин. О статическом электричестве	197
П. Бугер, И. Ламберт. О фотометрии	206
Дж. Блэк. Об особенностях тепловых явлений	220
Ж. Л. Лагранж. Об аналитической механике	231
Ш. Кулон. О фундаментальном законе электростатики	242
Г. Кавендиш. Определение плотности Земли	253
В. Гершель. Об инфракрасном излучении	269
А. Вольт. Об электрическом токе	277
Г. Юнг. Об интерференции света и ее проявлениях	285
О. Френель. О волновой оптике	295
Г.-Х. Эрстед. О связи между электричеством и магнетизмом	307
А.-М. Ампер. Об электродинамике	313
С. Карно. Об эффективности тепловых машин	325
Г. Ом. О законе постоянного тока	339
М. Фарадей. Об электромагнетизме	348
Э. Х. Ленц. О направлении индукционного тока	367

Р. Майер. О сохранении и превращении энергии 374

Дж. Джоуль. Об определении механического эквивалента тепла 382

Г. Гельмгольц. О законе сохранения энергии 392

У. Томсон (Кельвин). Об абсолютной шкале температур и втором начале термодинамики 405

Л. Фуко. О скорости света в различных средах 416

И. Физо. О распространении света в движущихся телах 428

Р. Клаузиус. О втором начале термодинамики и энтропии 440

Р. Бунзен, Г. Кирхгоф. О спектральном анализе.
О законе теплового излучения 451

Дж. К. Максвелл. О кинетической теории газов.
Об электромагнитном поле 469

Н. А. Умов. О движении энергии 492

Л. Больцман. О статистической интерпретации второго начала термодинамики 504

А. Майкельсон, Э. Морли. Об «эфирном ветре» 512

Г. Герц. Об электромагнитных волнах 524

А. Г. Столетов. О фотоэффекте 538

П. Н. Лебедев. О давлении света 548

Дж. В. Гиббс. О принципах статистической механики 562

Связь старинных мер с современными единицами физических величин 574

Именной указатель 575

Литература 576

Предисловие

Ничто не может заменить непосредственного обращения к первоисточникам, возможно более частого общения с творчеством создателей науки.

П. Ланжевен

Знания по истории физики являются неотъемлемой частью общего физического образования. Эти знания можно получить при изучении общей и теоретической физики, пользуясь историко-научной литературой или прослушав специальный учебный курс. В обоих случаях важную роль может и должно сыграть ознакомление студентов с оригинальными работами классиков физической науки. Только читая первоисточники можно почувствовать «дух» развивающегося естествознания, ощутить глубину и оригинальность мышления ученых прошлого.

Обращение к первоисточникам при изучении физики затруднено необходимостью работать с большим числом отдельных изданий, многие из которых не так легко разыскать. Для преодоления этой трудности и было подготовлено данное пособие. В нем собраны отрывки из работ ученых прошлого (с IV в. до н. э. до начала XX в.), сыгравших значительную роль в формировании классической физики. Работы, имевшие принципиальное значение для формирования современной физики (с конца XIX в. до 1940 г.), будут включены во вторую часть настоящего издания.

В рамках ограниченной по объему книги невозможно, конечно, отразить все существенные для истории физики произведения. При выборе отрывков для данного пособия авторы стремились к тому, чтобы в равной мере были представлены как теоретические, так и экспериментальные работы, относящиеся ко всем основным разделам физической науки. В издание включены отрывки из сочинений ученых, имена которых упоминаются практически во всех курсах общей физики. При этом авторы старались избегать излишней фрагментарности материала и подбирали полные работы (их немного) и целостные отрывки, дающие представление о стиле данного ученого и форме изложения физического материала, характерной для соответствующей эпохи. Эти работы и отрывки касаются конкретных физических эффектов и теорий. Предпочтение отдавалось первичным публикациям, а не обобщающим монографиям, поскольку оригинальные работы наиболее отчетливо демонстрируют ход мысли ученого.

Несколько слов о структуре книги. Работы классиков представлены в хронологической последовательности, без разбиения по разделам физики. По мнению авторов, такое расположение материала облегчает формирование общей картины развития физической науки. Каждой работе предшествует вводная статья, в которой дается краткая биография ученого и рассказывается об ис-

тории создания данной работы. При необходимости к оригинальному тексту даются комментарии, которые не являются исчерпывающими: они должны лишь облегчить современному читателю понимание трудных мест произведений ученых прошлого. В комментарии включены также библиографические справки по каждой из представленных в пособии работ.

При подготовке издания были использованы уже публиковавшиеся переводы сочинений классиков и комментарии к ним, однако значительная часть фрагментов (примерно треть) появляется на русском языке впервые. Авторы всех переводов указаны в комментариях.

Г. М. Голиным написаны вводные статьи и комментарии к работам Аристотеля, Архимеда, Лукреция, Н. Коперника, Г. Галилея, Х. Гюйгенса, И. Ньютона, М. В. Ломоносова, Б. Франклина, А. Вольты, О. Френеля, Г.-Х. Эрстеда, А.-М. Ампера, М. Фарадея, Э. Х. Ленца, Р. Майера, Дж. К. Максвелла, А. Г. Столетова, П. Н. Лебедева. Остальные вводные статьи и комментарии подготовлены С. Р. Филюновичем.

Авторы считают своим долгом выразить признательность специалистам, оказавшим помощь в работе над пособием: Б. В. Булюбашу, Н. В. Вдовиченко, Вл. П. Визгину, А. Т. Григорьяну, В. С. Кирсанову, Е. И. Погребысской. Особо необходимо отметить советы и замечания М. А. Ельшевича и Б. И. Спаского.

Авторы с благодарностью примут все замечания по содержанию и структуре книги.



Аристотель

384—322 до н. э.

О «физических началах» и движении

Физическая наука своими корнями уходит далеко в глубь веков, а первые учения, в которых более или менее последовательно рассматривались проблемы, относящиеся теперь к физике, были созданы в Древней Греции. Возникшая в недрах рабовладельческого строя греческая демократия способствовала познанию окружающего мира, свободному в большой степени от мистики и религии. Античные исследователи стремились дать цельную картину мира, объясняя все явления природы на основе небольшого числа «начал». Отсутствие строго установленных фактов древние ученые компенсировали догадками, вымыслами, логическими спекуляциями. Эти первые шаги научного мышления были, как отмечал Ф. Энгельс, необходимым этапом в развитии естествознания. Это направление изучения природы получило впоследствии название натуральной философии. Венцом греческой натуральной философии является учение Аристотеля, произведения которого можно назвать энциклопедией древней науки.

Аристотель родился в Стагире на севере Греции во второй половине 384 г. до н. э. в семье придворного врача македонского царя.

Восемнадцатилетним юношей он отправился в Афины, чтобы стать учеником Академии Платона. Почти двадцать лет Аристотель совершенствовал свое образование в Академии. По свидетельству историков, Платон называл его «умом» своей школы.

В 343 г. до н. э. он принял почетное приглашение македонского царя Филиппа стать воспитателем его четырнадцатилетнего сына, будущего полководца и императора Александра Македонского. Эти занятия продолжались три года до вступления Александра на престол.

Находясь под покровительством своего бывшего ученика, Аристотель в 335 г. до н. э. создал в Афинах школу — Ликей, в которой перед многочисленной аудиторией излагал свое учение, полемизируя с представителями других философских школ. В течение тринадцати лет Аристотель руководил своей школой, ученики и последователи которой стали называться перипатети-

тиками (перипатос — греч. блуждание; название связано, вероятно, с прогулками по аллеям Ликее, во время которых философ беседовал с учениками). Умер Аристотель в 322 г. до н. э.

Творческое наследие философа колоссально по объему. До нас дошла лишь часть произведений Аристотеля, но и они характеризуются необычайно широким диапазоном затронутых в них научных проблем. Физике и близким ей естественным дисциплинам Аристотель посвятил четыре трактата — «Физика», «О небе», «О возникновении и уничтожении» и «Метеорологика», — составляющих единое целое. Они представляют собой конспекты лекций, которые читал Аристотель в Ликее. В этих работах ученый стремился создать законченную физическую картину мира.

Согласно Аристотелю, четыре основных и противоположных качества (холод и тепло, сухость и влажность) попарно образуют элементы, из которых состоят все материальные вещи: земля, огонь, воздух и вода. Всем вещам придаются «абсолютные» свойства тяжести и легкости. Понятия пространства, времени и материи у Аристотеля взаимосвязаны и не существуют одно без другого. Под движением он понимал изменение вообще, превращение возможного (потенциального) в действительное, называя это превращение особым термином «энтелехия». Механические перемещения считались одним из видов движения; их Аристотель делил на два типа: «естественные» и «насильственные».

«Естественное» движение небесных тел — это круговое движение вокруг неподвижной и шарообразной Земли, «естественные» движения на самой Земле — это отвесные движения вверх и вниз абсолютно легких и абсолютно тяжелых тел.

Все остальные — «насильственные» — движения происходят под действием других тел — «двигателей».

Аристотель резко разграничивает «небесное» и «земное». Его трактовка «материи», «места», «движения» такова, что не допускает существования пустоты. Материя непрерывно распределена в пространстве. С помощью умозаключений Аристотель приходит к выводу, что движение в пустоте вообще невозможно. Он показывает, что в пустоте все тела падали бы на землю с одинаковыми скоростями, но так как пустота невозможна, то он приходит к ложному выводу о пропорциональности скорости падения весу тела («закон» Аристотеля). «Насильственные» движения брошенных тел он объясняет «боязнью пустоты». Таковы представления Аристотеля о механике движения, изложенные в сочинении «Физика», давшем название целой области естествознания. Суждения о проблемах механики, о природе теплоты, об атмосферных, акустических и оптических явлениях встречаются и в других сочинениях Аристотеля. Эти суждения часто очень далеки от представлений современной физики. Главная заслуга Аристотеля — отчетливая постановка многих важных проблем механики и физики в целом, разрешение которых

в конечном счете привело к возникновению науки Нового времени.

Здесь приводятся два небольших отрывка из трактата «Физика». В первом из них рассматривается отличие «физика» от «математика», во втором излагается концепция движения, на основе которой ученый «доказывает» невозможность существования пустоты.

Физика

КНИГА 2

Глава 2

После того как нами определено, в скольких значениях употребляется [слово] «природа», следует рассмотреть, чем отличается математик от физика¹. Природные тела имеют и поверхности, и объемы, и длины, и точки, изучением которых занимается математик. Далее, астрономия — особая [наука] или часть физики? Ведь если дело физика знать, что такое Солнце и Луна, а о том, что свойственно им самим по себе, знать не надо, то это нелепо помимо прочего и потому, что [философы], рассуждающие о природе, говорят также о фигуре Луны и Солнца и о том, шаровидны ли Земля и космос или нет.

Этим всем занимается и математик, но не поскольку каждая [из фигур] есть граница природного тела, и их свойства он рассматривает не как собственные [именно] этим телам. Поэтому он и отделяет их [от природных тел], ибо мысленно они отделимы от движения [этих тел] и это [отделение] ничего не меняет и не порождает ошибок. Сами того не замечая, то же делают и [философы], рассуждающие об идеях: они отделяют [от тел] физические свойства, которые в меньшей степени поддаются отделению, чем математические [отношения]². Сказанное станет ясным, если попытаться определить и то и другое, т. е. и сами предметы, и присущие им свойства. А именно: нечетное и четное, прямое и кривое, далее, число, линия и фигура будут [определены] и без движения, мясо, кость и человек — ни в коем случае; это подобно тому, как нос называется вздернутым, а не криволинейным. На то же указывают и наиболее физические из математических наук, как-то: оптика, учение о гармонии и астрономия — они в некотором отношении обратны геометрии. Ибо геометрия рассматривает физическую линию, но не поскольку она физическая, а оптика же — математическую линию, но не как математическую, а как физическую.

Так как природа двояка: она есть и форма и материя, то [вопрос] следует рассматривать так же, как если бы мы стали изучать курносость, что она такое, т. е. ни без материи, ни со стороны [одной лишь] материи. Однако двоякого рода затруднение может возникнуть и относительно следующего: раз существуют две природы, то с которой из двух должен иметь дело физик, или, может быть, с тем, что составлено из них обеих? Но

если с тем, что составлено из них обеих, то и с каждой из них. Должна ли познавать ту и другую одна и та же [наука] или разные? Кто обратит внимание на старых [философов], тому может показаться, что дело физика — материя (ведь Эмпедокл и Демокрит лишь в малой степени коснулись формы и сути бытия). Но если искусство подражает природе, то к одной и той же науке относится познание формы и до известного предела материи (так, например, врачу надо знать и здоровье, и желчь, и слизь, с которыми связано здоровье, так же как строителю и вид дома и материал — кирпичи и дерево; то же относится и к другим [искусствам]); следовательно, дело физика — познавать и ту и другую природу (...).

Не существует пустоты как чего-то отдельного. Ведь если каждому из простых тел по природе присуще некоторое стремление, например огню вверх, земле вниз и к центру, то очевидно, что не пустота будет причиной такого стремления. Причиной чего же будет пустота?

Она кажется причиной движения по отношению к месту³, но она не такова. Далее, если имеется что-нибудь вроде места, лишнего тела, раз существует пустота, то куда будет двигаться помещенное в него тело? Ведь, конечно, не во все стороны.

То же рассуждение относится и к признающим место, в которое перемещается тело, как нечто отдельно существующее; каким образом помещенное в него тело будет двигаться или оставаться в покое? И для верха и низа, как и для пустоты, естественно, будет иметь силу то же рассуждение, так как признающие пустоту считают ее местом, а каким образом будет что-нибудь находиться внутри места или пустоты? Этого не получится, когда какое-либо целое тело будет помещено в отдельное и пребывающее [равным самому себе] место, ибо часть, если она не положена отдельно, будет находиться не в месте, а в целом. Далее, если не существует отдельного места, не будет и пустоты.

При [более тщательном] рассмотрении для признающих пустоту как нечто необходимое, поскольку существует движение, получается скорее обратное: ни один [предмет] не может двигаться, если имеется пустота. Ведь подобно тому как, по утверждению некоторых, Земля покоится вследствие одинаковости [всех направлений]⁴, так необходимо покоиться и в пустоте, ибо нет оснований двигаться сюда больше, сюда меньше: поскольку это пустота, в ней нет различий. Прежде всего потому, что всякое движение бывает или насильственным, или [происходящим] по природе. Необходимо, если только существует насильственное движение, существовать и природному, так как насильственное [происходит] вопреки природе, а противоприродное [движение] вторично по отношению к [движению, происходящему] по при-

роде. Таким образом, если у физических тел нет движения согласно с природой, то не будет никакого другого движения. Но каким же образом может быть движение по природе, если нет никакого различия в пустоте и в бесконечности? Поскольку имеется бесконечность, не будет ни верха, ни низа, ни центра; поскольку пустота — не будет различия между верхом и низом: ведь как «ничто» не включает в себе никаких различий, так и несуществующее. Пустота представляется чем-то несуществующим и лишенностью, а перемещение по природе различно, следовательно, будут и различия по природе. Итак, или ни один предмет никуда не перемещается по природе, или, если это происходит, нет пустоты.

Бросаемые тела движутся, не касаясь тела, толкнувшего их, или вследствие обратного кругового движения, как говорят некоторые⁵, или потому, что приведенный в движение воздух сообщает движение более быстрое по сравнению с перемещением [тела] в его собственное место; в пустоте же ничего подобного не происходит и двигаться можно только путем перенесения. Никто не сможет сказать, почему [тело], приведенное в движение, где-нибудь остановится, ибо почему оно скорее остановится здесь, а не там? Следовательно, ему необходимо или покоиться, или двигаться до бесконечности, если только не помешает что-нибудь более сильное. Кажется, что тело перемещается в пустоте, потому что она уступает; однако в пустоте подобное [имеет место] одинаково во всех направлениях, так что [тело] должно двигаться во все стороны.

Наше утверждение ясно из следующего. Мы видим, что одна и та же тяжесть и тело перемещаются быстрее по двум причинам: или из-за различия среды, через которую оно проходит (например, через воду, или землю, или воздух), или, если все прочее остается тем же, из-за различия [самого] перемещающегося [тела] вследствие избытка тяжести или легкости. Среда, через которую происходит перемещение, служит причиной, [уменьшающей скорость тела], потому что она препятствует [движению] — больше всего когда движется навстречу, а затем, [хотя в меньшей степени], когда покоится, причем сильнее [препятствует] то, что трудно разделимо, а таким будет более плотное. Предположим, что тело А будет проходить через среду В в течение времени Г, а через более тонкую среду Δ — в течение [времени] Е; если расстояния, [проходимые телом] в средах В и Δ, равны, [то Г и Е] пропорциональны [сопротивлению] препятствующего тела. Пусть, например, В — вода, а Δ — воздух; насколько воздух тоньше и бестелеснее воды, настолько скорее А будет передвигаться через Δ, чем через В. Примем, что скорость находится к скорости в том же отношении, в каком воздух отличается от воды. Следовательно, если он в два раза тоньше, А пройдет В за время в два раза больше, чем Δ, и время Г будет в два раза больше Е. И всегда, чем среда, через которую [перемещается тело], бестелеснее, чем меньше оказывает препят-

ствий и чем легче делима, тем быстрее будет происходить перемещение. У пустоты же нет никакого отношения, в каком ее превосходило бы тело, так же как и ничто⁶ не находится ни в каком отношении к числу. Ибо если четыре превышает три на единицу, два — на большее число, а единицу — еще больше, чем на два, то нет отношения, в каком оно превышает ничто. Необходимо ведь, чтобы превышающее число распадалось на излишек и на превышаемое число, так что в данном случае будет превышающий излишек четыре и больше ничего. Поэтому и линия не может превышать точку, если только она не складывается из точек. Подобным же образом и пустота не состоит ни в каком отношении к наполненной среде, а следовательно, и [движение в пустоте] к движению [в среде]. Но если через тончайшую среду [тело] проходит за некоторое время такую-то длину, то [при движении] через пустоту [его скорость по отношению к скорости в среде] превзойдет всякое отношение. Пусть Z — пустота, равная по своим размерам [средам] B и Δ . Если тело A пройдет ее и будет двигаться в течение времени H , меньшего E , то таково будет и отношение пустого к наполненному. Но за такое время H тело A проходит часть Δ , а именно θ . Оно проходит ее, даже если Z будет по тонкости отличаться от воздуха в том же отношении, в каком время E будет отличаться от H . Ибо если [тело] Z во столько же раз тоньше Δ , во сколько E превышает H , то, обратно, A , если будет двигаться, проходит Z за время, равное H , если же в Z не будет никакого тела, то еще быстрее. Но тело прошло среду за время H . Следовательно, за равное время будет пройдено наполненное и пустое. Но это невозможно. Таким образом, если существует хоть какое-нибудь время, в течение которого будет пройдена любая часть пустоты, то получится указанная невозможность, а именно за равное время удастся пройти нечто наполненное и пустое, так как одно тело к другому будет относиться как время ко времени.

Подытожим главное: причина того, что получается, очевидна, а именно: всякое движение находится в некотором числовом отношении со всяким другим движением (так как оно существует во времени, а всякое время находится в отношении со временем, поскольку обе величины конечны), а пустота с наполненным ни в каком числовом отношении не находится.

Итак, все сказанное вытекает из различий среды, через которую перемещаются [тела], а вследствие преобладания [одних] перемещающихся [тел над другими] получается следующее.

Мы видим, что тела, имеющие большую силу тяжести или легкости и одинаковую фигуру, скорее проходят равное пространство в том [числовом] отношении, в каком указанные величины находятся друг к другу. То же, следовательно, должно быть и при прохождении через пустоту. Но это невозможно: по какой причине они стали бы двигаться скорее? В наполненной среде [это произойдет] по необходимости, так как большее будет ско-

ее разделять ее своей силой. Ведь разделение производится или фигурой, или силой движения, которую имеет [естественно] несущееся или брошенное тело. Следовательно, [в пустоте] все будет иметь равную скорость. Но это невозможно. (—)

Комментарий

Перевод трактата «Физика» выполнен В. П. Карповым. Отрывки печатаются по изданию: Аристотель. Сочинения в четырех томах. Т. 3. М., 1981.

- ¹ Физик (physikos) у Аристотеля — человек, занимающийся изучением природы.
- ² Намек на Платона и пифагорейцев, приписавших числам собственную реальность.
- ³ Термин, введенный Аристотелем, обозначающий границы соприкосновения с объемлющей средой, в которую помещено данное тело.
- ⁴ Впервые это соображение было высказано Анаксимандром.
- ⁵ Взаимное кривое движение — *antiperistasis* — происходит, по мнению Аристотеля, в воздухе или воде, когда движущееся тело толкает находящуюся перед ним среду и этот толчок, распространяясь как бы по кругу, в конце концов возвращается к исходному телу, но уже с обратной стороны. С помощью такого кругового движения Аристотель считал возможным объяснить полет брошенного тела, когда оно продолжает двигаться в воздухе, уже не находясь в соприкосновении с агентом, вызвавшим его движение.
- ⁶ Греческая математика эпохи Аристотеля еще не знала понятия нуля. Математическое «ничто» (*mēden*), о котором пишет Аристотель, в каком-то смысле предвосхищает это понятие.

Литература

- [1] Собрание сочинений Аристотеля: *Aristotelis opera*. Ed. Academia regia borussica. V. 1—5, Berolini, 1831—1870.
- [2] Chroust A. H. Aristotle. New light on his life and on some of his lost works. London, 1973.
- [3] Зубов В. П. Аристотель. М., 1963.

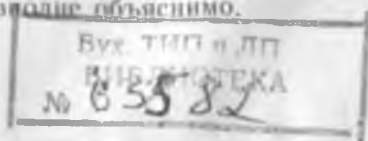
Коль осязанью оно хоть несколько будет доступно,
Тел совокупность умножит собой и к итогу причтется;
Если же будет совсем недоступно оно осязанью
И не поставит преград прохождению любого предмета,
Полостью будет оно, что мы пустотой называем.
Кроме того, все то, что само по себе существует,
Действует или само, иль подвержено действию будет,
Иль будет там, где вещам находиться и двигаться можно.
Действовать иль подвергаться воздействию тело лишь может,
Быть же вместилищем тел может только пустое пространство.
Так что самой по себе среди вещей оказаться не может,
Вне пустоты и вне тел, какой-нибудь третьей природы.
Иль ощутимой когда-либо помощью нашего чувства,
Или такой, что она разуменью была бы доступна. <...>

Дальше, тела иль вещей представляют собою начала,
Или они состоят из стечения частиц изначальных.
Эти начала вещей ничему не под силу разрушить,
Плотностью тела своей они все, наконец, побеждают.
Правда, представить себе затруднительно то, что возможно
Что-нибудь в мире найти с безусловною плотностью тела:
Даже сквозь стены домов проникают небесные молнии,
Как голоса или крик; огонь раскаляет железо,
Скалы трещат, рассыпаясь в куски от свирепого жара,
Золото крепость свою теряет, в пылу расплавляясь,
Жидким становится лед, побежденный пламенем меди,
Сквозь серебро и тепло и пронзительный холод проходят.
То и другое всегда мы чувствуем, взявши, как должно,
Чашу рукою, когда она полнится влагой росистой.
Видимо, нет ничего, таким образом, плотного в мире.
Но коль и разум, а с ним и природа вещей принуждают
Думать иначе, то здесь мы в немногих стихах истолкуем,
Что существуют такие тела, что и прочны и вечны:
Это — вещей семена и начала в учении нашем,
То, из чего получился весь мир, существующий ныне.

Прежде всего, раз уж найдено здесь основное различье
Между вещами двумя, по их двоякой природе, —
Именно телом и местом, в котором все происходит, —
То существуют они непременно вполне самобытно.
Ибо, где есть то пространство, что мы пустотой называем,
Тела там нет, а везде, где только находится тело,
Там оказаться никак не может пустого пространства.
Значит, начальные плотны тела, и нет пустоты в них.
Так как затем в производных вещах пустоту мы находим,
Плотное должно ее вещество окружать непременно;
Да и нельзя допустить на основе разумной, чтоб вещи
В теле своем пустоту, сокровенно тая, содержали,
Ежели плотность того отрицать, что ее заключает.
Далее: только одно вещества сочетание может
Быть в состоянии в себе заключать пустое пространство;

И потому вещество, состоя из плотного тела,
Может быть вечным, хотя разлагается все остальное.
Далее, если б нигде никакой пустоты не встречалось,
Плотным являлось бы все; и напротив, коль тел бы известных
Не было, чтобы заполнить места, что они занимают,
Все б оказалось тогда и пустым, и порожним пространством.
Значит, везде пустота, очевидно, сменяется телом,
Ибо ни полностью нет совершенной нигде во Вселенной,
Ни пустоты, а тела существуют известные только,
Что полнотой разграничить способны пустое пространство.
Эти тела ни от внешних толчков разлагаться не могут,
Ни, изнутри чем-нибудь пораженные, врозь распадаться,
Ни от воздействия силы иной уничтожиться вовсе,
Как я на это тебе указал уже несколько раньше.
Без пустоты ведь ничто, очевидно, разбиться не может
Или же сломленным быть, или надвое быть рассеченным,
Или же влагу вбирать, а равно и пронзительный холод,
Или палящий огонь, от чего разрушаются вещи.
Так что, чем более вещи в себе пустоты заключают,
Тем и скорей это все до конца уничтожить их может.
Если ж начальные плотны тела, если нет пустоты в них,
Как я учил, то должны они вечными быть непременно.
Если же, кроме того, не была бы материя вечной,
То совершенно в ничто обратились давно бы все вещи,
Из ничего бы тогда возрождалось и все, что мы видим.
Но, раз уж я доказал, что ничто созидаться не может
Из ничего, и все то, что родилось, в ничто обращаться,
Первоначалам должно быть присуще бессмертное тело,
Чтобы все вещи могли при кончине на них разлагаться,
И не иссяк бы запас вещества для вещей возрождения.
Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны.
Иначе ведь не могли бы они, сохраняясь веками,
От бесконечных времен и досель восстанавливать вещи.

И, наконец, не поставь никакого предела природа
Для раздробленья вещей, тела материи ныне,
Силой минувших веков раздробившись, дошли до того бы,
Что ничему уж, из них зачатому, в известное время
Было б пробыться нельзя до высшего жизни предела.
Ибо, мы видим, скорей что угодно разрушиться может,
Чем восстановленным быть; поэтому то, что доселе
Долгие дни и века бесконечных времен миновавших
Врозь разнесли, раздробив и на мелкие части расторгнув,
Вновь в остальные века никогда не могло б воссоздаться.
Но, несомненно, предел раздробленью известный положен,
Так как мы видим, что вещь возрождается каждая снова
И установлен вещам сообразно с их родом предельный
Срок, когда могут они достигнуть жизни расцвета.
Надо добавить сюда еще то, что, хотя совершенно
Плотны тела основные, однако впаде объяснимо.





Лукреций

99—55 гг. до н. э.

Об атомах

Атомистическая идея, лежащая в основе современного естествознания, зародилась в Древней Греции. Зачатки этого воззрения можно обнаружить в трудах Анаксагора и Эмпедокла. Но свое утверждение атомистическая гипотеза получила в философском учении Демокрита из фракийского города Абдеры, перенявшего, по-видимому, взгляды своего учителя и друга Левкиппа (V в. до н. э.)

Сочинения Демокрита не дошли до нашего времени, однако отдельные выдержки из его произведений, приводимые в работах сторонников и противников его учения, позволяют считать Демокрита материалистом, создавшим последовательную атомистическую концепцию.

Мир, по Демокриту, состоит из бесчисленного множества частиц (атомов) и пустоты. Атомы — плотные образования, различающиеся лишь по форме и размерам и не имеющие тех разнообразных свойств, которыми обладают тела — различные сочетания этих атомов. Внутренне присущим свойством всех атомов является падение под действием тяготения вниз в пустом пространстве. При этом более крупные атомы, двигаясь быстрее, наталкиваются на менее крупные и происходят боковые сдвиги — «вихри», приводящие к образованию тел. Так была образована бесконечная и не имеющая какого-либо центра Вселенная.

Эпикур углубил и дополнил атомистическое учение Демокрита. Он ввел в число основных характеристик атома его вес и, предвосхищая эксперименты Г. Галилея, считал в отличие от Демокрита, что в пустоте все тела независимо от веса должны падать с одинаковыми скоростями («тяжелейшие атомы никогда не могут падать на легчайшие»). Для объяснения образования Вселенной из тел и пустоты он ввел новую, не свойственную концепции Демокрита, идею о спонтанном отклонении атомов от прямолинейного падения, которое происходит, по Демокриту, из-за строгой необходимости и предопределенности. Это, пожалуй, самое существенное, что внес Эпикур в атомистическое учение Демокрита. Он обобщил идею о спонтанном отклонении в этическую концепцию о «свободе воли» более сложных объектов. С. И. Вавилов отмечал «поразительное совпадение принципиального содержания идеи Эпикура — Лукреция о спонтанном отклонении с так называемым «соотношением неопределенности» современной физики».

Атомистическое учение Демокрита — Эпикура определило многие черты мировоззрения выдающихся естествоиспытателей, в том числе таких, как И. Ньютон и М. В. Ломоносов.

Лукреций (99—55 гг. до н. э.), глубокий знаток и последователь атомистического учения, старался как можно ближе к подлиннику изложить мысли Демокрита и Эпикура, избрав в дидактических целях стихотворную форму.

О жизни ученого-поэта достоверных сведений не сохранилось, кроме краткой записи в хронике Иеронима (IV в. н. э.). Заимствовав, по-видимому, сведения у неизвестных языческих авторов, живших в эпоху Лукреция, Иероним под цифрой «95 г. до н. э.» повествует о трагической судьбе Лукреция: «Рождается поэт Тит Лукреций. Впоследствии, впадши в умопомешательство от приворотного зелья и написав в промежутках между припадками безумия несколько книг, которые впоследствии отредактировал Цицерон, он покончил самоубийством на сорок четвертом году своей жизни». Некоторые историки оспаривают истинность этого утверждения, но до сих пор не выяснено ни место рождения поэта, ни его происхождение. По тройному имени — Тит Лукреций Кар — и ряду других соображений одни исследователи относят его к высшим слоям римского общества, другие, основываясь на резкой критике в поэме алчности и жестокости римских патрициев, отражающей взгляды средних слоев римских граждан, причисляют Лукреция к «всадникам».

Поэму «О природе вещей» смело можно назвать энциклопедией научных знаний времен Лукреция. В ее шести книгах рассматриваются вопросы сущности мира и космогонии, оптики и зрения, астрономии, метеорологии, геологии, географии, техники, биологии и теории наследственности, анатомии, психологии, экономики, почвоведения, истории человеческого общества и культуры, музыки и т. д.

Здесь приведены отрывки из двух первых книг поэмы, в которых идет речь об атомах, их хаотическом движении и взаимодействии.

О природе вещей

КНИГА I

<...> Но продолжаю я нить своего рассуждения снова.
Всю, самое по себе, составляют природу две вещи:
Это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство,
Где пребывают они и где двигаться могут различно.
Что существуют тела — непосредственно в том убеждает
Здравый смысл; а когда мы ему доверяться не станем,
То и не сможем совсем, не зная, на что положиться.
Мы рассуждать о вещах каких-нибудь тайных и скрытых,
Если ж пространства иль места, что мы пустотой называем,
Не было б вовсе, тела не могли бы нигде находиться
И не могли б никуда и двигаться также различно,
Как я на это тебе указал уже несколько раньше.
Кроме того, привести ничего ты не мог бы такого,
Что и не тело и что к пустоте вместе с тем не причастно
И оказаться могло б какой-нибудь третьей природы.
Ибо наличное все непременно быть чем-нибудь должно,
Будь оно иль велико, или самых ничтожных размеров:

Как из них воздух, вода, и земля, и огонь — все, что мягко, —
Может возникнуть, какой создается все это силой,
Если в составе вещей пустоты заключается примесь.
Если ж, напротив, вещей начала мягкими были б,
Взяться откуда могли и твердый камень, и железо, —
Это нельзя объяснить, потому что тогда изначальных
Всех оснований своих совершенно лишится природа.
Значит, начала вещей в существе своем просты и плотны.
Большая сплоченность их доставляет предметам возможность
Более твердыми быть и выказывать большие силы.
Далее, если б совсем не положено было предела
Для раздробления тел, то должны бы, однако, от века
Даже донны в вещах тела сохраняться, которых
Не постигла еще до сих пор никакая опасность.
Но если эти тела по природе дробленью доступны,
То непонятно тогда, почему же они сохранились,
Испокон века всегда подвергаясь несчетным ударам.

Так как затем, наконец, положены твердые грани
Каждому роду вещей для их разрастанья и жизни,
Раз установлено, что, сообразно законам природы,
Могут они породить и чего совершенно не могут.
Раз перемен никаких не бывает, а все неизменно,
Так что и птицы всегда в своем оперении пестром
Пятна на теле хранят, присущие каждой породе,
То и материя вся должна пребывать неизменной
В теле отдельных пород. Ведь, если б могли изменяться
Первоначала вещей, подчиняясь каким-то причинам,
Было б неясно для нас и то совершенно, что может
Происходить, что не может, какая конечная сила
Каждой вещи дана и какой ей предел установлен.
И не могли б столько раз повторяться в отдельных породах
Свойства природные, нрав и быт, и движения предков.

Далее, так как есть предельная некая точка
Тела такого, что уже недоступно для нашего чувства,
То, несомненно, она совсем не делима на части,
Будучи меньше всего по природе своей; и отдельно,
Самостоятельно, быть не могла никогда и не сможет,
Ибо другого она единая первая доля,
Вслед за которой еще подобные ей, по порядку
Сомкнутым строем сплотясь, образуют телесную сущность;
Так как самим по себе им быть невозможно, то, значит,
Держатся вместе они, и ничто их не может расторгнуть.
Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны,
Стиснуты будучи крепко сцепленьем частей наименьших,
Но не являясь притом скоплением отдельных частичек,
А отличаясь скорей вековечной своей простотою.
И ничего ни отторгнуть у них, ни уменьшить природа
Не допускает уже, семена для вещей сберегая.
Если не будет затем ничего наименьшего, будет

Из бесконечных частей состоять и мельчайшее тело:
У половины всегда найдется своя половина,
И для деленья нигде не окажется вовсе предела.
Чем отличишь ты тогда наименьшую вещь от Вселенной?
Ровно, поверь мне, ничем. Потому что, хотя никакого
Нет у Вселенной конца, но ведь даже мельчайшие вещи
Из бесконечных частей состоять одинаково будут.
Здравый, однако же, смысл отрицает, что этому верить
Может наш ум, и тебе остается признать неизбежно
Существование того, что совсем неделимо, являясь
По существу наименьшим. А если оно существует,
Должно признать, что тела изначальные плотны и вечны.
Если бы все, наконец, природа, творящая вещи,
На наименьшие части дробиться опять заставляла,
Снова она никогда ничего возродить не могла бы.
Ведь у того, что в себе никаких уж частей не содержит,
Нет совсем ничего, что материи производящей
Необходимо иметь: сочетаний различных и веса,
Всяких движений, толчков, из чего создаются вещи. (...)

КНИГА 2

(...) Дабы ты лучше постиг, что тела основные¹ мнутся
В вечном движении всегда, припомни, что дна никакого
Нет у Вселенной нигде, и телам изначальным остаться
Негде на месте, раз нет ни конца, ни предела пространству.
Если безмерно оно и простерто во всех направлениях,
Как я подробно уже доказал на основе разумной.
Раз установлено так, то телам изначальным, конечно,
Вовсе покоя нигде не дано в пустоте необъятной.
Наоборот: непрерывно гонимые разным движеньем,
Частью далеко они отлетают, столкнувшись друг с другом,
Частью ж расходятся врозь на короткие лишь расстоянья.
Те, у которых тесней их взаимная сплоченность, мало
И на ничтожные лишь расстояния прядая порознь,
Сложностью самих фигур своих спутаны будучи цепко,
Мощные корни камней и тела образуют железа
Стойкого, так же как все остальное подобного рода.
Прочие, в малом числе в пустоте необъятной витая,
Прядают прочь далеко и далеко назад отбегают
На промежутки большой. Из них составляется редкий
Воздух, и солнечный свет они нам доставляют блестящий.
Множество, кроме того, в пустоте необъятной витает
Тех, что отброшены прочь от вещей сочетаний и снова
Не были в силах еще сочетаться с другими в движеньи.
Образ того, что сейчас описано мной, и явление
Это пред нами всегда и на наших глазах происходит.
Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает

В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,
 Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая,
 Мечутся взад и вперед в лучистом сиянии света;
 Будто бы в вечной борьбе они бьются в сраженьях и битвах,
 В схватки бросаются вдруг по отрядам, не зная покоя,
 Или сходясь, или врозь непрерывно опять разлетаясь.
 Можешь из этого ты уяснить себе, как неустанно
 Первоначала вещей в пустоте необъятной мятутся.
 Так о великих вещах помогают составить понятие
 Малые вещи, пути намечая для их постиженья.
 Кроме того, потому обратить тебе надо вниманье
 На суматоху в телах, мелькающих в солнечном свете,
 Что из нее познаешь ты материи также движенья,
 Происходящие в ней потаенно и скрыто от взора.
 Ибо увидишь ты там, как много пылинок меняют
 Путь свой от скрытых толчков и опять отлетают обратно,
 Всюду туда и сюда разбегаясь во всех направлениях.
 Знай же: идет от начал всеобщее это блужданье.
 Первоначала вещей сначала движутся сами,
 Следом за ними тела из малейшего их сочетанья,
 Близкие, как бы сказать, по силам к началам первичным,
 Скрыто от них получая толчки, начинают стремиться,
 Сами к движенью затем понуждая тела покрупнее.
 Так, исходя от начал, движение мало-помалу,
 Наших касается чувств, и становится видимым также
 Нам и в пылинках оно, что движутся в солнечном свете,
 Хоть незаметны толчки, от которых оно происходит². <...>

Комментарий

Перевод с латинского поэмы Лукреция выполнен Ф. А. Петровским. Отрывки воспроизводятся по изданию: Лукреций. О природе вещей. Т. 1. М., 1945.

¹ Т.е. атомы. Лукреций не употребляет слово «атом», заменяя его в поэме терминами: «тело изначальное», «тело основное», «первоначало вещей» и т. д.

² Это место у Лукреция удивительно напоминает описание броуновского движения частиц, взвешенных в воздухе.

Литература

- [1] Латинский текст поэмы Лукреция воспроизведен параллельно русскому переводу в издании, указанном выше. Второй том этого издания содержит статьи о Лукреции, его естественно-научных представлениях и эпохе, в которую он жил, а также фрагменты произведений Эпикура и Эмпедокла.
- [2] Лурье С. Я. Демокрит. Л., 1970.
- [3] Маковельский А. О. Древнегреческие атомисты. Баку, 1946.
- [4] Гончарова Т. Эпикур. М., 1988.
- [5] Шанкрзаде А. С. Эпикур. М., 1963.



Архимед

ок. 287 — 212 до н. э.

О статике и гидростатике

Для эпохи эллинизма, начало которой было положено завоеваниями Александра Македонского, характерен постепенный переход от общих натурфилософских построений к более конкретным исследованиям в отдельных областях естествознания. Этому во многом способствовало значительное расширение круга практических знаний и опыта, вызванное образованием громадной империи Александра. Философские рассуждения, догадки, а часто и домыслы в трудах греческих ученых постепенно уступали место доказательным методам математики. Широкое развитие военной и строительной техники делало мышление ученых более прагматичным. Отмеченные особенности науки эллинистической эпохи были присущи творчеству Архимеда, одного из основателей статики и гидростатики.

О жизни Архимеда известно не много, но его имя и творчество овеяны многочисленными легендами.

Архимед родился в Сиракузах на острове Сицилия в 287 г. до н. э. Его отец, астроном Фидий, был родственником сиракузского царя Гиерона. Архимед получил хорошее образование, долгие годы пробыв в знаменитом Александрийском музее — уникальном научно-исследовательском центре античного мира, с которым ученый не порывал связей до конца своей жизни (он погиб в 212 г. до н. э.). Легендой овеяны последние минуты жизни ученого. Ворвавшийся в дом Архимеда римский воин убил склоненного над какими-то вычислениями старика, который просил немного подождать, пока он не закончит решение задачи.

Творческую деятельность Архимед начал как инженер, создавая различные механические приспособления, широко использовавшиеся в строительной технике и быту. Всего Архимеду приписывают около 40 изобретений, в том числе такие, как винт и полиспаст. К этому периоду относится одно из первых его сочинений «Книга опор», не дошедшая до нас, цитаты из которой приводит в своей «Механике» александрийский инженер и математик Герон. В сочинении давался расчет (правда, ошибочный) многоопорной балки и приводилась теория двуплечего рычага.

В трудах по геометрии Архимед разрабатывал интегральные методы, широко использовавшиеся математиками вплоть до создания Г. В. Лейбницем и И. Ньютоном интегрального исчисления. Архимед предложил приемы вычисления поверхностей и объемов сложных фигур, которые основывались на рассмотрении более простых (кругов, цилиндров, шаров).

Большую известность получил трактат Архимеда «Псаммит» («Исчисление песчинок») астрономо-вычислительного характера. Архимед определяет число песчинок во Вселенной, полагая ее замкнутой и ограниченной сферой. Здесь же он дает размеры (разумеется, неточные) Земли, Солнца и расстояние между ними.

Подход Архимеда к физическим проблемам основан на простых, но строгих геометрических доказательствах, так что его можно считать родоначальником математической физики, которой он посвящает трактаты «О равновесии плоских фигур», «О плавающих телах» и не дошедшую до нас фундаментальную работу по оптике «Катоптрика».

Трактат «О равновесии плоских фигур» состоит из двух книг. В первой Архимед обобщает эмпирические данные, полученные его предшественниками о равновесии твердых тел, формулируя на их основе аксиомы-постулаты, и выводит закон рычага. С помощью строгих геометрических доказательств он получает ряд следствий, строя, таким образом, теорию о центре тяжести; пользуясь доказанными теоремами, Архимед находит положение центра тяжести различных плоских фигур, ограниченных прямыми: параллелограмма, треугольника и трапеции. Вторая книга посвящена определению центров тяжести параболического сегмента и параболической трапеции.

Сочинение «О плавающих телах» исследователи относят к числу самых поздних, а некоторые считают его последним научным трудом Архимеда. Это сочинение также состоит из двух книг. В первой книге Архимед, полагая свободную поверхность жидкости сферической, подробно разбирает вопросы, связанные с погружением твердых тел в жидкость, и формулирует закон, до сих пор приводимый в любом школьном учебнике. И здесь подход к проблеме тот же: на основании опытных наблюдений Архимед строит модель жидкости, с помощью которой получает ряд следствий, обосновывая их строгими геометрическими доказательствами. Во второй книге, полагая поверхность жидкости плоской, он рассматривает принцип работы ареометра и условие равновесия в жидкости тел, имеющих форму сегмента параболоида. Выводы Архимеда представляли практический интерес для судостроения.

О равновесии плоских фигур, или о центрах тяжести плоских фигур

КНИГА I

Сделаем следующие допущения:

1. Равные тяжести на равных длинах уравниваются, на неравных же длинах не уравниваются, но перевешивают тяжести на большей длине.

2. Если при равновесии тяжестей на каких-нибудь длинах к одной из тяжестей будет что-нибудь прибавлено, то они не будут уравниваться, но перевесит та тяжесть, к которой было прибавлено.

3. Точно так же, если от одной тяжести будет отнято что-нибудь, то они не будут уравниваться, но перевесит та тяжесть, от которой не было отнято.

4. При совмещении друг с другом равных и подобных¹ плоских фигур совместятся друг с другом и их центры тяжести.

5. У неравных же, но подобных фигур центры тяжести будут подобно же расположены. Под подобным расположением точек в подобных фигурах мы подразумеваем такое, в котором прямые, проведенные из этих точек к вершинам равных углов, образуют равные углы с соответствующими сторонами.

6. Если величины уравниваются на каких-нибудь длинах, то на тех же самых длинах будут уравниваться и равные им.

7. Во всякой фигуре, периметр которой везде выпукл в одну и ту же сторону, центр тяжести должен находиться внутри фигуры.

При этих предположениях:

I. Тяжести, уравнивающиеся на равных длинах, будут тоже равны. Действительно, если бы они были неравными, то после отнятия от большей избытка они не уравниваются, поскольку что-то отнято от одной из двух уравнивающих тяжестей. Таким образом, уравнивающиеся на равных длинах тяжести будут тоже равны.

II. Неравные тяжести на равных длинах не уравниваются, но перевешивает большая. (...)

III. Неравные тяжести будут уравниваться на неравных длинах, причем большая тяжесть на меньшей длине.

Пусть А, В — неравные тяжести и А — большая, причем они уравниваются на длинах АГ, ГВ [рис. 1]. Требуется доказать, что АГ меньше ГВ.

Действительно, пусть она не будет меньше. Тогда после отнятия избытка, на который А превышает В, перевесит В, поскольку что-то было отнято от одной из уравнивающихся тяжестей. Но она не перевесит; действительно, если ГА равна ГВ, то они уравниваются [как равные тяжести на равных длинах], если же ГА больше ГВ, то перевесит А, так как равные тяжести на не-

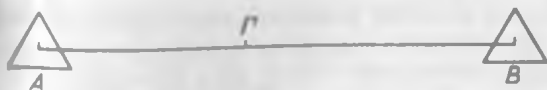


Рис. 1

равных длинах не уравниваются, но перевешивает тяжесть на большей длине. На основании этого АГ меньше ГВ.

Так же ясно, что уравниваются на неравных длинах тяжести не равны, причем большая тяжесть будет на меньшей длине.

IV. Если две равные величины не имеют одного и того же центра тяжести, то для величины, составленной из обеих этих величин, центром тяжести будет середина прямой, соединяющей центры тяжести этих величин. <...>

V. Если центры тяжести трех величин лежат на одной прямой, причем эти величины имеют одинаковую тяжесть, и прямые, лежащие между центрами, равны, то для величины, составленной из всех величин, центром тяжести будет точка, которая является центром тяжести для средней [величины]. <...>

Следствие 1

Из этого ясно, что если имеется любое нечетное количество величин, центры тяжести которых лежат на одной прямой, причем величины, одинаково отстоящие от середины, имеют равные тяжести и прямые, заключающиеся между их центрами, равны, то для величины, составленной из всех этих величин, центром тяжести будет точка, которая является центром тяжести для средней из них.

Следствие 2

Также если эти величины будут в четном количестве, причем их центры тяжести лежат на одной прямой, и как средние величины, так и одинаково от них отстоящие имеют равную тяжесть, а прямые между центрами равны, то для величины, составленной из всех этих величин, центром тяжести будет середина прямой, соединяющей центры тяжести этих величин, как нарисовано ниже [рис. 2].

VI. Соизмеримые величины уравниваются на длинах, которые обратно пропорциональны тяжестим.

Пусть А, В будут соизмеримые величины, центры которых А, В. Возьмем некоторую длину ЕД, причем пусть как А [относится] к В, так будет и длина ДГ [относиться] к длине ГЕ [рис. 3]. Требуется доказать, что для величины, составленной из обеих величин АВ, центром тяжести будет Г.

Действительно, поскольку А относится к В как ДГ к ЕГ

$$\frac{A}{B} = \frac{DG}{EG}$$



Рис. 2

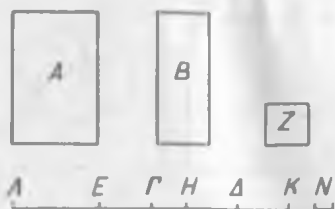


Рис. 3

и А соизмерима с В, то значит, $\Delta\Gamma$ соизмерима с $E\Gamma$, т. е. прямая соизмерима с прямой, так что у $E\Gamma$, $\Delta\Gamma$ есть общая мера. Пусть она будет N; отложим ΔH , ΔK , равные каждая $E\Gamma$, и $E\Lambda$, равную $\Delta\Gamma$.

Тогда, поскольку ΔH равна $E\Gamma$, и $\Delta\Gamma$ равна $E\Lambda$, так что и ΔE равна $E\Lambda$.

Значит, ΛH вдвое больше $\Lambda\Gamma$, а HK вдвое больше $E\Gamma$, так что N измерит и каждую из ΛH , HK , поскольку она измеряет их половины. И поскольку как А относится к В, так и $\Lambda\Gamma$ к $E\Gamma$, т. е.

$$\frac{A}{B} = \frac{\Delta\Gamma}{E\Gamma} \cdot \frac{\Delta\Gamma}{E\Gamma} = \frac{\Lambda H}{HK}$$

(так как каждая из вторых вдвое больше соответствующей из первых прямых), значит $\frac{A}{B} = \frac{\Lambda H}{HK}$. Пусть А во столько раз больше

З, во сколько ΛH больше N. Тогда $\frac{\Lambda H}{N} = \frac{A}{Z}$. Так же

$\frac{HK}{\Lambda H} = \frac{B}{A}$ и тогда «по равенству» $\frac{HK}{N} = \frac{B}{Z}$. Значит, HK от N и

В от Z будут равнократными. Доказано, что и А есть кратное Z, так что Z будет общей мерой для А, В. Если мы разделим прямую ΛH на части, равные N, величину А — на части, равные Z, то равновеликие N отрезки в ΛH будут в равном количестве с частями в А, равными Z. Таким образом, если на каждый из содержащихся в ΛH отрезков наложить величину, равную Z, так, чтобы она имела центр тяжести в середине отрезка, то все эти величины вместе будут равны А и для составленной из всех их величины центром тяжести будет E, так как все они будут в четном числе и в одинаковом количестве с каждой стороны от E вследствие того, что ΛE равна $E\Lambda$.

Подобным же образом докажем, что если на каждый из содержащихся в HK отрезков наложить величину, равную Z, так, чтобы она имела центр тяжести в середине отрезка, то все эти величины вместе будут равны В, и для составленной из всех их величины центром тяжести будет Δ ; тогда величина А будет наложена в E, величина же В — в Δ . Таким образом, получатся равные друг другу величины, расположенные по прямой, центры тяжести которых равноудалены друг от друга, причем в четном числе. Ясно, что для составленной из всех их величины центром

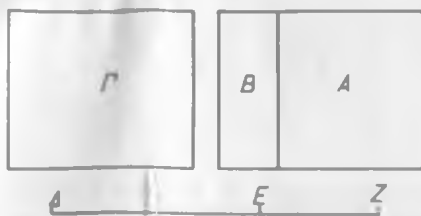


Рис. 4

тяжести будет точка, делящая пополам прямую, на которой находятся центры промежуточных величин. Поскольку ΔE равна $\Delta \Gamma$, а $E\Gamma$ равна ΔK , значит, и вся $\Delta \Gamma$ будет равна ΓK ; так что для составленной из всех величин центром тяжести будет точка Γ . Итак, если A приложить в E , а B в Δ ,

то A и B будут находиться в равновесии по отношению к Γ .

VII. Если величины будут несоизмеримыми, то они точно так же уравновесятся на длинах, которые обратно пропорциональны этим величинам.

Пусть AB, Γ — несоизмеримые величины, а $\Delta E, EZ$ — длины, и пусть AB имеет к Γ то же самое отношение, что длина ΔE к длине EZ [рис. 4]; я утверждаю, что для величины, составленной из обеих AB, Γ , центром тяжести будет E . Действительно, если AB , помещенная в Z , не уравновесится с Γ , помещенной в Δ , то AB или будет больше, чем нужно для равновесия с Γ , или нет.

Пусть она будет больше; отнимем от AB меньше того избытка, на который AB больше, чем нужно для равновесия с Γ , так чтобы остаток A был соизмерим с Γ . Поскольку теперь величины A, Γ соизмеримы и A имеет к Γ отношение меньше, чем ΔE к EZ , то A и Γ не уравновесятся на длинах $\Delta E, EZ$, если A поместить в Z , а Γ в Δ . Таким же образом докажем и в том случае, когда Γ будет больше того, что нужно для равновесия с AB^2 .

О плавающих телах

КНИГА I

Предположим, что жидкость имеет такую природу, что из ее частиц, расположенных на одинаковом уровне и прилежащих друг к другу, менее сдвинутые выталкиваются более сдвинутыми и что каждая из ее частиц сдавливается жидкостью, находящейся над ней по отвесу, если только жидкость не заключена в каком-нибудь сосуде и не сдавливается еще чем-нибудь другим. (...)

II. Поверхность всякой жидкости, установившейся неподвижно, будет иметь форму шара, центр которого совпадает с центром Земли. (...)

III. Тела, равнотяжелые с жидкостью, будучи опущены в эту жидкость, погружаются так, что никакая их часть не выступает над поверхностью жидкости и они не будут двигаться вниз.

Опустим в жидкость какое-нибудь тело из равнотяжелых с этой жидкостью, и пусть, если возможно, некоторая часть его будет выступать над поверхностью жидкости. Пусть жидкость

установится в таком положении, что будет оставаться неподвижной. Вообразим некоторую плоскость, проведенную через центр Земли К, через жидкость и через это тело. Пусть дуга АВГД — ее пересечение с поверхностью жидкости [рис. 5], а фигура ЕЗӨН — с рассматриваемым телом. Тогда часть ВДӨН тела будет в жидкости, часть ВАЕЗ — вне ее. Вообразим, что тело охвачено пирамидообразной фигурой, имеющей в основании на поверхности воды параллелограмм, а вершиной — центр Земли. Пусть КА и КМ — сечения граней пирамиды с той плоскостью, в которой находится дуга АВГД. Около центра К опишем еще одну шаровую поверхность так, чтобы она проходила внутри жидкости и ниже тела ЕЗӨН, и разрежем ее плоскостью. Затем возьмем другую пирамиду, равную и подобную той, которая охватывает погруженное тело, и смежную с ней. Пусть КМ и КN — сечения ее граней. В жидкости вообразим некоторый объем РГТЗ, охваченный жидкостью, равный и подобный части ВӨН первого тела, погруженной в жидкость. Тогда частицы жидкости в первой пирамиде, расположенные под той частью поверхности, где находится дуга ОЕ, а также соответствующие частицы в другой пирамиде, где находится дуга ОП, будут лежать на одном уровне и в непрерывной связи друг с другом. Однако они не испытывают одинакового давления. Действительно, те частицы, которые расположены по ОЕ, сдавливаются телом ЕЗӨН и той жидкостью, которая находится между поверхностями ОЕ, АМ и гранями первой пирамиды, те же, которые расположены по ОП, сдавливаются жидкостью, находящейся между поверхностями ОП, МN и гранями второй пирамиды. Тогда давление на жидкость, находящуюся между ОП и МN, будет меньше, так как [объем] РГТЗ меньше тела ЕЗӨН, ибо этому [объему] равна только часть ВӨН, и она предполагается одинаковой по величине и равнотяжелой, (с жидкостью, а остальные части в обеих пирамидах одинаковы)³. Теперь ясно, что часть жидкости, которая соответствует дуге ОП, будет вытолкнута той частью, которая соответствует дуге ОЕ, и жидкость никак не будет неподвижной. Было же предложено, что она неподвижна; значит, никакая часть тела не будет выступать над поверхностью жидкости. Погрузившись же, тело не будет двигаться вниз, так как все части жидкости, находящиеся на одном уровне, будут давить одинаково вследствие того, что тело является равнотяжелым с жидкостью⁴.

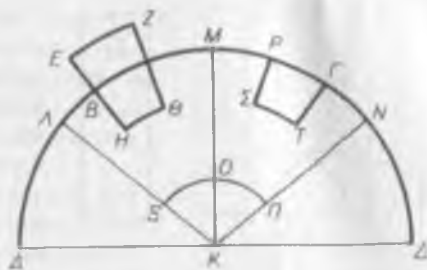


Рис. 5

IV. Тело более легкое, чем жидкость, будучи опущено в эту жидкость, не погружается целиком, но некоторая часть его остается над поверхностью жидкости. (...).

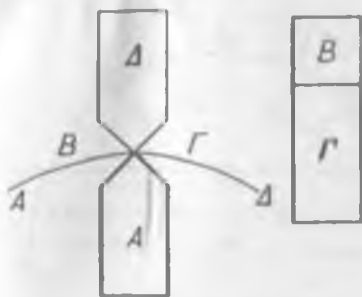


Рис. 6

V. Тело более легкое, чем жидкость, будучи опущено в эту жидкость, погружается настолько, чтобы объем жидкости, соответствующий погруженной [части тела], имел вес, равный весу всего тела. <...>

VI. Тела более легкие, чем жидкость, опущенные в эту жидкость насильно, будут выталкиваться вверх с силой, равной тому весу, на который жидкость, имеющая равный объем с телом, будет тяжелее этого тела.

Пусть имеется некоторое тело А [рис. 6], более легкое, чем жидкость; В — вес тела А, а $B + \Gamma$ — вес жидкости в объеме А. Требуется доказать, что насильно погруженное в жидкость тело А будет выталкиваться вверх с силой, равной весу Γ .

Возьмем какое-нибудь тело Δ, имеющее вес, равный Γ . Тогда тело, составленное из обоих тел А и Δ, будет легче жидкости [в том же объеме], так как вес составного тела будет $B + \Gamma$, вес же жидкости в равном объеме будет больше, чем $B + \Gamma$, так как $B + \Gamma$ представляет вес [жидкости] в объеме, равном А. Теперь тело, составленное из тел А, Δ, будучи опущено в жидкость, погрузится настолько, чтобы жидкость в объеме, равном погруженной части, имела вес, равный весу всего тела, как это доказано выше.

Пусть дуга АВΓΔ — поверхность некоторой жидкости. Так как количество жидкости в объеме, равном телу А, имеет вес, равный весу тел А, Δ, то ясно, что погруженная часть этого тела будет иметь объем, равный А, остальная же часть его, именно Δ, будет находиться над поверхностью жидкости. Действительно, если бы это тело погрузилось иначе, то получилось бы [противоречие] с тем, что было доказано [раньше]. Теперь ясно, что [с какой силой] тело А выталкивается кверху, [с такой же силой оно будет придавливаться] книзу находящимся над ним телом Δ, поскольку ни то, ни другое не пересиливают друг друга. Но Δ давит вниз с тяжестью, равной весу Γ , так как было предположено, что вес тела Δ равен Γ ; теперь то, что требовалось доказать, будет очевидно.

VII. Тела более тяжелые, чем жидкость, опущенные в эту жидкость, будут погружаться, пока не дойдут до самого низа и в жидкости станут легче на величину веса жидкости в объеме, равном объему погруженного тела.

Что тело будет погружаться, пока не дойдет до самого дна, очевидно, так как находящиеся под ним частицы жидкости будут испытывать большее давление, чем другие, расположенные на одном с ним уровне, так как тело предполагается более тяжелым, чем жидкость; а что оно, как сказано, [в жидкости] станет легче, это следует доказать.

Пусть имеется некоторое тело А [рис. 7], более тяжелое, чем жидкость. Пусть вес тела А будет $B + \Gamma$, вес же жидкости в объеме, равном А, будет В. Требуется доказать, что тело А, находясь в жидкости, будет иметь вес, равный Γ .

Возьмем некоторое тело Δ , [более легкое, чем жидкость в его объеме; пусть] вес тела Δ будет равен весу В, вес же жидкости, имеющей одинаковый с телом Δ объем, пусть будет равен весу $B + \Gamma$. Если мы сло-

жим оба наши тела А и Δ в одно, то составное тело будет равнотяжелым с жидкостью; действительно, вес обоих этих тел равен вместе взятым весам $B + \Gamma$ и В, вес же жидкости, имеющей объем составного тела, равен тем же самым весам. Значит, если эти тела опустить в жидкость, то они будут в равновесии с жидкостью и не будут двигаться ни вверх, ни вниз. Вследствие этого тело А пойдет вниз с такой же силой, с какой тело Δ будет увлекаться вверх. Тело Δ , поскольку оно легче жидкости, будет двигаться вверх с силой, равной весу Γ , так как доказано, что более легкие, чем жидкость, тела, будучи насильно погружены в эту жидкость, движутся вверх с силой, равной тому весу, на который жидкость, имеющая объем, равный этому телу, будет тяжелее последнего. Но жидкость, имеющая равный объем с телом Δ , будет тяжелее тела Δ на вес Γ . Теперь ясно, что тело А будет двигаться вниз [с силой, равной весу Γ]. (...)



Рис. 7

Комментарии

Перевод с латинского работ Архимеда выполнен И. Н. Веселовским. Отрывки воспроизводятся по изданию: Архимед. Сочинения. М., 1962.

¹ Т. е. конгруэнтных, так как геометрическое равенство греки понимали в смысле равновеликости.

² Доказательство должно быть дополнено так. Если мы от АВ отнимем В так, что А, являясь соизмеримой с Γ , все же будет перевешивать последнюю, то отношение А к Γ должно быть больше отношения Е к Е. В самом деле, при равновесии относительно точки Е мы имели бы равенство

$$\frac{A}{\Gamma} = \frac{EA}{EZ}, \text{ если же } A \text{ перевешивает, то } \frac{A}{\Gamma} > \frac{EA}{EZ}, \text{ но в действительности } \frac{A}{\Gamma} < \frac{EA}{EZ}, \text{ так как } \frac{E}{F} = \frac{A+B}{\Gamma}; \text{ полученное противоречие и доказывает теорему.}$$

³ Фраза в скобках, по-видимому, представляет позднейшую вставку; во всяком случае, слова «одинаковой по величине» совершенно излишни.

⁴ Это место иногда толковали в том смысле, что рав-

нотяжелое с жидкостью тело будет в равновесии только у поверхности жидкости, а не в любом положении внутри жидкости, и соответственно упрекали Архимеда в ошибке. Такого рода толкование не является необходимым; дальнейшие слова об одинаковости давления, т. е. об отсутствии побудительной силы для движения, показывают, что мысль Архимеда заключалась в том, что движение вниз считалось невозможным именно вследствие отсутствия причины их движения.

Литература

- [1] Собрание сочинений Архимеда:
Archimedis opera omnia cum commentariis Eutocii. Ed.
J. L. Heiberg. Vols. 1—3. Leipzig, 1880—1881.
 - [2] Лурье С. Я. Архимед. М.—Л., 1945.
 - [3] Васеловский И. Н. Архимед. М., 1957.
 - [4] Житомирский С. В. Архимед. М., 1981.
-



Леонардо да Винчи

1452—1519

О науке

Научная революция XVII в., приведшая к возникновению науки в современном понимании этого слова, явилась следствием постепенного накопления знаний, ответом на все возрастающие потребности развивающейся техники и, в более широком плане, производства в целом. Предпосылкой этой революции послужила деятельность многих мыслителей, изобретателей, художников предшествующих столетий. Одним из наиболее выдающихся представителей этого периода был итальянский художник и естествоиспытатель Леонардо да Винчи.

Леонардо родился 15 апреля 1452 г. в селении Анкиано около городка Винчи между Флоренцией и Пизой. Он был внебрачным сыном зажиточного нотариуса. Леонардо не получил систематического образования. В четырнадцать лет он был отдан на обучение в мастерскую известного флорентийского живописца и скульптора А. Вероккьо. Во Флоренции сложились интересы юноши. Работая в мастерской, он не только осваивал мастерство живописца и скульптора, но и приобретал знания в области математики, оптики, механики, техники. В 1472 г. Леонардо закончил обучение и был записан в цех флорентийских художников. Уже в это время Леонардо задумывался над грандиозным проектом использования вод реки Арно для соединения каналом Пизы и Флоренции. Хотя в этот период Леонардо создает свое первое живописное произведение — картину «Крещение Христа» (в соавторстве с Вероккьо), жизнь во Флоренции его не удовлетворяет. Он пишет письмо миланскому герцогу Лодовико Сфорца с предложением услуг в качестве инженера.

С 1482 г. на протяжении 17 лет Леонардо работает в Милане. Здесь он находит приложение своим силам, выступая то как военный инженер, то как архитектор, то как гидротехник, скульптор и живописец. В Милане он находит близких ему по интересам людей, пополняет свое образование. Правда, и на службе у Сфорца ему приходится тратить силы на украшение многочисленных и пышных празднеств. В этот период Леонардо работал

над знаменитой фреской «Тайная вечеря» в монастыре Санта Мариа делла Грация. Во время этой работы он, как и в других случаях, проводил эксперименты с красками, что пагубно отразилось на судьбе произведения. В последние годы перед отъездом из Милана Леонардо сотрудничал с математиком Лукой Пачиоли, для книги которого «О божественной пропорции» он выполнил иллюстрации*. Много сил отдал Леонардо созданию конной статуи отца герцога. Он много экспериментировал и неоднократно менял проект. В итоге была установлена глиняная модель статуи, уничтоженная во время оккупации Милана французами в 1499 г.

В 1499 г. Леонардо покидает Милан и через Венецию приезжает во Флоренцию, где он много занимается живописью, но не может найти приложения своим научным и техническим идеям. Однако и в это время, как свидетельствуют современники, он не прекращал занятий математикой (геометрией). Во флорентийский период жизни Леонардо размышляет над проблемами воздухоплавания, изучая при этом анатомию птиц и механику их полета. Тогда же Леонардо создал знаменитую «Джоконду».

В 1507 г. Леонардо вернулся в Милан по приглашению французского наместника. Здесь его приняли как прославленного живописца. В Милане Леонардо интенсивно занимается анатомией, готовит труд на эту тему, создает иллюстрации к сочинению врача М. делла Торре.

Неспокойная политическая обстановка заставляет Леонардо в 1513 г. переехать в Рим, где он прожил три года, испытывая на себе неприязнь и подозрительность со стороны власти имущих. В результате клеветнических доносов ученому было запрещено заниматься диссекцией трупов. Это послужило для Леонардо толчком для принятия приглашения французского короля Франциска I. В 1516 г. он переехал во Францию. Там в последние годы жизни он по-прежнему ведет активную творческую жизнь, выступая как архитектор и живописец, проектируя канал, продолжая исследования по анатомии. Леонардо умер 2 мая 1519 г.

Деятельность Леонардо да Винчи охватывает почти все области техники, медицины, механики и оптики. Число сделанных им изобретений огромно. Практически все они остались неопубликованными и не оказали влияния на дальнейшее развитие естествознания и техники. Однако творчество Леонардо представляет собой символ движения человеческой мысли к новому пониманию природы и методов ее исследования, поэтому оно занимает почетное место в истории науки. Советский исследователь творчества Леонардо В. П. Зубов писал: «Если попытаться определить типичные черты Леонардо-естествоиспытателя, то основными нужно было бы признать следующие. Во-первых, Леонардо — мыслитель, намечающий программу нового экспериментального есте-

* «Божественная пропорция» — это так называемое «золотое сечение» в математике.

ствознания, страстный и неутомимый противник отживающего и отмирающего. Во-вторых, Леонардо не только наметил программу, но и сам неутомимо экспериментировал, разрабатывал самые различные отрасли естественных наук. В-третьих, бросается в глаза монолитность фигуры Леонардо — ученого, выступавшего при разработке конкретных проблем во всеоружии своих разносторонних знаний. И наконец, в-четвертых, Леонардо-ученый неотделим от Леонардо-инженера, изобретателя, художника».

Ниже приводятся отрывки из сохранившихся рукописей Леонардо, которые иллюстрируют отмеченные особенности его творчества. При чтении этих отрывков следует иметь в виду, что они не предназначались для издания — отсюда некоторые стилистические шероховатости. Кроме того, не следует забывать, что, хотя во многих вопросах науки Леонардо значительно опередил свое время, все же его взгляды часто далеки от современных представлений.

Об истинной и ложной науке

Какая наука — механическая и какая — немеханическая? Утверждают, что механическим является то знание, которое порождено опытом, научным знанием — то, которое рождается и завершается в мысли, а полумеханическим — то, которое рождается от науки и завершается в деятельности рук (*operatione manuale*). Но мне кажется, что пусты и полны заблуждений те науки, которые не порождены опытом, отцом всякой достоверности, и не завершаются в наглядном опыте, т. е. те науки, начало, середина или конец которых не проходят ни через одно из пяти чувств. И если мы подвергаем сомнению достоверность всякой ощущаемой вещи, тем более должны мы подвергать сомнению то, что восстает против ощущений, каковы, например, вопросы о сущности бога и души и тому подобные, по поводу которых всегда спорят и сражаются. И поистине всегда там, где недостает разумных доводов, там их заменяет крик, чего не случается с вещами достоверными. Вот почему мы скажем, что там, где кричат, там истинной науки нет, ибо истина имеет одно-единственное решение, и когда оно оглашено, спор прекращается навсегда. И если спор возникает снова и снова, то эта наука — лживая и путаная, а не возродившаяся [на новой основе] достоверность.

Истинные науки — те, которые опыт заставил пройти сквозь ощущения и наложил молчание на языки спорщиков. Истинная наука не питает сновидениями своих исследователей, но всегда от первых истинных и доступных познанию начал постепенно продвигается к цели при помощи истинных заключений, как это явствует из первых математических наук, называемых арифметикой и геометрией, т. е. числом и мерой. Эти науки с высшей до-

стоверностью трактуют о величинах прерывных и непрерывных. Здесь не будут возражать, что дважды три больше или меньше шести или что в треугольнике углы меньше двух прямых углов. Всякое возражение оказывается здесь разрушенным, будучи приведено к вечному молчанию. И этими науками наслаждаются в мире их почитатели, чего не могут дать обманчивые науки мысленные. <...>

Опыт никогда не ошибается, ошибаются только суждения ваши, которые ждут от него вещей, не находящихся в его власти. Несправедливо жалуются люди на опыт, с величайшими упреками виня его в обманчивости. Оставьте его в покое и обратите свои жалобы на собственное невежество, которое заставляет вас быть поспешным, и, ожидая от опыта в суетных и вздорных желаниях вещей, которые не в его власти, говорить, что он обманчив! Несправедливо жалуются люди на неповинный опыт, часто виня его в обманчивых и лживых показаниях. <...>

Ни одно человеческое исследование не может называться истинной наукой, если оно не прошло через математические доказательства. И если ты скажешь, что науки, начинающиеся и кончающиеся в мысли, обладают истиной, то в этом нельзя с тобой согласиться, а следует отвергнуть это по многим причинам, и прежде всего потому, что в таких чисто мысленных рассуждениях не участвует опыт, без которого нет никакой достоверности. <...>

О трении

<...> Если гладкая наклонная поверхность приводит к тому, что гладкое тяжелое тело весит по линии движения одной четвертой частью своей тяжести, то тяжелое тело само по себе предрасположено опускаться вниз.

Тяжелое тело, которое движется без качения, причем трущаяся поверхность — гладкая, всегда будет иметь силу трения, равную одной четвертой части своей тяжести. <...>

Подсчет трений. Груз n [рис. 8] оказывает сопротивление, равное $1/4$ своей естественной тяжести¹; m сопротивляется $1/8$ своей тяжести; o сопротивляется $1/16$; p не сопротивляется, ибо в нем трение уничтожено. Но, чтобы сказать лучше: n сопротивляется $1/4$ своего естественного веса, m сопротивляется $1/2$ от $1/4$, o сопротивляется $1/4$ от $1/4$, p не сопротивляется ничем, ибо $1/4$ названной $1/4$ уничтожается при движении, совершенном от o до p и равном $1/4$.

Когда под влиянием природы своего положения тяжелое тело сохранит лишь $1/2$ своей тяжести, тогда трение его приобретает $1/3$ своей силы. Доказывается это так. Допустим, что груз дотянут до точки m [рис. 9], находящейся на отвесной линии под серединой горизонтали; тогда он имеет ровно $1/2$ своей естественной тяжести для двигателя, передвигающего его по наклону ms ; но эта линия не является средним наклоном, а составляет.

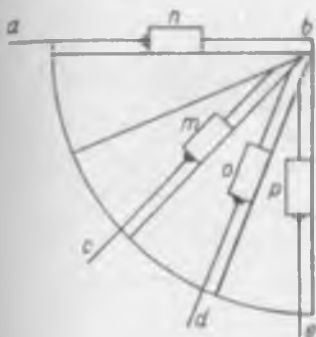


Рис. 8

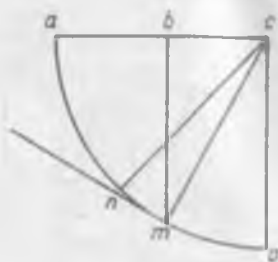


Рис. 9

собственно говоря, $1/3$, ибо линия ms пересекает кривую ao в точке m на трети этой кривой. Итак, если естественная тяжесть груза равна 12 фунтам, то его трение равно $1/4$ от этих 12, т. е. 3. Но так как этот груз дотянут только до третьей ступени наклона, то его трение достигло только третьей ступени своей силы, т. е. единицы; таким образом, чтобы тянуть груз 12 фунтов по наклонной ms , требуется сила, превосходящая 7, — не иначе.

Этот рисунок показывает ступени силы трения тяжестей, которые тянут по разным наклонам; и трение никогда не составит четверть влекомой тяжести, если эта тяжесть не будет передвигается по горизонтальной линии. И происходит это от того, что ступени возрастания тяжести равны лишь в начале и в конце и начинаются с противоположного конца по сравнению со ступенями трения.

Заключение. Я утверждаю, что груз m по линии ms имеет лишь $1/2$ своей тяжести. А следовательно, поскольку трение всегда оказывает сопротивление, равное $1/4$ такой тяжести, оно здесь дойдет до $1/2$ своей силы (...)

О бинокулярном зрении и восприятии формы и рельефа

Почему картина не может казаться столь же отделяющейся, как природные вещи? Живописцы часто приходят в отчаяние от своего подражания природе, видя, что их картины не имеют той рельефности и той живости, которую имеют предметы, видимые в зеркале. Они ссылаются на то, что имеют краски, которые по своей светлоте и темноте значительно превосходят качество света и теней у предмета, видимого в зеркале, обвиняя в этом случае свое неумение, а не причину, ибо ее они не знают. Невозможно, чтобы написанный предмет представлялся столь же рельефным, сколь и предмет в зеркале, хотя тот и другой одинаково находятся на одной лишь поверхности. Исключение составляет слу-

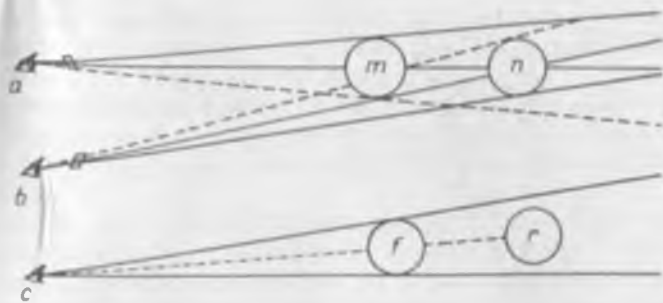


Рис. 10

чай, когда предмет видим одним глазом. Причина такова: два глаза видят один предмет, находящийся за другим; так *a* и *b* видят *n* и *m* [рис. 10]. Предмет *m* не может целиком заслонить *n*, ибо основание зрительных линий настолько широко, что [человек] видит второе тело за первым. Но если ты закроешь один глаз, а другим пусть будет *c*, то тело *r* заслонит *r*, ибо зрительная линия выходит из одной точки, упираясь в первое тело, почему второе тело равной с ним величины никак не сможет быть видимо. <...>

Способ исследовать на опыте, каким образом лучи проходят через жидкие тела. Вели сделать два сосуда, один должен быть концентричен другому и быть на $\frac{4}{5}$ меньше другого, и оба должны иметь одинаковую высоту. Затем укрепи один сосуд в другом [рис. 11]. Покрой его [разметь] снаружи краской и оставь маленькое отверстие, пропустив через последнее солнечный луч, проникающий через круглую скважину в двери или окне. Затем смотри: сохраняет ли луч свою прямизну, которую он имеет снаружи, проходя через воду, заключенную между сосудами, или нет? И на этом основании установи правило.

Чтобы увидеть, как солнечные лучи проникают через кривизну воздушной сферы, вели сделать два стеклянных шара, один вдвое больше другого, как можно более округлых. Затем разрежь их посередине и вложи один в другой, сомкни края, наполни водой и пропусти внутрь солнечный луч, как ты это делал раньше. Смотри, изгибается или искривляется этот луч, и установи соответствующее правило. Так ты сможешь произвести бесконечное число опытов. <...>

О функции глаза и его частей

<...> Зрачок глаза расположен в середине роговой оболочки, которая имеет вид части сферы, в середине своего основания содержащей зрачок. Эта роговая оболочка, будучи частью сферы, воспринимает все подобия предметов и через зрачок посылает их внутрь, в место, где совершается зрение [рис. 12]. При ана-

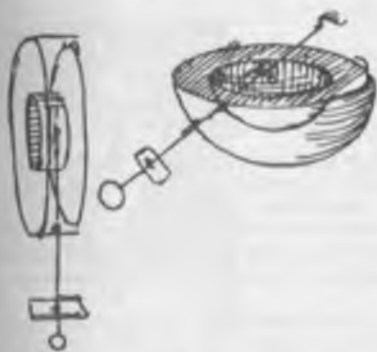


Рис. 11

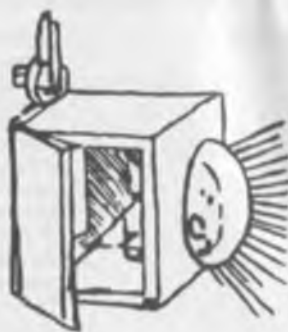


Рис. 12

томиировании глаза, для того чтобы хорошо разглядеть [его] внутри, не проливая влаги, надо положить глаз в яичный белок и прокипятить и укрепить, разрезая яйцо и глаз поперек, дабы средняя часть не пролила ничего вниз².

Чтобы увидеть, какую функцию выполняет роговая оболочка в отношении зрачка, вели сделать из хрусталя нечто подобное роговой оболочке глаза. <...>

Об очках

Доказательство того, как очки помогают зрению.

Пусть a и b — очки, c и d — глаза [рис. 13]. К старости предмет, который они обычно видели в e без труда, сильно отклоняя оси от прямой линии зрительных нервов, [не может быть более видим так близко]. К старости эта способность глаза отклонять оси ослабевает, становится невозможно поворачивать глаз без большой боли, и тогда необходимо отодвигать предмет дальше, т. е. из e в f , где можно видеть его лучше, но не в мелочах. Если между глазом и предметом помещены очки, то предмет становится хорошо видим на расстоянии юности, т. е. в e . Это бывает так потому, что изображение e приходит к глазу сквозь сложную среду — редкую и плотную. Редкая — это воздух, находящийся между предметом и очками, плотная — толщина стекла очков. Поэтому направление изображения отклоняется при движении его сквозь толщу стекла и поворачивает линии a и b так, что предмет, видимый в e , видится так, как если бы он находился в f , с тем преимуществом, что при этом оси глаза не отклоняются от его зрительного нерва. А ввиду близости предмет в e может быть видим и распознаваем лучше, чем в f , особенно если он незначительных размеров. <...>



Рис. 13

Комментарий

Перевод с итальянского текста Леонардо да Винчи выполнен В. П. Зубовым. Переводы воспроизводятся по изданию: Леонардо да Винчи. Избранные естественно-научные произведения. М., 1955.

Здесь Леонардо дает иллюстрацию использования «математического метода» для анализа явлений природы. Он ошибочно принимает, что для всех тел коэффициент трения скольжения равен 0,25. Эта ошибка связана, видимо, с тем, что Леонардо экспериментировал с ограниченным набором веществ.

Предлагаемый Леонардо оригинальный метод анатомирования глаза имеет тот недостаток, что при кипячении меняется кривизна поверхностей, разделяющих части глаза. Заметим, что Леонардо, как и другие ученые до Кеплера, считал, что на сетчатке глаза возникает прямое изображение предмета и, следовательно, лучи дважды пересекают оптическую ось внутри глаза.

Литература

- [1] О публикации рукописей Леонардо см.: Dictionary of Scientific Biography. N. Y., 1973, vol. 8, p. 243—245.
- [2] Duhem P. Etudes sur Leonard de Vinci. Sér. 1—3. Paris, 1955.
- [3] Hart I. B. The world of Leonardo da Vinci. London, 1961.
- [4] The Unknown Leonardo. N. Y. — London, 1974.
- [5] Зубов В. П. Леонардо да Винчи. М. — Л., 1962.
- [6] Гуковский М. А. Механика Леонардо да Винчи. М. — Л., 1947.



Н. Коперник

1473—1543

О гелиоцентрической системе мира

Важнейшим моментом в подготовке научной революции XVI—XVII вв., приведшей к рождению нового естествознания, было переосмысление вопроса о месте Земли во Вселенной. Еще в Древней Греции Аристарх Самосский выдвинул идею об обращении Земли вокруг Солнца. Однако эта идея не стала общепринятой, и в течение многих столетий господствующей была освященная церковью система Птолемея, в которой Земля рассматривалась как центр Вселенной. Многовековое господство теории Птолемея не только мешало развитию астрономии, но и тормозило прогресс всего естествознания, препятствуя осмыслению общности явлений природы. Поэтому выдвижение гелиоцентрической системы Н. Коперника, низводившей Землю до положения одной из планет Солнечной системы, рассматривается как крупнейшее событие в истории не только астрономии, но и естествознания в целом.

Николай Коперник родился в Торуне на Висле 19 февраля 1473 г. в семье крупного купца, принадлежавшего к местной знати. Рано потеряв отца, он воспитывался у дяди, занимавшего высокие государственные посты в Вармийской епархии — самостоятельном церковном княжестве на территории западной Пруссии.

Коперник получил прекрасное образование. Три года он учился в крупнейшем в то время Ягеллонском университете в Кракове, затем в течение десяти лет совершенствовал свое образование в университетах Болоньи и Падуи. Он увлеченно занимался медициной, астрономией, математикой, философией, юридическими науками. В 1503 г. он получил диплом доктора права, обеспечивший ему место каноника Вармийской епархии. В 1505 г. Коперник вернулся на родину и с тех пор безвыездно жил и работал в Вармии до своей кончины (24 мая 1543 г.).

Движимый интуитивным убеждением в простоте природы («должно скорее следовать мудрости природы, которая как бы больше всего боится произвести что-нибудь излишнее и бесполезное»), Коперник разуверился в справедливости геоцентрической системы, сторонники которой для описания движения планет

вынуждены были делать сложные расчеты, нагромождая одни эпициклы на другие, использовать множество сфер. Вместо нее Коперник предложил простое построение, качественно хорошо объяснявшее наблюдаемые астрономические закономерности. Земля в системе Коперника, как и другие планеты, обращается по окружности вокруг Солнца, и вращается вокруг своей оси. Отказ от идеи о выделенном положении Земли во Вселенной ставил под сомнение предложенную Аристотелем картину мира, в которой все явления природы делились на небесные и земные, не сводимые друг к другу и подчинявшиеся различным законам. Преимущество гелиоцентрической системы особенно отчетливо проявилось в описании движения Луны, соответствующем астрономическим наблюдениям, в то время как на основе системы Птолемея этого соответствия так и не удалось получить. Конечно, использование представления о круговых («совершенных») орбитах планет не позволило Копернику добиться полного согласия наблюдений с теоретическими представлениями. Это было сделано позднее, когда И. Кеплер на основе анализа многолетних наблюдений Тихо Браге пришел к выводу о том, что планеты движутся по эллиптическим траекториям. Однако для прогресса науки было важно не столько повышение точности астрономических расчетов, сколько принципиально новый подход к астрономическим явлениям. Определенное стимулирующее значение для создания новой механики имела идея Коперника об относительности восприятия движения (так называемый «принцип кинематической относительности»).

Коперник дал первое изложение своей системы, не приводя degliальных доказательств, еще в 1515 г., в рукописном труде «Малый комментарий о гипотезах, относящихся к небесным движениям», с которым ознакомил своих друзей. Он целенаправленно работал над обоснованием гелиоцентрической системы, и примерно в 1530—1532 гг. закончил сочинение «О вращении небесных сфер». Однако Коперник не спешил с публикацией книги, справедливо опасаясь непонимания со стороны большинства ученых-схоластов, а также церковных преследований. И все же друзья уговорили его издать книгу. Особенно большую роль в ее издании и распространении учения Коперника сыграл Г. И. Ретик, молодой профессор математики, специально приехавший из Виттенберга к Копернику для ознакомления с его учением. Ретик в 1539 г. опубликовал в Гданьске анонимный труд, в котором изложил основы новой системы мира.

Успех книги Ретика убедил Коперника дать согласие на издание главного труда своей жизни. Книга была выпущена в Нюрнберге в год смерти ученого с предисловием математика и богослова Осияндера. Это предисловие вошло в историю как попытка подвергнуть сомнению способность науки познать истину. Последняя, по мнению Осияндера, доступна лишь божественному откровению: «Астроном прибегает к лучшей и легчайшей гипотезе. Философ, вероятно, потребует нечто более вероятное, но оба они без божественного откровения не в состоянии что-либо открывать или что-

либо нам передавать». Однако попытка Осиандера выхолостить революционную сущность учения Коперника потерпела неудачу. Оно стало манифестом нового естествознания.

О вращениях небесных сфер

Глава IX

О том, можно ли приписать
Земле несколько движений,
и о центре мира

Таким образом, поскольку ничто не препятствует подвижности Земли, то я полагаю, что нужно рассмотреть, не может ли она иметь несколько движений, так чтобы ее можно было считать одной из планет. Действительно, что она не является центром для всех вращений, обнаруживается и неравномерным видимым движением планет и переменностью их расстояний от Земли, что не может быть объяснено в предположении гомоцентрического с Землей круга. Поскольку существует несколько центров, не будет легкомысленным подумать также и о центре мира, совпадает ли последний с центром земной тяжести или нет. Что касается меня, то я полагаю, что тяготение есть не что иное, как некоторое природное стремление, сообщенное частям божественным провидением творца Вселенной, чтобы они стремились к целостности и единству, сходясь к форме шара. Вполне вероятно, что это свойство присуще также Солнцу, Луне и остальным блуждающим светилам, чтобы при его действии они продолжали пребывать в своей шарообразной форме, совершая тем не менее различные круговые движения.

Следовательно, если и Земля совершает иные движения, например около центра, то эти движения необходимо должны быть такими же, какие замечаются внешне и у других планет. Среди этих движений мы находим годичное обращение. Поэтому если мы переделаем это движение из солнечного в земное и согласимся, что Солнце неподвижно, то восходы и заходы знаков зодиака и неподвижных звезд, когда они становятся то утренними, то вечерними, покажутся нам происходящими совершенно так же. Равным образом, стояния, попятные и прямые движения планет окажутся принадлежащими не им, а происходящими от движения Земли, которое они заимствуют для своих видимых движений. Наконец, само Солнце будем считать занимающим центр мира. Во всем этом нас убеждает разумный порядок, в котором следуют друг за другом все светила, и гармония всего мира, если только мы захотим взглянуть на само дело обоими (как говорят) глазами.

Никто, как я знаю, не сомневается, что наивысшим из всего видимого является небо неподвижных звезд. Что же касается порядка планет, то древние философы пожелали его установить на основании продолжительности их обращений, полагая, что из тел, имеющих одинаковую скорость, будут казаться движущимися медленнее те, которые находятся на большем расстоянии, как это доказывается у Евклида в «Оптике». Поэтому они полагают, что Луна совершает свое круговое обращение в кратчайшее время, так как она вращается ближе всего к Земле по наименьшему кругу. Самым же высним является Сатурн, который в наибольшее время обходит длиннейший круг. Ниже его находится Юпитер. После него идет Марс. Относительно Венеры и Меркурия имеются различные мнения вследствие того, что они не могут удалиться от Солнца на любое расстояние, как приведенные выше планеты. Поэтому некоторые помещают их выше Солнца, как Тимей у Платона, а другие — ниже его, как Птолемей и большая часть позднейших астрономов. Альпетрагий делает Венеру находящейся выше Солнца, а Меркурий — ниже.

Те, кто следует мнению Платона, полагая, что все звезды и вообще темные тела блещут заимствованным от Солнца светом, считают, что если бы Меркурий и Венера находились ниже Солнца, то они вследствие небольшого от него расстояния казались бы половинчатыми и, во всяком случае, отклоняющимися от круглости. Действительно, они отражали бы полученный свет почти исключительно вверх, т. е. по направлению к Солнцу, как мы его видим у молодой Луны или на ущербе. Также говорят, что иногда, проходя перед Солнцем, эти планеты должны загораживать его и, в зависимости от своих размеров, производить затмения солнечного света; поскольку это никогда не замечается, они полагают, что эти планеты никак не могут проходить под Солнцем.

Наоборот, помещающие Венеру и Меркурий под Солнцем, берут в качестве основного довода расстояние между Солнцем и Луной. Действительно, найдено, что наибольшее расстояние от Земли до Луны составляет 64 части и одну шестую, если за одну часть принять радиус Земли, и все это расстояние почти восемнадцать раз содержится в наименьшем расстоянии до Солнца, которое составляет 1160 упомянутых частей. Следовательно, между Солнцем и Луной будет 1096 частей. Поэтому, чтобы такой обширный промежуток не оставался пустым, они на основании расстояния между апсидами¹, которое считают шириной орбит этих планет, полагают, что эти числовые промежутки будут приблизительно заполнены, если за самой высокой частью орбиты Луны будет следовать нижняя часть орбиты Меркурия, а за верхней частью последней пойдет ближайшая часть орбиты Ве-

неры, которая, в свою очередь, верхней своей апсидой будет как бы касаться нижних частей орбиты Солнца.

Итак, расстояние между апсидами Меркурия они вычисляют приблизительно в $177 \frac{1}{2}$ вышеупомянутых частей, затем оставшее расстояние заполняется промежутком для Венеры приблизительно в 910 частей. Следовательно, считают, что в светилах нет никакой темноты, подобной лунной, но что они или сияют собственным светом, или всем телом насыщены солнечным сиянием и поэтому не затмевают Солнца. Кроме того, необычайно редким событием бывает, когда эти светила станут между нами и Солнцем, ибо они значительно отклоняются по широте. Впрочем, они представляют малые тела по сравнению с Солнцем, так как даже Венера, будучи больше Меркурия, еле может закрыть сотую часть Солнца, как говорит Альбатегний Аратский, который полагает, что диаметр Солнца в десять раз больше диаметра Венеры; поэтому нелегко увидеть такое пятнышко под сильнейшим освещением. Однако Аверроэс в своем парафразе Птолемея упоминает, что он видел что-то темноватое, а после вычислений обнаружил, что происходило соединение Солнца и Меркурия. Вот как доказывают, что оба светила движутся под солнечным кругом.

Однако насколько слабы и малодостоверны эти доводы, можно видеть из того, что до Луны расстояние будет 38 земных радиусов, если следовать Птолемею, а по более истинной оценке, более 49 (как будет показано ниже). Но, как мы знаем, в таком большом промежутке не содержится ничего, кроме воздуха, или, если угодно, того, что называется огненным элементом. Помимо того, диаметр круга Венеры, двигаясь по которому она удаляется от Солнца в обе стороны приблизительно на 45° , должен быть в шесть раз больше расстояния от центра Земли до наинизшей апсиды Венеры. Так пусть же они скажут, что должно содержаться во всем этом столь большом пространстве, которое заключало бы Землю, воздух, эфир, Луну и Меркурий и, наконец, тот огромный эпицикл Венеры, если бы последняя вращалась вокруг покоящейся Земли. Наконец, насколько неубедительны рассуждения Птолемея, что Солнце должно двигаться как раз посередине между планетами, которые могут сколь угодно удаляться от Солнца, и теми, которые от него не удаляются, видно из того, что Луна, которая сама может сколь угодно далеко от него отходить, обнаруживает их ложность.

Далее, те, кто помещает под Солнце Венеру, а затем Меркурий или как-нибудь иначе разделяет их, какую могут привести причину, что эти светила не совершают самостоятельных и отличных от Солнца обращений, как другие планеты, если только относительная быстрота или медленность не обманывает относительно порядка?

Итак, необходимо, или чтобы Земля не была центром, к которому относится порядок распределения светил и их сфер, или чтобы вообще не было никакого принципа распределения и нель-

зя было видеть, почему Сатурн должен иметь более высокое место, чем Юпитер или какая-нибудь другая планета. Поэтому я полагаю, никак не следует пренебрегать тем, что написал в энциклопедии Марциан Капелла и что хорошо знали некоторые другие латинские писатели. Они полагают, что Венера и Меркурий обращаются вокруг находящегося в середине Солнца, и по этой причине думают, что эти планеты могут отойти от Солнца не дальше, чем позволяет кривизна их орбит, поэтому эти светила не обходят вокруг Земли, как другие планеты, но имеют повернутые вовнутрь апсиды. Следовательно, что же другое хотят сказать эти писатели, как не то, что центр орбит этих светил находится около Солнца. Таким образом, орбита Меркурия помещается внутри орбиты Венеры, более чем вдвое большей, и находит по величине вполне соответствующее место.

Если теперь кто-нибудь на этом основании отнесет к тому же центру и Сатурн с Юпитером и Марсом, определив только величину их орбит так, чтобы они вместе с этими планетами охватывали и окружали неподвижную Землю, то не ошибется, как показывают числовые отношения их движений. Действительно, известно, что эти планеты находятся ближе к Земле всегда около времени своих восходов вечером, т. е. когда они бывают в противостоянии с Солнцем, а всего дальше они бывают от Земли около времени своих заходов вечером, когда скрываются вблизи Солнца, и Солнце, очевидно, бывает между ними и Землей. Все это достаточно ясно показывает, что центр их скорее относится к Солнцу и будет тем же самым, вокруг которого совершают свои обращения Венера и Меркурий.

Если же они все связаны с одним центром, то необходимо, чтобы в пространстве, остающемся между выпуклостью сферы Венеры и вогнутостью Марса, находился тот же круг или гомоцентрическая с ним по обоим своим поверхностям сфера, которая вместила бы в себя Землю вместе с сопутствующей ей Луной и всем тем, что содержится под сферой Луны. Действительно, мы никак не можем отделить от Земли Луну, бесспорно самую близкую к ней, в особенности если в указанном пространстве найдем достаточно обширное и подходящее для нее место. Поэтому нам не стыдно признать, что весь подлунный мир и центр Земли движутся по Великому кругу между другими планетами, заканчивая свое обращение вокруг Солнца в один год, и что около Солнца находится центр мира. Если же Солнце остается неподвижным, то все видимое движение его должно скорее найти себе объяснение в подвижности Земли. Размеры же мира остаются столь большими, что, хотя расстояние от Земли до Солнца и имеет достаточно ощутимую величину по отношению к размерам любых планетных орбит, оно по сравнению со сферой неподвижных звезд не будет заметным. Я полагаю, что это допустить легче, чем устремлять свой ум почти в бесконечное множество сфер, а ведь это принуждены делать те, которые удерживают Землю в середине мира. Но должно скорее следовать мудрости природы,

которая как бы больше всего боится произвести что-нибудь излишнее или бесполезное, но зато часто одну вещь обогащает многими действиями.

Хотя все это и очень трудно и даже почти невозможно осмыслить, однако, вопреки мнению многих, если бог позволит, мы сделаем это яснее Солнца для людей, по крайней мере не невежд в математическом искусстве. Поэтому если сохранить указанный ранее принцип, ибо никто не приведет более удобного о том, что размеры орбит



Рис. 14

измеряются временем обращения, то порядок сфер, начиная с

наивысшей, будет следующий [рис. 14].

Первой и наивысшей из всех является сфера неподвижных звезд, содержащая самое себя и все и поэтому неподвижная. Она служит местом Вселенной, к которому относятся движения и положения всех остальных светил. Действительно, хотя некоторые полагают, что она каким-то образом движется, мы для этого явления приведем другую причину, выводимую из земного движения. Далее следует первая из планет — Сатурн, завершающий свое обращение в 30 лет, после него Юпитер, движущийся двенадцатилетним обращением, затем Марс, который делает круг в два года. Четвертое по порядку место занимает годовое вращение, и в этом пространстве, как мы сказали, содержится Земля с лунной орбитой, как бы эпициклом. На пятом месте стоит Венера, возвращающаяся на девятый месяц. Наконец, шестое место занимает Меркурий, делающий круг в восемьдесят дней. В середине всего находится Солнце. Действительно, в таком великолепнейшем храме кто бы мог поместить этот светильник в другом и лучше месте, как не в том, откуда он может одновременно все освещать. Ведь не напрасно некоторые называют Солнце светильником мира, другие — умом его, а третьи — правителем. Гермес Трисмегист называет его видимым богом, а Софоклов Электра — всевидящим. Конечно, именно так Солнце, как бы восседая на царском троне, правит обходящей вокруг него семь светил. Также и Земля не лишается обслуживания Луной, но, как говорит Аристотель в книге «О животных», Луна имеет наибольшее сродство с Землей. В то же время Земля зачинает от Солнца и беременеет каждый год.

Таким образом, в этом расположении мы находим удивитель-

ную соразмерность мира и определенную гармоничную связь между движением и величиной орбит, которую иным способом нельзя обнаружить. Здесь человеку, не ленивому в своих созерцаниях, следует обратить внимание на то, по какой причине прямое и попятное движение у Юпитера представляются большими, чем у Сатурна, и меньшими, чем у Марса, почему эти движения у Венеры больше, чем у Меркурия, и почему такая смена движений у Сатурна во время одного оборота наблюдается чаще, чем у Юпитера, а у Марса и Венеры реже, чем у Меркурия, а также почему Сатурн, Юпитер и Марс, когда они видимы в течение всей ночи, ближе к Земле, чем во время их гелиактических восходов² и заходов. Когда Марс делается видимым в течение всей ночи, он по величине представляется равным Юпитеру, отличаясь от него только красноватым цветом, в другое же время он едва находится среди звезд второй величины и распознается только в результате тщательного наблюдения следящих за ним. Все это происходит по одной причине, которая заключается в движении Земли.

А что ничего подобного не замечается у неподвижных звезд, только доказывает неизмеримую их высоту, которая заставляет исчезать из вида даже орбиту годового движения или ее отображение, так как всякому видимому предмету соответствует некоторая величина расстояния, за которой он больше уже не замечается, как показано в оптике. А именно, что между наивысшей планетой Сатурн и сферой неподвижных звезд находится еще очень большой промежуток, доказывает их мерцающий свет. Этим признаком они больше всего отличаются от планет, так как необходимо, чтобы наибольшая разница была между движимыми и недвижими. Так велико это божественное творение всеблагого и всевышнего.

Глава XI

Доказательство тройного движения Земли

Поскольку так много важных свидетельств планет согласуется с тем, что Земля подвижна, мы изложим теперь в заключение самое ее движение, насколько оно, принятое как гипотеза, объясняет видимые явления. Нужно допустить, что Земля имеет всего три движения: первое, которое, как мы сказали, греки называют *πυρρὴ κίνησις*, соответствующее дню и ночи обращение вокруг оси Земли в направлении с запада на восток, в зависимости от чего весь мир представляется движущимся в обратном направлении, описывая экваториальный круг, который некоторые называют равноденственным, подражая терминологии греков, у которых он называется *ισμὴ κίνησις*.

Второе — это годовое движение центра, который описывает вокруг Солнца зодиакальный круг также с запада на восток, т. е. в направлении последовательности знаков; этот круг идет

между Венерой и Марсом, которые, как мы сказали, прилегают к нему. Это заставляет само Солнце казаться нам проходящим зодиак подобным же движением так, что если, например, центр Земли проходит через Козерог, то Солнце кажется проходящим через Рак, из Водолея оно кажется находящимся во Льве, и так далее, как мы уже говорили. Надо считать, что в этом кругу, который расположен по средней линии знаков зодиака, и к его плоскости равноденственный круг и ось Земли имеют периодически меняющееся наклонение. Действительно, если бы они были неизменными и только просто следовали движению центра, то не было бы никакого неравенства дней и ночей, но всегда было бы или солнцестояние, или кратчайший день, или равноденствие, или лето, или зима, или какое-нибудь одно и то же одинаковое время года.

Таким образом, отсюда следует третье деклинационное движение тоже с годовым обращением, но против последовательности знаков, т. е. противоположно движению центра. Так оба эти почти равные друг другу и противоположные движения вместе делают, что ось Земли и наибольшая из ее параллелей — экваториальный круг — смотрят приблизительно в одну и ту же часть мира, как будто бы они оставались все время неподвижными. Одновременно Солнце представляется движущимся по наклонному зодиакальному кругу совершенно так же, как и центр Земли³, и как будто бы последний был центром мира, если только ты вспомнишь, что расстояние между Солнцем и Землей на сфере неподвижных звезд уже ускользает от нашего зрения.

А для доказательства, что все это обстоит именно так [это желательнее показать наглядно, чем рассказывать], опишем круг $abcd$, который представляет годовой путь центра Земли на поверхности зодиака, и пусть e будет Солнце, находящееся около его центра. Этот самый круг я рассеку на четыре части, проведя диаметры aec и bed . Пусть точку a занимает начало созвездия Рака, b — Весов, c — Козерога, d — Овна. Примем также, что центр Земли сначала находится в a . Вокруг него я начерчу земной экватор $jihg$, но только не в той же самой плоскости; в ней будет находиться лишь диаметр gai — общее сечение обоих кругов, а именно экватора и зодиака. Проведем также диаметр jah под прямым углом к gai ; пусть точка j будет пределом наибольшего отклонения к югу, a — к северу. В таких предположениях жители Земли будут видеть Солнце в центре e совершающим свой зимний солнцеворот под знаком Козерога; это будет производить обращенное к Солнцу наибольшее северное отклонение h . Таким образом, наклон экватора к линии ae заставляет ее в точном вращении описывать параллель зимнего тропика на расстоянии, соответствующем углу наклона eah .

Пусть теперь центр Земли пойдет в направлении последовательности знаков, а предел j наибольшего отклонения на такой же угол повернется против последовательности знаков, пока оба они в b не опишут по четверти окружности. В течение этого

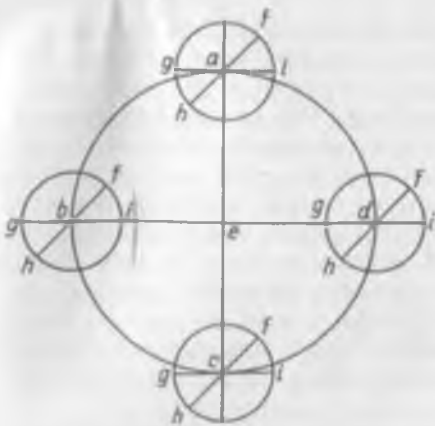


Рис. 15

время вследствие равенства обоих вращений угол eai будет всегда оставаться равным углу aeb и диаметры fah и fbi будут все время соответственно параллельны, так же как gai и gbi и как один экватор параллелен другому. Последние по уже упоминавшейся причине будут представляться на неизмеримости неба одними и теми же. Таким образом, из точки b — начала Весов — точка e будет усматриваться в Овне и общее сечение упомянутых кругов совпадает с прямой $gbie$. Суточное вращение уже не сообщит ей никакого отклонения [от экватора], но все отклонения будут получаться по сторонам. Вот так Солнце будет усматриваться в весеннем равноденствии.

Пусть в принятых условиях центр Земли продолжает движение; когда в c он пройдет полуокружность, то Солнце будет усматриваться входящим в созвездие Рака. Тогда южное отклонение f экватора, повернутое к Солнцу, сделает последнее видимым на севере и описывающим летний тропик на расстоянии, соответствующем углу наклона ecf . Затем, когда точка f повернется на третью четверть круга, общее сечение gi снова попадет на линию ed . Отсюда Солнце, наблюдаемое в Весах, окажется завершившим осеннее равноденствие. После этого в том же самом движении прямая hf , постепенно поворачиваясь к Солнцу, заставит повториться то, что было в начале, откуда исходило наше движение.

Итак же. Пусть опять на плоскости чертежа прямая aec будет диаметром и общим сечением с кругом $abcd$ [рис. 15, 16], восстановленным перпендикулярно упомянутой плоскости. На этом круге в точках a и c , т. е. под знаками Рака и Козерога, начертим соответственно круговые сечения $dgfi$ Земли через полюсы; ось Земли — dj , северный полюс — d , южный — f , диаметр экваториального круга — gi . Когда f обращается к находящемуся в e Солнцу и отклонение экватора будет к северу на угол iae , вращение вокруг земной оси заставит описать параллельный экватору южный круг с диаметром kl и расстоянием li , представляющий для Солнца тропик Козерога. Или, чтобы сказать правильнее, это движение вокруг оси по отношению к ac совершается по конической поверхности, имеющей вершину в центре Земли, а в качестве основания — круг, параллельный экватору. В противолежащем знаке c все происходит так же, но в обратную сторону. Таким образом, ясно, как эти два идущие друг к



Рис. 16

другу навстречу движения, а именно движение центра и наклона, заставляют ось Земли оставаться в одном и том же и всегда одинаковом положении, причем все кажется происходящим, как если бы это были движения Солнца. {...}

Комментарии

Перевод с латинского сочинения Н. Коперника выполнен И. Н. Веселовским. Открытки печатаются по изданию: Коперник Н. О вращениях небесных сфер. М., 1981.

Апсиды (апогей и перигей) — наиболее удаленная от Земли и наиболее близкая к ней точки эллипса, по которому движется планета вокруг своего среднего положения.

Гелиактическим называется восход светила, совпадающий с восходом Солнца.

При описании движения Земли Коперник употребляет только вращения, понимая их строго в том смысле, какой установился уже в XIX столетии; в настоящее время мы разлагаем движение Земли на два: вращение вокруг собственной оси (суточное) и обращение вокруг Солнца (годовое); последнее в смысле механики XIX в. является не вращением, а круговым поступательным движением. Коперник заменяет его двумя вращениями.

Литература

- [1] Собрание сочинений Н. Коперника: Nicolaus Copernicus complete works. London, 1972.
- [2] Nikolaus Copernicus. 1473—1973. Das Bild vom Kosmos und die Copernicanische Revolution in den gesellschaftlichen und geistigen Auseinandersetzungen. Berlin, 1973.
- [3] Веселовский И. Н., Белый Ю. А. Николай Коперник. 1473—1543. М., 1974.
- [4] Гребенников Е. А. Николай Коперник. М., 1982.



Г. Галилей

1564—1642

О движении

Первая половина XVII в. в истории науки знаменательна по нескольким причинам. В этот период были получены важные конкретные научные результаты (создан телескоп, установлен закон преломления света, определены законы движения планет и др.). В то же время активно формировалась новая методология науки. На этом фоне особенно выделяется творчество ученого, который в своей исследовательской практике вырабатывал эту методологию, а значимостью сделанных им открытий доказывал ее эффективность. Этим ученым был итальянец Г. Галилей.

Галилео Галилей родился 15 февраля 1564 г. Его детство прошло в Пизе и Флоренции — городах Великого герцогства Тосканы. Отец будущего ученого был знатным, но обедневшим флорентийским патрицием, профессиональным музыкантом и композитором, автором серьезных исследований по истории и теории музыки. Отец хотел, чтобы Галилео стал врачом, и поэтому послал его учиться в Пизанский университет. Однако Галилею не нравилась медицина. С гораздо большим увлечением читал он сочинения Евклида и Архимеда, знакомство с которыми и определило судьбу молодого Галилея. Он оставляет университет и начинает серьезно заниматься механикой. Его первые научные работы были посвящены гидростатическим весам, определению центров тяжести. Специалисты высоко оценивают работы начинающего исследователя и помогают ему получить кафедру в университете сначала Пизы, а затем Падуй.

Падуанский период, продолжавшийся 18 лет, был самым плодотворным и спокойным в жизни ученого. Хотя с университетской кафедры Галилей излагал освященные церковью идеи перипатетиков о мироздании и даже «доказывал» справедливость геоцентризма, одновременно он страстно искал и находил новые подтверждения учения Коперника. Узнав в конце 1608 г. об изобретении за границей зрительной трубы, ученый занялся разработкой прибора собственной конструкции, используя сочетания двояковыпуклой и двояковогнутой линз. В 1609 г. Галилей добил-

ся успеха. Изготовив трубу, он тотчас же направил ее в небо, и это событие стало эпохальным в истории науки. Галилей открывает горы на Луне, четыре спутника Юпитера, сложное строение Млечного Пути, темные пятна на Солнце. Эти открытия убеждают его в необоснованности противопоставления перипатетиков земного и небесного, в справедливости идеи о бесконечности Вселенной, единстве всех природных явлений, наконец, в наличии суточного и годичного вращения Земли. Свои открытия он публикует в книге «Звездный вестник» (1610).

В 1610 г. Галилей покидает пределы Венецианской республики, независимой от папского Рима, и возвращается на родину, в Тоскану. Получив почетное место придворного математика и астронома у великого герцога — своего бывшего ученика, Галилей надеется, что сумеет теперь, избавившись от преподавания, целиком посвятить себя науке.

В Тоскане ученый пишет знаменитую книгу «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой», которая выходит в свет в 1632 г. Написанное не на мертвой латыни, а на живом итальянском языке в виде бесед трех патрициев, это произведение делало любого непредубежденного читателя сторонником гелиоцентрической системы. Участниками диалога являются: Сальвиати, высказывающий в книге мысли самого автора, Симпличио (имя которого в переводе означает «простак»), сторонник учения Аристотеля, и Сагредо, выполняющий в книге функции объективного судьи, но под действием убедительных доводов Сальвиати становящийся сторонником нового учения. Отметим, что Сагредо и Сальвиати имели реальных прототипов, друзей Галилея. Диалоги ведутся в течение четырех дней. Все они нацелены на кинематическое и динамическое обоснование учения Коперника.

Хотя издание «Диалогов» было санкционировано церковными властями, вскоре после публикации книги ученый был вызван в Рим, где 12 апреля 1633 г. предстал перед генеральным комиссаром инквизиции. Под угрозой пыток больного Галилея заставили отречься от учения Коперника и покаяться. После этого ученого поместили под домашний арест на его загородную виллу в Арчетри и лишили возможности видаться и беседовать с друзьями и учениками. Лишь в последние годы жизни контроль над ним со стороны церкви немного ослаб.

Однако сломить Галилея церковь так и не смогла. В Арчетри он закончил свой последний труд «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению». В нем ученый обобщил свои открытия в области механики. Под двумя новыми науками, о которых говорится в названии книги, Галилей подразумевает динамику и сопротивление материалов. «Беседы» представляют собой естественное продолжение «Диалогов», в них те же участники, и построены они в форме бесед. Но последняя книга Галилея строже в научном отношении и выдержана в стиле луч-

ших образцов сочинений Архимеда: здесь приводятся подробные геометрические доказательства основных соотношений кинематики и динамики.

Галилей получил книгу, изданную в протестантском Лейдене, в 1638 г., но прочесть ее уже не мог: к этому времени он окончательно ослеп. Умер ученый 3 января 1642 г. Несомненно, что Галилей так и остался убежденным сторонником нового учения о строении мира. Недаром легенда приписывает ему слова, якобы произнесенные сразу после отречения: «И все-таки она вертится», — ставшие символом борьбы за научную истину.

Величие творчества Галилея состоит в том, что в исследовании природы он использовал научный метод, который В. И. Ленин определил как путь «от живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике...» (Поли. собр. соч. Т. 29. С. 152—153).

В отличие от английского философа Френсиса Бэкона, лишь теоретически провозгласившего необходимость планомерного эксперимента в познании природы, Галилей сумел практически реализовать экспериментальный метод, придав ему современные черты (создание модели реального процесса, абстрагирование от несущественных факторов, неоднократное повторение опыта и т. д.). С другой стороны, он возродил математический подход Архимеда к исследованию явлений природы, провозгласив, что «книга природы написана на языке математики, ее буквами служат треугольники, окружности и другие геометрические фигуры, без помощи которых человеку невозможно понять ее речь; без них — напрасные блуждания в темном лабиринте».

Творчество Галилея отличается удивительной глубиной проникновения в суть явлений, позволяющей считать выдающегося итальянского ученого родоначальником физической науки в современном ее понимании.

В своих произведениях Галилей касался столь широкого круга проблем, рассматриваемых теперь во всех курсах физики, что даже перечислить их здесь невозможно. Однако главная заслуга ученого — это новый подход к описанию и анализу движения. Приводимые здесь отрывки посвящены именно этой проблеме. Из них первый и второй характеризуют стиль «Диалогов», а третий, взятый из «Бесед», дает представление о математических методах, использовавшихся Галилеем, и уровне проводившихся им экспериментов.

Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой

День второй

Сальвиати. Я также хочу, чтобы вы продолжали твердо держаться того, что явления на Земле должны соответствовать явлениям на корабле; ведь если бы это оказалось несоответствующим вашей цели, вам не жаль было бы изменить мнение. Вы говорите: так как, когда корабль стоит неподвижно, камень падает к подножью мачты, а когда движется, падает далеко от подножья, то, следовательно, и наоборот, из падения камня к подножью вытекает, что корабль стоит неподвижно, а падение камня на некотором расстоянии доказывает, что корабль находится в движении; а так как то, что происходит на корабле, равным образом происходит и на Земле, то из падения камня к подножью башни вытекает с необходимостью неподвижность земного шара. Не таково ли ваше рассуждение?

Симпличио. Совершенно верно, таково оно, изложенное в простой форме, которая делает его в высшей степени удобной для усвоения.

Сальвиати. Скажите же мне, если бы камень, выпущенный с вершины мачты плывущего с большой скоростью корабля, упал в точности в то же самое место, куда он падает, когда корабль стоит неподвижно, то какую службу сослужил бы вам этот опыт с падением для решения вопроса, стоит ли судно неподвижно или же плывет?

Симпличио. Решительно никакой. Точно так же, например, по биению пульса нельзя узнать, спит ли кто или бодрствует, поскольку пульс бьется одинаково как у спящих, так и бодрствующих.

Сальвиати. Отлично. Производили ли вы когда-нибудь опыт на корабле?

Симпличио. Я его не производил, но вполне уверен, что те авторы, которые его производили, тщательно его рассмотрели. Кроме того, причины различия столь ясны, что не оставляют места для сомнения.

Сальвиати. Возможно, что эти авторы ссылались на опыт, не производя его. Вы сами являетесь тому хорошим примером, когда, не производя опыта, объявляете его достоверным и предлагаете нам на слово поверить им. Совершенно так же не только возможно, но и достоверно, что авторы поступали таким же образом, отсылая к своим предшественникам и никогда не доходя до того, кто этот опыт проделал сам, ибо всякий, кто его проделает, найдет, что опыт показывает совершенно обратное написанию, а именно, что камень всегда упадет в одно и то же место корабля, неподвижен ли тот или движется с какой угодно скоростью.

Отсюда, так как условия Земли и корабля одни и те же, следует, что из факта всегда отвесного падения камня к подножью башни нельзя сделать никакого заключения о движении или покое Земли. Камень, падающий с корабельной мачты, всегда попадает в одно и то же место, движется ли корабль или стоит на месте.

Симплицио. Если бы вы отослали меня к иным доводам, а не к опыту, то споры наши, я думаю, окончились бы не так скоро, ибо предмет этот кажется мне столь недоступным для человеческого разума, что исключается возможность что-либо утверждать или предполагать.

Сальвиати. И, однако, я считаю возможным это сделать.

Симплицио. Как же это, не проделав ни ста испытаний, ни даже одного, вы выступаете столь решительным образом? Я возвращаюсь к своему неверию и к убеждению, что опыт был произведен первоначальными авторами, которые на него ссылаются, и что он показывает то, что они утверждают.

Сальвиати. Я и без опыта уверен, что результат будет такой, как я вам говорю, так как необходимо, чтобы он последовал. Более того, я скажу, что вы и сами также знаете, что не может быть иначе, хотя притворяетесь или делаете вид, будто не знаете этого. Но я достаточно хороший ловец умов и насильно вырву у вас признание. Однако синьор Сагрето совсем умолк, хотя, мне кажется, я заметил какое-то движение, точно он хотел что-то сказать.

Сагрето. Я в самом деле хотел кое-что сказать, но любопытство, вызванное вашим заявлением, что вы вынудите синьора Симплицио открыть намеренно скрываемое от нас знание, заставило меня отложить всякое иное попечение; прошу вас осуществить обещанное.

Сальвиати. Лишь бы синьор Симплицио сообразовал отвечать на мои вопросы, а за мной дело не станет.

Симплицио. Я буду отвечать то, что знаю, и уверен, что затруднений у меня будет мало, так как о вещах, которые я считаю ложными, думается, нельзя знать ничего, поскольку наука есть наука об истинном, а не о ложном.

Сальвиати. Я не хочу ничего, кроме того, чтобы вы говорили или отвечали только то, что сами достаточно знаете. Поэтому скажите мне: если у вас имеется плоская поверхность, совершенно гладкая, как зеркало, а из вещества твердого, как сталь, не параллельная горизонту, но несколько наклонная, и если вы положите на нее совершенно круглый шар из вещества тяжелого и весьма твердого, например из бронзы, то что, думаете вы, он станет делать, будучи предоставлен самому себе? Не думаете ли вы (как я думаю), что он будет неподвижным?

Симплицио. Если эта поверхность наклонна?

Сальвиати. Да, как мы и предположили.

Симплицио. Никим образом не думаю, чтобы он остался неподвижным. Наоборот, я уверен, что он сам собою двигался бы по наклону.

Сальвиати. Вдумайтесь хорошенько в свои слова, синьор Симпличио, ибо я уверен, что он будет пребывать в неподвижности в любом месте, куда бы вы его ни поместили.

Симпличио. Если вы, синьор Сальвиати, станете пользоваться подобного рода предположениями, я перестану удивляться тому, что вы делаете совершенно ложные выводы.

Сальвиати. Значит, вы считаете совершенно достоверным, что шар будет двигаться по наклону сам собой?

Симпличио. Разве в этом можно сомневаться?

Сальвиати. И вы считаете это неоспоримым не потому, что я вам это внушил (ведь я старался убедить вас в противном), но на основании собственного суждения?

Симпличио. Теперь я понимаю вашу хитрость. Вы говорили так, чтобы испытать меня или подловить, как говорится в просторечии, а вовсе не потому, что думали так на самом деле?

Сальвиати. Именно. И как долго продолжал бы двигаться шар и с какой скоростью? Заметьте, что я говорил о шаре совершенно круглом и о плоскости совершенно гладкой, чтобы устранить все внешние и случайные препятствия. Я хочу также, чтобы вы отвлеклись от сопротивления, оказываемого воздухом своему разделению, и от всех случайных помех, какие могут встретиться.

Симпличио. Я все прекрасно понял и на ваш вопрос отвечаю так: шар продолжал бы двигаться до бесконечности, лишь бы продолжалась такая плоскость, и притом движением непрерывно ускоряющимся, ибо такова природа тяжелых движущихся тел, которые *vires acquirant eundo*¹; и чем больше будет наклон, тем больше будет и скорость.

Сальвиати. Но если бы кому-нибудь захотелось, чтобы этот же шар двигался по той же плоскости вверх, думаете ли вы, что он пошел бы таким образом?

Симпличио. Самостоятельно нет, но втащить его или с силой бросить вверх можно.

Сальвиати. А если бы он был приведен в такое движение насильственно переданным ему импульсом, каково и сколь продолжительно было бы его движение?

Симпличио. Движение шло бы, постепенно ослабевая и замедляясь, поскольку оно противоестественно, и было бы более продолжительным или более кратким в зависимости от большей или меньшей крутизны подъема.

Сальвиати. Как будто вы объяснили мне сейчас случаи движения по двум разного рода плоскостям: на наклонной плоскости движущееся тело самопроизвольно опускается, двигаясь с непрерывным ускорением, так что требуется применить силу для того, чтобы удержать его в покое. На плоскости, поднимающейся вверх, требуется сила для того, чтобы двигать тело вверх, и даже для того, чтобы удержать его в покое, причем сообщенное телу движение непрерывно убывает, так что в конце концов вовсе уничтожается. Добавим еще, что, кроме того, в том и дру-

гом случае возникает различие в зависимости от того, больше или меньше наклон или подъем плоскости, причем при большем наклоне имеет место большая скорость, и, наоборот, при поднимающейся плоскости то же тело, движимое той же самой силой, продвигается на тем большее расстояние, чем меньше высота подъема. А теперь скажите мне, что произошло бы с тем же движущимся телом на поверхности, которая не поднимается и не опускается?

Симплицио. Здесь мне нужно немного подумать над ответом. Раз там нет наклона, то не может быть естественной склонности к движению, и раз там нет подъема, не может быть противодействия движению, так что тело оказалось бы безразличным по отношению как склонности к движению, так и противодействию ему. Мне кажется, что оно должно оставаться неподвижным. (Однако я совсем забыл, что синьор Сагредо еще совсем недавно растолковал мне, что это так и должно быть.

Сальвиати. Так, думаю я, если бы шар положить неподвижно; но если придать ему импульс движения в каком-нибудь направлении, то что впоследствии было бы?

Симплицио. Воспоследовало бы его движение в этом направлении.

Сальвиати. Но какого рода было бы это движение: непрерывно ускоряющееся, как на плоскости наклонной, или постепенно замедляющееся, как на плоскости поднимающейся?

Симплицио. Я не могу открыть здесь причины для ускорения или для замедления, поскольку тут нет ни наклона, ни подъема.

Сальвиати. Так, но если здесь нет причины для замедления, то тем менее может находиться здесь причина для покоя. Поэтому сколь долго, полагаете вы, продолжалось бы движение этого тела?

Симплицио. Столь долго, сколь велика длина такой поверхности без спуска и подъема.

Сальвиати. Следовательно, если бы такое пространство было беспрельдно, движение по нему равным образом не имело бы предела, т. е. было бы постоянным?

Симплицио. Мне кажется, что так, если бы тело было из прочного материала.

Сальвиати. Это уже предполагается, поскольку было сказано, что устраняются все привходящие и внешние препятствия, а разрушаемость движущегося тела есть одно из привходящих препятствий. Скажите мне, что именно считаете вы причиной того, что этот шар движется по наклонной плоскости самостоятельно, а по плоскости поднимающейся не иначе, как насильственно?

Симплицио. То, что тяжелые тела имеют свойство естественно двигаться к центру Земли и лишь насильственно вверх к периферии, наклонная же поверхность такова, что приближает к центру, поднимающаяся удаляет.

Сальвиати. Следовательно, поверхность, которая не имела бы ни наклона, ни подъема, должна была бы во всех своих частях одинаково отстоять от центра. Но из подобных плоскостей есть ли где такие в мире?

Симпличио. Такие есть, хотя бы поверхность нашего земного шара, будь только она вполне гладкой, а не такой, какова она на самом деле, т. е. неровной и гористой. Такова, например, поверхность воды, когда она тиха и спокойна².

Сальвиати. Следовательно, корабль, движущийся по морской глади, есть одно из тех движущихся тел, которые скользят по одной из таких поверхностей без наклона и подъема и которые поэтому имеют склонность в случае устранения всех случайностей и внешних препятствий двигаться с раз полученным импульсом постоянно и равномерно?

Симпличио. Кажется, что так должно быть.

Сальвиати. И тот камень, который находится на вершине мачты, не движется ли он, переносимый кораблем по окружности круга, вокруг центра, следовательно, движением, в нем не уничтожаемым при отсутствии внешних препятствий? И это движение не столь же ли быстро, как движение корабля?

Симпличио. До сих пор все идет хорошо. Но дальше?

Сальвиати. Не выведете ли вы, наконец, сами и последнее заключение, если сами знаете вперед все посылки?

Симпличио. Вы хотите назвать последним заключением то, что этот камень благодаря движению, в него вложенному, не способен ни отставать от хода корабля, ни опережать его и должен в конце концов упасть в то самое место, куда упал бы, когда корабль стоит неподвижно. <...>

**Опыт, показывающий несостоятельность
всех опытов, приводимых против
движения Земли**

Сальвиати. <...> И здесь в качестве последнего подтверждения ничтожности всех приведенных примеров мне кажется своевременным и уместным показать способ, которым легче всего проверить их на опыте. Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля, защититесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми. Пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нем маленькими рыбками. Подвесьте наверху ведро, из которого вода будет падать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая какой-нибудь

предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же; и если вы будете прыгать сразу двумя ногами, то сделаете прыжок на одинаковое расстояние в любом направлении. Прилежно наблюдайте все это, хотя у нас не возникает никакого сомнения в том, что, пока корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так. Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно. Прыгая, вы переместитесь по полу на то же расстояние, что и раньше, и не будете делать больших прыжков в сторону кормы, чем в сторону носа, на том основании, что корабль быстро движется, хотя за то время, как вы будете в воздухе, пол под вами будет двигаться в сторону, противоположную вашему прыжку, и, бросая какую-нибудь вещь товарищу, вы не должны будете бросать ее с большей силой, когда он будет находиться на носу, а вы на корме, чем когда ваше взаимное положение будет обратным. Капли, как и ранее, будут падать в нижний сосуд, и ни одна не упадет ближе к корме, хотя, пока капля находится в воздухе, корабль пройдет много пядей. Рыбы в воде не с большим усилием будут плыть к передней, чем к задней части сосуда; настолько же проворно они бросятся к пище, положенной в какой угодно части сосуда. Наконец, бабочки и мухи по-прежнему будут летать во всех направлениях, и никогда не случится того, чтобы они собрались у стенки, обращенной к корме, как если бы устали, следуя за быстрым движением корабля, от которого они были совершенно обособлены, держась долгое время в воздухе. Если от капли зажженного ладана образуется немного дыма, то видно будет, как он восходит вверх и держится наподобие облачка, двигаясь безразлично, в одну сторону не более, чем в другую. И причина согласованности всех этих явлений заключается в том, что движение корабля обще всем находящимся на нем предметам, так же как и воздуху. <...>

Сагредо. Хотя во время плавания мне не приходило на ум намеренно производить такие наблюдения, я во всяком случае более чем уверен, что они происходят именно так, как рассказано. В подтверждение этого припоминаю, что сотни раз, сидя в своей каюте, я спрашивал себя, движется корабль или стоит неподвижно. Иногда, в задумчивости, я полагал, что корабль движется в одном направлении, тогда как движение его шло в сторону противоположную. Поэтому я теперь чувствую себя удовлетворенным и совершенно убежден в отсутствии всякой ценности всех опытов, проводимых для доказательства большей вероятности отсутствия, чем существования обращения Земли. <...>

**Беседы и математические
доказательства, касающиеся
двух новых отраслей науки,
относящихся к механике
и местному движению**

День третий

О естественно ускоренном движении

Теорема 1. Предложение 1. Время, в течение которого тело, вышедшее из состояния покоя и движущееся равномерно ускоренно, проходит некоторое расстояние, равно времени, в течение которого это же расстояние было пройдено тем же телом при равномерном движении, скорость которого равна половине наибольшей конечной скорости, достигаемой при первом равномерно ускоренном движении.

Пусть линия AB [рис. 17] представляет время, в течение которого тело, выйдя из состояния покоя в точке C , проходит при равномерно ускоренном движении расстояние CD . Отметим степени скоростей, приобретаемых телом в конце каждой отдельной частицы времени AB ; степени эти, постепенно увеличиваясь, возрастают в конце до величины EB , которую и отложим на линии, перпендикулярной AB ; соединив точки A и E , проведя линии, параллельные EB , на равных друг от друга расстояниях, отложенных на AB , мы представим таким способом возрастающие степени скорости, начиная от A . Разделим линию EB пополам в точке F и проведем линии FG и GA , параллельные AB и соответственно FB . Площадь параллелограмма $GAFB$ будет равна площади треугольника AEB , так как линия FG делит AE пополам в точке I . Если продолжить параллельные линии, заключенные в треугольнике AEB , до линии IG , то сумма параллельных сторон четырехугольника равна сумме тех же сторон треугольника AEB . В самом деле, сумма сторон треугольника IEF равна сумме сторон треугольника GIA , остающиеся же стороны, заключенные в трапеции $AIFB$, являются общими. Так как каждому отдельному времени AB соответствует и отдельная точка на линии AB , а проведенные через эти точки параллели в треугольнике AEB представляют возрастающие степени скорости, в то время как такие же параллели внутри параллелограмма представляют равную им совокупность равномерных скоростей, то ясно, что все моменты скорости ускоренного движения показаны возрастающими параллельными линиями треугольника AEB , а равномерного движения — аналогичными линиями GB параллелограмма; то, чего недостает моментам в первое время движения (т. е. моментам, представленным параллельными линиями в треугольнике AGI), возмещается моментами, показанными параллельными линиями треугольника IEF . Отсюда следует, что



Рис. 17

два тела пройдут равные расстояния в одно и то же время, если одно, выйдя из состояния покоя, будет двигаться равномерно ускоренно, а другое просто равномерно со скоростью, равной половине максимальной степени скорости, достигнутой при ускоренном движении, что и требовалось доказать.

Теорема II. Предложение II. Если тело, выйдя из состояния покоя, падает равномерно ускоренно, то расстояния, проходимые им за определенные промежутки времени, относятся между собой, как квадраты времени⁴.

Изобразим промежуток времени, начинающийся с какого-либо мгновения A , линией AB [рис. 18] и представим себе, что AD и AE — некоторые части этого промежутка времени. Пусть HI — линия, вдоль которой падающее тело, вышедшее из состояния покоя, движется равномерно ускоренно. HL — расстояние, пройденное в течение первого промежутка времени AD , и HM — расстояние, пройденное за время AE . Утверждаю, что отношение расстояния HM к расстоянию HL равно двойному отношению⁵ времени AE ко времени AD , другими словами, отношение расстояний HM , HL равно отношению квадратов AE , AD . Проведем линию AC под любым углом к AB и через точки D и E проведем параллельные линии OD и PE , при этом OD представляет максимальную степень скорости, приобретенную к мгновению D времени AD , а PE — максимальную степень скорости, приобретенную к мгновению E времени AE . Как уже было доказано выше, расстояния, пройденные в одном случае при равномерно ускоренном движении, а в другом при просто равномерном движении, происходящем со скоростью, равной половине максимальной конечной скорости, приобретенной при ускоренном движении, равны между собою. Отсюда ясно, что расстояния HM и HL имеют такую же величину, какую имели бы расстояния, пройденные при равномерном движении со скоростями, равными половинам PE и OD , в течение промежутков времени AE и AD . Следовательно, если бы можно было доказать, что линии HM и HL относятся между собой, как квадраты AE и DA , то было бы доказано и наше предложение. Но в четвертом предложении первой части было указано, что при равномерном движении расстояния находятся в составном отношении скоростей и промежутков времени⁶. В данном случае отношение скоростей равно отношению промежутков времени (ибо отношение половины PE к половине OD или PE к OD равно отношению AE к AD). Следовательно, расстояния относятся как квадраты промежутков времени, что и требовалось доказать.

Отсюда вытекает, что расстояния относятся и как квадраты максимальных конечных скоростей, т. е. PE и OD , ибо отношения PE к OD и AE к AD равны.

Следствие 1. Из вышеизложенного получаем, что если от начального мгновения движения взять равные промежутки времени AD, DE, EF, FG , в течение которых телом пройдены расстояния HL, LM, MN, NI , то последние будут относиться между собой как ряд последовательных нечетных чисел, т. е. как $1:3:5:7$. Действительно, именно такое отношение существует между разностями квадратов линий произвольной длины, постепенно увеличивающихся на длину наименьшей из этих линий (разностями между квадратами всех чисел, начиная с единицы). Таким образом, в то время, как скорость возрастает в равные промежутки времени как простой ряд последовательных чисел, расстояния, пройденные за те же промежутки времени, относятся между собой как последовательные нечетные числа.

Сагредо. Приостановите, пожалуйста, на минуту ваше чтение, так как мне хочется поделиться с вами одной мыслью, пришедшей мне в голову. Для того чтобы лучше изложить ее и сделать более ясной как для самого себя, так и для вас, я сделаю небольшой рисунок. Пусть линия AI [рис. 19] изображает промежуток времени, первым мгновением которого является A . Через A я провожу прямую линию AF под любым углом к первой, соединяю конечные точки I и F , разделяю время AI пополам в точке C и провожу через нее линию BC , параллельную FI . Рассматривая BC как максимальную степень скорости, каковы степени, начиная с мгновения A выхода тела из состояния покоя, идут, возрастая, совершенно так же, как линии, параллельные BC и проведенные в треугольнике ABC (т. е. растут в соответствии с возрастанием времени), я принимаю без дальнейших доказательств, основываясь на предшествующих рассуждениях, что пространство, пройденное телом, падающим с подобной возрастающей скоростью, равно тому пространству, которое оно пройдет, если будет двигаться в продолжение того же времени AC равномерно, и степень его скорости будет равна EC , т. е. половине BC . Пойдем теперь далее и представим себе, что тело, движущееся равномерно ускоренно, достигает точки C и обладает степенью скорости BC . Ясно, что если бы оно продолжало дальнейшее движение с той же степенью скорости BC без ускорения, то в следующий промежуток времени IC оно прошло бы расстояние, вдвое большее того, которое оно может пройти в равный промежуток времени AC , двигаясь с постоянной скоростью EC , равной половине BC . Так как, однако, тело падает со скоростью, постоянно и равномерно увеличивающейся в равные промежут-



Рис. 18



Рис. 19

ки времени, то в течение следующего промежутка времени к степени скорости его BC будут прибавляться наращенные, соответствующие параллелям треугольника BFG , равного треугольнику ABC . Таким образом, прибавив к степени скорости IG половину скорости FG — наибольшей из приобретенных при ускоренном движении и выражающихся параллелями треугольника BFG , — мы будем иметь степень скорости IN , с которой тело двигалось бы равномерно в течение промежутка времени IC . Так как IN втрое больше EC , то выходит, что расстояние, пройденное за второй промежуток времени IC , должно быть в три раза более того, которое пройдено за первый промежуток времени AC . И если мы представим себе, что к AI прибавляется следующий равный промежуток времени IO , а треугольник возрастает до APQ , то ясно, что если бы движение продолжалось в течение всего времени IO со степенью скорости IF , приобретенной при ускоренном движении за время AI , то расстояние, пройденное за время IO , было бы равно учетверенному расстоянию, пройденному в первый промежуток времени AC , так как степень скорости IF в четыре раза превышает EC . Но нарастание ускоренного движения идет в треугольнике FPQ совершенно так же, как в треугольнике ABC , и, приведенное к соответственному равномерному движению, дает приращение, равное EC . Поскольку, прибавляя RQ , равное EC , мы получаем общую скорость равномерного движения в течение времени IO , в пять раз превышающую скорость равномерного движения в течение первого периода AC . Следовательно, и пройденное пространство будет в пять раз более пройденного в течение первого промежутка времени AC . Таким образом, из этого простого вычисления мы видим, что расстояния, проходимые в равные промежутки времени телом, вышедшим из состояния покоя и движущимся со скоростями, нарастающими в соответствии со временем, относятся между собой как нечетные числа 1, 3, 5 и т. д. Если же мы сложим пройденные пути, то найдем, что в удвоенное время будет пройден путь, в четыре раза больший, и т. д. Вообще, пройденные пути будут относиться между собой как квадраты промежутков времени.

Симпличио. Простое и ясное рассуждение синьора Сагрето понравилось мне, право, много более, нежели несколько неясные для меня доказательства нашего Автора⁷. Теперь я в достаточной мере убежден, что явление должно происходить именно так, если только принять указанное определение равномерно ускоренного движения. Но действительно ли таково ускорение, которым природа пользуется при движении тяжелых падающих тел, остается для меня сомнительным. Поэтому для поучения меня и других, мне подобных, не мешало бы теперь привести несколько опытов из числа многих выполненных, которые показали бы, что различ-

ные случаи падения тел совпадают с приведенными заключениями.

Сальвиати. Вы, как подлинный ученый, предъявляете совершенно основательное требование. Оно особенно уместно в отношении таких наук, в которых для объяснения законов природы применяются математические доказательства. Таковы, например, перспектива, астрономия, механика, музыка и другие аналогичные науки. В них опыт, воспринимаемый чувствами, подтверждает принципы, являющиеся основой всех дальнейших построений. Однако мне не хотелось бы, чтобы у вас создалось впечатление, будто мы слишком подробно остановились на первом и основном положении, на котором покоится колоссальное здание бесчисленных выводов, лишь в малой доле затронутых нашим Автором в настоящем сочинении. Он сделал достаточно уже одним тем, что открыл пытливым умом запертые до сего времени двери. Что касается опытов, то Автор не упустил из виду их произвести, и чтобы убедиться в том, что ускорение естественно падающих тел происходит описанным выше образом, я много раз в обществе нашего Автора производил следующий опыт.

Вдоль узкой стороны линейки или, лучше сказать, деревянной доски длиной около двенадцати локтей, шириной пол-локтя и толщиной около трех дюймов был прорезан канал шириной немного больше одного дюйма. Канал этот был прорезан совершенно прямым и, чтобы сделать его достаточно гладким и скользким, оклеен внутри возможно ровным и полированным пергаментом; по этому каналу мы заставляли падать гладкий шарик из твердой бронзы совершенно правильной формы. Установив изготовленную таким образом доску, мы поднимали конец ее над горизонтальной плоскостью когда на один, когда на два локтя и заставляли скользить шарик по каналу, отмечая способом, о котором речь будет идти ниже, время, необходимое для пробега им всего пути. Повторяя много раз один и тот же опыт, чтобы точно определить время, мы не находили никакой разницы даже на одну десятую времени биения пульса. Точно установив это обстоятельство, мы заставляли шарик проходить лишь четвертую часть длины того же канала. Измерив время его падения, мы всегда находили самым точным образом, что оно равно всего половине того, которое наблюдалось в первом случае. Производя далее опыты при различной иной длине пути, сравнивая время прохождения всей линейки со временем прохождения половины, двух третей, трех четвертей или любых иных частей ее и повторяя опыты сотни раз, мы постоянно находили, что отношение пройденных путей равно отношению квадратов времени их прохождения при всех наклонах плоскости, т. е. канала, по которому скользил шарик. При этом мы наблюдали также, что промежутки времени пробега пути при различных наклонах относятся между собой именно так, как утверждает и доказывает далее Автор. Что касается способа измерения времени, то мы пользовались большим ведром, наполненным водой и подве-

шенным наверху. В дне ведра был проделан узкий канал, через который вода изливалась тонкой струйкой и собиралась в маленьком бокале в течение всего того времени, как шарик спускался по всему каналу или части его. Собранные таким образом количества воды каждый раз взвешивались на точнейших весах. Разность и отношение весов воды для разных случаев давали нам разность и отношение времен падения, и притом с такой точностью, что, как я уже упоминал, повторяя один опыт много и много раз, мы не могли заметить сколько-нибудь значительных отклонений. <...>

Замечание. То, что доказано в отношении падения тел в вертикальном направлении, справедливо и в отношении падения по любым наклонным плоскостям. И в этом случае скорость увеличивается по тому же закону, т. е. в соответствии с ростом времени, иными словами, как последовательный ряд целых чисел. <...>

Комментарий

Отрывки из сочинений Г. Галилея воспроизводятся по изданию: Галилей Г. Избранные сочинения. В 2 т., 1964. Переводы с итальянского «Диалогов» (т. 1) и «Бесед» (т. 2) выполнены А. И. Долговым.

¹ Приобретают силы в пути (лат).

² Следует помнить, что Галилей считал, что движением по инерции является равномерное обращение тела по окружности. Идея о прямолинейном движении по инерции была выдвинута позднее, в частности, придерживался Р. Декарт.

³ Данная теорема и ее доказательство были известны уже в XIV в.; она часто встречается в печатных трудах по физике XVI в.

⁴ Следует иметь в виду, что во времена Галилея еще не пользовались алгебраической нотацией и в соответствии с традицией, восходящей еще к античности, допустимо было рассмотрение отношений лишь «однородных» (т. е. имеющих одинаковую размерность) величин. Этим и определяются формулировки теорем, доказываемых Галилеем. По старинной терминологии, когда величины a , b , c и d были связаны соотношением $a : b = c : d$, говорили, что a находится к b «в удвоенном отношении с c и d »; если $a : b = c^2 : d^2$, то говорилось «в утроенном отношении с c и d »; если $a : b = c^3 : d^3$, то — «в половинном отношении» и т. п.

⁵ Т. е. $s_1 : s_2 = v_1 t_1 : v_2 t_2$.

⁷ Под словом «Автор» скрывается сам Галилей.

Литература

- [1] Собрание сочинений Г. Галилея: Le opere di Galileo Galilei. Vols. 1—20. Firenze, 1929—1939.
- [2] Галилей Г. Пробирных дел мастер. М., 1987.
- [3] Кузнецов Б. Г. Галилей. М., 1964.
- [4] Штекли А. Э. Галилей. М., 1972.



Р. Декарт

1596—1650

О радуге

Реальная история науки сложна и противоречива. Это проявляется и в том, что многие важные открытия на долгие годы погружаются в забвение, и в том, что в течение длительного времени господствующее положение могут занимать в корне ошибочные воззрения. Для правильного понимания хода исторического развития физики необходимо учитывать ее многообразные связи с социальной историей, с философией, с другими естественными науками. Без этого, в частности, невозможно оценить ту роль, которую сыграло в становлении науки Нового времени творчество выдающегося французского философа Р. Декарта.

Рене Декарт родился 31 марта 1596 г. в Лаэ, близ Тура, в знатной, но небогатой семье. Отец Рене считал, что детям следует дать образование, подобающее их дворянскому происхождению, поэтому отдал сына в иезуитский коллеж Ла-Флеш. Декарт закончил коллеж в 1614 г. и затем некоторое время изучал медицину и право в университете в Пуатье. В конце 1616 г. он сдает экзамен и утверждается в звании бакалавра и лиценциата права.

В отличие от многих других выдающихся мыслителей жизненные интересы Декарта определились далеко не сразу. После окончания учебы он какое-то время предавался светской жизни, а затем поступил на военную службу сначала в армию Мориса Оранского, а затем курфюрста Баварского. Именно во время службы в качестве наемника Декарт начал размышлять над проблемами, занимавшими его на протяжении всей жизни. Обострению интереса к проблемам познания способствовало и знакомство Декарта с голландцем И. Бекманом, ставшим близким другом будущего философа, в переписке с которым были впервые сформулированы многие идеи Декарта.

Почти семь лет (1619—1626) Декарт провел в скитаниях по Европе, набираясь жизненных впечатлений и размышляя над проблемами философии и математики. Обращение к математике не было случайным. Убедившись в бесполезности схоластической логики, которой его обучали в коллеже, Декарт пришел

к мысли о том, что единственный надежный путь познания — это использование строгого метода математики. Именно поэтому еще в молодости у него возникла идея создать всеобщую математику, которую он считал наукой о пространственных образах, их расположении и измерении. В математике Декарт добился больших успехов. Он решил ряд задач, касающихся алгебраических уравнений и классификации плоских кривых. Вершиной его творчества в этой области стало знаменитое сочинение «Геометрия» (1637), в котором были заложены основы аналитической геометрии. Отметим, что Декарту принадлежит и заслуга введения алгебраической символики — он предложил обозначать неизвестные буквами x , y , z , а буквенные коэффициенты — a , b , c , ..., ввел обозначения степеней и т. д.

Однако при жизни наиболее широкую известность Декарт приобрел как философ, пропагандировавший скептицизм. Он, вопреки господствовавшим в ту пору религиозным взглядам, считал человеческий разум основой познания и отводил ему главную роль в оценке результатов научных исследований. Эти взгляды Декарт развивал в сочинении «Мир», законченном в 1634 г. Оно, однако, не было издано — и неортодоксальные философские суждения, и изложение системы Коперника делали публикацию книги Декарта крайне опасной. Некоторое время ученый даже размышлял над тем, не отказаться ли ему вообще от издания каких-либо сочинений. Однако размеренная жизнь в небольших городках Голландии, вдали от суеты и жарких дискуссий, постепенно восстановила душевное равновесие Декарта, и в 1637 г. он издал сочинение «Рассуждение о методе, чтобы хорошо направлять свой разум и отыскивать истину в науках» с приложениями «Диоптрика», «Метеоры» и «Геометрия».

К этому времени у Декарта сложились основные физические воззрения. Он построил свою картину мира, основанную на предположении о том, что все пространство заполнено материей, находящейся в состоянии непрерывного движения. Все процессы в природе Декарт сводил к пространственному перемещению и рассматривал закон «сохранения движения» как один из фундаментальных законов природы. В целом материалистическая концепция Декарта была, безусловно, прогрессивной для своего времени. Он боролся за изгнание из науки всех непознаваемых сущностей, которыми ее заполняла средневековая схоластика. В то же время многие суждения Декарта, касающиеся конкретных физических явлений и закономерностей, были ошибочными. В частности, он создал фантастическую теорию тяготения, основанную на представлении о вихрях, с которой пришлось бороться теории тяготения Ньютона. Правила удара, выведенные на основе закона «сохранения движения», не соответствовали данным опыта (Декарт считал скорость сугубо положительной величиной — отсюда и происходят его ошибки). Декарт сформулировал закон преломления света, но данный им вывод этого закона, базирующийся на аналогии между движением мяча че-

рею границу раздела двух сред и распространением света, был внутренне противоречивым.

Одним из немногих правильных физических результатов, полученных Декартом, было объяснение явления радуги, привлекавшего внимание ученых-оптиков на протяжении столетий. Оно было дано в приложении «Метеоры» к сочинению «Рассуждение о методе». В исследовании радуги гармонично соединились тонкий, критический анализ явления, характерный для Декарта, экспериментальный метод, который пропагандировал ученый, и математический расчет, проведенный в обоснование качественного объяснения физического эффекта.

Уже при жизни Декарт пользовался широкой известностью и авторитетом в научных кругах. Он поддерживал контакты со многими известными учеными того времени (М. Мерсенн, П. Ферма, Б. Паскаль и др.). Знатные особы считали за честь учиться у него философии. В 1649 г. к нему обратилась шведская королева Кристина с просьбой переехать в Стокгольм и стать ее учителем. Декарт не смог отказать коронованной особе. Он покинул Голландию, ставшую его второй родиной, и переехал в холодную Швецию. Этот шаг стал роковым для Декарта, не отличавшегося крепким здоровьем. Не выдержав непривычного климата и режима работы, ученый заболел и 11 февраля 1650 г. умер.

После смерти ученого влияние его идей не только не ослабло, но и получило более широкое распространение, несмотря на то, что его сочинения были включены в «Индекс запрещенных книг» католической церкви. Вера в силу человеческого разума, пропагандировавшаяся Декартом, стала одним из символов науки Нового времени.

О радуге

Радуга — столь замечательное чудо природы, и над ее причинами, до сих пор столь мало известными, во все времена столь настойчиво задумывались пытливые умы, что мне трудно найти вопрос, на котором я лучше мог бы показать, как при помощи применяемого мною метода можно прийти к знаниям, которыми не обладали те, чьими сочинениями мы располагаем. Во-первых, когда я принял во внимание, что радуга может появляться не только на небе, но также и воздухе вблизи нас каждый раз, когда в нем находятся капли воды, освещенные солнцем, как это иногда можно видеть на опыте в фонтанах, мне было легко заключить, что она зависит от того, каким образом лучи света действуют на эти капли, а от них достигают нашего глаза. Зная, что эти капли шарообразны, и видя, что и при больших, и при малых каплях радуга появляется всегда одинаковым образом, я поставил себе целью создать очень большую каплю, чтобы иметь возможность лучше ее рассмотреть. Для этого я наполнил

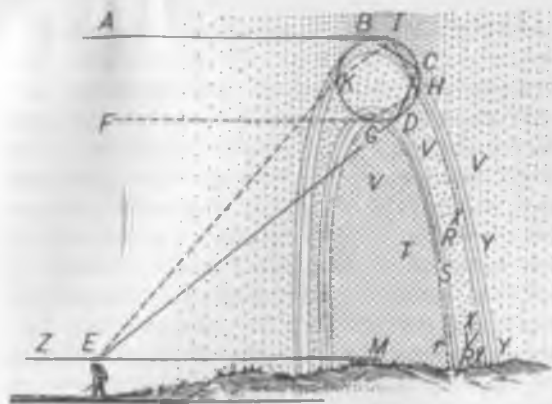


Рис. 20

водой большой стек-
лянный сосуд, впло-
не круглый и вполне
прозрачный, и при-
шел к следующему
выводу: если, на-
пример, Солнце
[рис. 20] находится
в части неба, обо-
значенной AFZ , а
мой глаз — в точке E ,
и я помещал свой
шар в BCD , его
часть D казалась
мне совершенно
красной и значитель-
но более яркой, чем

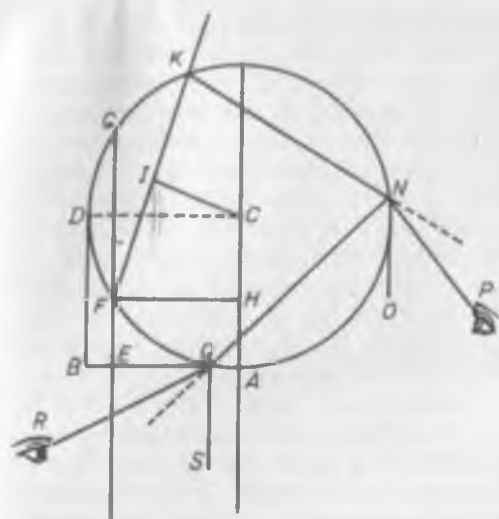
остальное. Если я приближался к сосуду или удалялся от него и помещал его вправо или влево [от себя], или даже поворачивал вокруг своей головы, эта часть казалась все такой же красной, если только линия DE составляла угол около 42° с линией EM , соединяющей центр глаза с центром Солнца. Но если я несколько увеличивал этот угол, красный цвет исчезал, если же я его немного уменьшал, то он исчезал не так внезапно, а предваритель-
но разделялся как бы на две менее яркие части, в которых мож-
но было видеть желтый цвет, голубой и другие цвета. Глядя на
то место шара, которое обозначено K , я заметил, что, когда угол
составлял около 52° , эта часть K также представлялась красной,
но менее яркой, чем D . Если я его немного увеличивал, то в ней
появлялись и другие более слабые цвета; если же я его чуть-чуть
уменьшал или сильно увеличивал, больше никакой окраски не
появлялось. Это было для меня явным доказательством того,
что если весь воздух, находящийся в M , наполнен такими шари-
ками или, на их месте, каплями воды, то в каждой из этих ка-
пель, — для которых линии, проведенные к глазу E , составят
угол около 42° с EM и которые я обозначаю R , — должна по-
явиться точка очень яркого красного цвета. Поскольку мы обо-
зрееваем эти точки все вместе, отмечая места, где они находятся
лишь углом, под которым мы их видим, они должны представить-
ся нам в виде непрерывного круга красного цвета. Точно так же
должны существовать и точки в S и T , для которых линии, про-
веденные из E , составляют с EM более острые углы и которые
образуют круги более слабой окраски; в этом и состоит первая
и главная радуга. Если угол MEX составляет 52° , то в каплях,
обозначенных X , должен появиться красный круг, а в каплях,
обозначенных Y , — круги более слабых цветов. Они вызывают
появление второй, побочной радуги. И наконец, во всех осталь-
ных каплях, обозначенных V , не появится никаких цветов. Когда
я затем рассмотрел подробнее, почему в шарике BCD часть D

представлялась красной, я нашел, что здесь дело в лучах Солнца, которые, проходя из A в B , преломлялись, входя в воду в точке B , и шли в C , откуда они отражались в D , и преломлялись вновь при выходе из воды, направляясь в E , ибо как только я помещал непрозрачное или темное тело в каком-либо участке линий AB , CD , BC или DE , этот красный цвет исчезал, а если я закрывал весь шар, кроме точек B и D , и помещал темные тела во всяких иных местах, красный цвет продолжал появляться. Затем, отыскивая причину красного цвета, возникшего в K , я нашел, что это были солнечные лучи, идущие из F в G , где они преломлялись по направлению к H , а из H отражались в I , а из I вновь отражались в K и, наконец, преломлялись в точке K и направлялись в E . Таким образом, первая радуга происходит от лучей, которые достигают глаза, после двух преломлений и одного отражения, а вторая — от других лучей, которые его достигают лишь после двух преломлений и двух отражений; поэтому она не может быть такой яркой, как первая. Но оставалась еще главная трудность, а именно — выяснить, почему при наличии многих других лучей (которые после двух преломлений и одного или двух отражений могут попасть в глаз, когда шар находится в ином положении) все же лишь те лучи, о которых я говорил, дают различные цвета. <...>

...я еще не знал, почему цвета появлялись там лишь под известными углами, пока я не взял перо и не вычислил подробно хода всех лучей, которые падают на различные точки водяной капли, чтобы узнать, под какими углами они могут попасть в наш глаз после двух преломлений и одного или двух отражений. Тогда я нашел, что после одного отражения и двух преломлений оказывается гораздо больше лучей, которые могут быть видны под углом от 41° до 42° , чем таких, которые видны под каким-либо меньшим углом, и нет ни одного, который был бы виден под большим. Я нашел также, что после двух отражений и двух преломлений имеется гораздо больше лучей, падающих в глаз под углом от 51° до 52° , чем таких, которые падали бы под каким-либо большим углом, и нет совсем таких, которые падали бы под меньшим. Вследствие этого получается тень, ограничивающая по одну и по другую сторону свет, который, пройдя через бесчисленное число дождевых капель, освещенных Солнцем, попадает в глаз под углом 42° или немного менее и дает, таким образом, первую и главную радугу. Так же получается и тень, ограничивающая свет, падающий под углом 51° или немного больше и дающий внешнюю радугу. <...>

Но чтобы те, кто знает математику, могли судить, достаточно ли правильны сделанные мною вычисления для этих лучей, мне следует их здесь пояснить.

Пусть DFA [рис. 21] — капля воды, полудиаметр которой CD или AB я делю на столько равных частей, сколько я хочу вычислить лучей, чтобы на долю одних пришлось столько же света, сколько и на долю других¹. Затем я рассматриваю один из этих



Page 24

лучей в отдельности, на пример FE , который вместо того, чтобы пройти в G , отклоняется в K , а из K отражается в N , а оттуда идет в глаз P ; или отражается еще раз из N в Q , и оттуда отклоняется к глазу R . Если провести CI под прямым углом к FK , я знаю из того, что было сказано в «Диоптрике», что AE или FH и CI находятся между собой в отношении, которым измеряется преломление воды. Если FH содержит 8000 частей таких, каких AB содержит 10 000, то CI будет содержать их пример

но 5984, ибо преломление воды немного больше, чем отношение трех к четырем, и, насколько точно я мог измерить, оно составляет 187 к 250. Имея, таким образом, две прямые FH и CI , я легко нахожу две дуги: FG , которая равна $73^{\circ}44'$, и FK , которая равна $106^{\circ}30'$. Затем, вычитая удвоенную дугу FK из суммы дуги FG и 180° , я получаю $40^{\circ}44'$ для угла ONP , ибо я предполагаю ON параллельным FE . И, отнимая эти $40^{\circ}44'$ из FK , я получаю $65^{\circ}46'$ для угла SQR , ибо я полагаю также SQ параллельным FE . Вычисляя таким же способом все другие дуги, параллельные FE , которые проходят через деления диаметра AB , я составляю следующую таблицу:

Линия FH	Линия CI	Дуга FG	Дуга FK	Угол ONP	Угол SQR
1000	748	168°30'	171°22'	5°40'	165°45'
2000	1496	165°55'	162°48'	11°19'	151°29'
3000	2244	145°4'	154°4'	17°56'	136°8'
4000	2992	132°50'	145°10'	22°30'	122°4'
5000	3740	120°	136°4'	27°52'	108°12'
6000	4488	106°16'	126°40'	32°56'	93°44'
7000	5236	91°8'	116°51'	37°26'	79°25'
8000	5984	73°44'	106°30'	40°44'	65°46'
9000	6732	51°41'	95°22'	40°57'	54°25'
10000	7480	0	83°10'	31°40'	69°30'

Легко видеть из этой таблицы, что имеется гораздо больше лучей, составляющих угол ONP приблизительно 40° , чем лучей, которые составляли бы меньший угол, или угол SQR приблизительно 54° , чем лучей, которые составляли бы больший угол. Чтобы сделать ее еще более точной, я даю:

Линия <i>FI</i>	Линия <i>CI</i>	Дуга <i>FG</i>	Дуга <i>FK</i>	Угол <i>ONP</i>	Угол <i>SQR</i>
8000	5984	73°44'	106°30'	40°44'	65°46'
8100	6058	71°48'	105°25'	40°58'	64°37'
8200	6133	69°50'	104°20'	41°10'	63°10'
8300	6208	67°48'	103°14'	41°20'	62°54'
8400	6283	65°44'	102°9'	41°26'	61°43'
8500	6358	63°34'	101°2'	41°30'	60°32'
8600	6432	61°22'	99°56'	41°30'	58°26'
8700	6507	59°4'	98°48'	41°28'	57°20'
8800	6582	56°42'	97°40'	41°22'	56°18'
8900	6657	54°16'	96°32'	41°12'	55°20'
9000	6732	51°41'	95°22'	40°57'	54°25'
9100	6806	49°0'	94°12'	40°36'	53°36'
9200	6881	46°8'	93°2'	40°4'	52°58'
9300	6956	43°8'	91°51'	39°26'	52°25'
9400	7031	39°54'	90°38'	38°38'	52°0'
9500	7106	36°24'	89°26'	37°32'	51°54'
9600	7180	32°30'	88°12'	36°6'	52°6'
9700	7255	28°8'	86°58'	34°12'	52°46'
9800	7330	22°57'	85°43'	31°31'	54°12'

и я вижу отсюда, что самый большой угол *ONP* может быть равен 41°30', а самый маленький *SQR* — 51°54'; прибавляя или отнимая приблизительно 17' для полудиаметра Солнца, имею 41°47' для наибольшего полудиаметра внутренней радуги и 51°37' для наименьшего полудиаметра внешней. <...>

Впрочем, мне не стоило труда узнать, почему красный цвет находится снаружи у внутренней радуги и почему он находится внутри внешней. Ибо та же причина, по которой красный цвет виден через призму *MNP* [рис. 22] в *F*, а не в *H*, вызывает следующее: если поместить глаз на место белого полотна *FGH* и смотреть на эту призму, мы увидим красный цвет в более толстой ее части *MP*, а синий — в *N*. Это происходит потому, что окрашенный в красное луч, идущий в *F*, исходит из *C*, т. е. части Солнца, более близкой к *MP*. И по той же причине, поскольку центр водяных капель, а стало быть более толстая их часть, находится снаружи по отношению к окрашенным точкам, образующим внутреннюю радугу, то и красный цвет должен появляться в ней снаружи. Поскольку этот центр расположен внутри по отношению к точкам, образующим внешнюю радугу, то и красный цвет также должен возникать в ней внутри. <...>

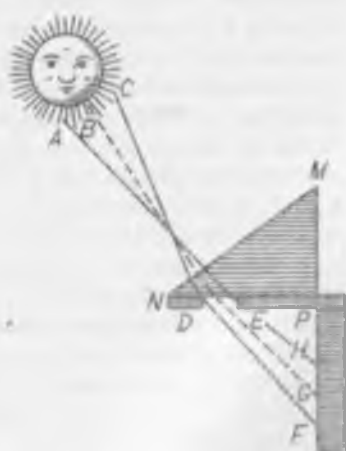


Рис. 22

Комментарий

Перевод с французского сочинения Р. Декарта выполнен Г. Г. Слюсаревым. Отрывки воспроизводятся по изданию: Декарт Р. Рассуждение о методе. М., 1953. Полное название на языке оригинала: Discours de la Methode, pour bien conduire sa raison et chercher la verité dans les sciences. Plus La Dioptrique. Les Metheores et la Geometrie qui sont des essais de cette Methode.

Первое издание этого сочинения Декарта вышло в Лейдене в 1637 г.

¹ Этот остроумный метод расчета световой энергии находит применение и в настоящее время в тех случаях, когда нельзя пользоваться аналитическим способом.

Литература

- [1] Собрание сочинений Декарта: Oeuvres de Descartes. Publ. par C. Adam, P. Tannery, T. 1—12, Paris, 1897—1913.
- [2] Scott J. F. The scientific work of René Descartes. London, 1952.
- [3] Sabra A. I. Theories of light from Descartes to Newton. London, 1967, ch. 1—4.
- [4] Матвеевская Г. П. Рене Декарт. М., 1976.



Э. Торричелли

1608—1647

Об атмосферном давлении

С позиций современной физики существование атмосферного давления не относится к числу фундаментальных фактов, лежащих в основе этой науки. Однако в ретроспективе открытие атмосферного давления является событием исключительной важности, знаменующим еще одно крупное поражение старой физики. Центральным действующим лицом в обосновании идеи об атмосферном давлении стал итальянский ученый Э. Торричелли.

Эванджелиста Торричелли родился 15 октября 1608 г. в небольшом итальянском городе Фазнца в небогатой семье. Воспитание он получил у своего дяди, бенедиктинского монаха. Во время учебы в иезуитском колледже Торричелли проявил большие математические способности и был направлен в Рим к известному математику, одному из талантливейших учеников Галилея аббату Б. Кастелли, который сделал молодого человека своим секретарем. Жизнь в Риме и общение с Кастелли и его учениками способствовали развитию таланта Торричелли. В 1641 г. он закончил свое первое научное произведение «О движении тел, опускающихся естественным путем», в котором развивались идеи Галилея. По рекомендации Кастелли Галилей пригласил Торричелли к себе для помощи в разработке неоконченных исследований. В октябре 1641 г. Торричелли переехал в Арчетри и начал работать над дополнением к «Беседам» Галилея. Однако совместная работа начинающего исследователя и маститого ученого продолжалась недолго. В январе 1642 г. Галилей умер. Торричелли, потрясенный случившимся, хотел покинуть Флоренцию, но Великий Герцог предложил ему занять пост, ранее принадлежавший Галилею, — пост «философа и первого математика Его Высочества». Торричелли принял это предложение и остался во Флоренции, где работал до своей безвременной кончины (25 октября 1647 г.). Флорентийский период оказался наиболее плодотворным в жизни ученого.

Труды Торричелли, оставшиеся по большей части неопубликованными до его смерти, касаются различных разделов матема-

тики, физики и метеорологии. В книге «Opera geometrica», получившей европейскую известность, Торричелли развил методы, предложенные другим учеником Кастелли — Б. Кавальери. В механике он впервые высказал идею о движении тел по касательной, сформулировал «принцип Торричелли», согласно которому движение системы, предоставленной самой себе, возможно лишь при понижении положения центра тяжести, рассмотрел «параболу безопасности» (границу области, недоступной для тела, брошенного под углом к горизонту с заданной скоростью) и т. д. В гидродинамику вошла «формула Торричелли» для скорости истечения жидкости из сосуда. Торричелли является одним из создателей жидкостного термометра. В оптике он достиг исключительного мастерства в изготовлении линз. Наконец, с именем Торричелли связана первая правильная в общих чертах теория образования ветров как следствия циркуляции атмосферных масс.

Соединяя в себе талант первоклассного математика и способности блестящего экспериментатора, Торричелли всей своей научной деятельностью продолжал дело Галилея по разработке основ нового естествознания, опирающегося, с одной стороны, на математику, а с другой — на эксперимент.

Наиболее известным экспериментальным исследованием Торричелли являются его опыты со ртутью, доказавшие существование атмосферного давления. По меткому замечанию В. П. Зубова, «опыты Торричелли являются, пожалуй, одним из очень ярких примеров, позволяющих показать коллективный и кумулятивный характер научных исследований: наука создается в результате совместных усилий многих людей и постепенно накапливает положительные результаты своих достижений». У этих экспериментов имеется большая предыстория. В ней можно выделить два основных направления. Первое — теоретическое — берет свое начало от Аристотеля, который утверждал, что существование пустого пространства (вакуума) невозможно вследствие присущей Природе «боязни пустоты» (*horror vacui*). Второе направление — практическое — было связано с известным мастерам водопроводчикам фактом: вода с помощью обычного насоса не может быть поднята на высоту, большую 18 флорентийских локтей ($\approx 10,5$ м). Этот факт отмечал в своих «Беседах» Галилей, который отказался от представлений перипатетиков о *horror vacui*, но приписал пустоте некую способность к сопротивлению. Отметим, что ограниченность эффективности насосов отмечалась рядом авторов (голландцем Бекманом, итальянцем Балиани) еще до публикации «Бесед» (1638). Более того, тот же Балиани в письме к Галилею в 1630 г. высказал гипотезу о существовании атмосферного давления. По некоторым причинам Галилей не принял идею Балиани (это несколько странно, поскольку Галилей первым определил вес воздуха). Неясно, до какой степени Торричелли был в курсе обсуждения вопроса о пустоте между Галилеем и Балиани, но, во всяком случае, он наверняка был

хорошо осведомлен о позиции Галилея. Поэтому нет ничего удивительного, что в 1644 г. он вместе с другим учеником Галилея В. Вивiani занялся исследованием вопроса, над которым размышлял учитель. Заслугой Торричелли является то, что он решил перейти к жидкости, обладающей большей плотностью, чем вода, — к ртути. Это позволило сделать эксперименты относительно легко воспроизводимыми. Однако не следует думать, что в середине XVII в. постановка и воспроизведение опытов Торричелли были простым делом. В те времена было довольно трудно изготовить необходимые стеклянные трубки, о чем свидетельствуют неудачи некоторых ученых в постановке аналогичных опытов независимо от Торричелли и задержка их повторения в других странах после того, как стало известно о его успехе.

О результатах своих опытов ученый сообщил в письме к своему другу Микельанджело Риччи, жившему в Риме. Хотя это письмо не было опубликовано, оно разошлось в списках по всей Европе и стимулировало появление работ других авторов (в том числе Б. Паскаля, О. Герике, Р. Бойля). Эти опыты послужили катализатором исследований, которые вышли далеко за пределы той проблемы, решению которой они были посвящены.

Торричелли — Микельанджело Риччи

Преславный синьор и ученейший мой покровитель!

(...) Я уже упоминал раньше¹, что занимался производством некоего философского эксперимента, касающегося пустоты, не для того, чтобы просто произвести пустоту, но для того, чтобы сделать прибор, который показывал бы перемены воздуха, то более тяжелого и густого, то более легкого и тонкого. Многие говорили, что пустоты не существует, другие — что она существует, но Природа испытывает к ней отвращение, и что создание такой пустоты требует усилий. Уже не помню, кто-то говорил, что она существует, не требуя усилий и без того, чтобы Природа ее образованию противилась. Я рассуждал так: если бы можно было найти совершенно явную причину, от которой происходило бы такое сопротивление, ощущаемое нами, когда хотят произвести пустоту, то, как мне кажется, тщетна была бы попытка приписать именно пустоте подобное действие, которое явно происходит от другой причины. Однако, производя некоторые весьма простые расчеты, я нашел, что причина, мною предложенная (т. е. тяжесть воздуха), сама по себе взятая, должна была бы оказывать большее противодействие, чем это имеет место тогда, когда пытаются образовать пустоту². Говорю это для того, чтобы какой-нибудь философ, видя, что нельзя избежать признания тяжести воздуха за причину противодействия, ощущаемого нами при образовании пустоты, не сказал бы, что



Рис. 23

хотя он готов допустить действие тяжести воздуха, но продолжает настаивать, что и Природа содействует в этом случае своим отвращением к пустоте.

Мы живем погруженные на дно океана воздушной стихии, о которой посредством неоспоримых опытов известно, что она имеет тяжесть, и притом такую, что наиболее густой воздух, по соседству с земной поверхностью, имеет вес, составляющий примерно $1/400$ веса воды. Авторы сочинений о «вечерних зорях» заметили³, что видимый воздух, наполненный парами, достигает высоты над нами примерно 50 или 54 миль. Тем не менее я не думаю, чтобы высота была столь большой, ибо я показал, что в таком случае пустота должна была бы оказывать гораздо большее противодействие, чем она это делает. Правда, остается выход: утверждать, что под весом, который указан Галилеем, следует понимать вес самого нижнего воздуха, в котором живут люди и животные, но что над вершинами высоких гор воздух начинает становиться совершенно чистым и имеющим гораздо меньший вес, чем $1/400$ веса воды.

Мы сделали много стеклянных сосудов, подобных тем, которые изображены здесь [рис. 23] и обозначены буквами A и B, — широкие, с шейкой длиной в два локтя. Когда они были наполнены ртутью, а затем отверстие закрыто пальцем и сосуды эти были погружены в чашку C, где находилась ртуть, можно было видеть, что они становились пустыми и ничего не поступало в опустошающийся сосуд. Однако шейка AD оставалась всегда наполненной до высоты $1\frac{1}{4}$ локтя и еще одного пальца. Дабы показать, что сосуд был совершенно пустым, нижняя чашка наполнялась водой до D, и если сосуд постепенно поднимали, можно было видеть, что, когда отверстие сосуда достигало воды, ртуть опускалась из шейки, а вода целиком наполняла сосуд со страшным напором (*con impeto horrible*) вплоть до знака E. Пока сосуд AE был пустым и ртуть, хотя и обладающая большой тяжестью, продолжала держаться в шейке AC, мы рассуждали так: до сих пор существовало мнение, будто сила, не позволяющая ртути, вопреки ее природному свойству, падать вниз, находится внутри сосуда AE, т. е. заключается либо в пустоте, либо в веществе предельно разреженном. Однако я утверждаю, что эта сила — внешняя — и что сила берется извне. На поверхность жидкости, находящейся в чашке, действуют своей тяжестью 50 миль воздуха. Что же удивительного, если ртуть, не имея ни стремления, ни отвращения находиться в стеклянном сосуде CE, проникает туда и поднимается настолько, чтобы уравновесить тяжесть наружного воздуха, который ее гонит.

Далее, вода в аналогичном, но гораздо более длинном сосуде будет подниматься почти до 18 локтей (т. е. до высоты, во столько раз большей, во сколько раз ртуть тяжелее воды).

Я подтвердил приведенное рассуждение, произведя одновременно эксперимент с сосудом *A* и трубкой *B*. Ртуть останавливалась в них на том же уровне *AB* — почти верный знак того, что сила не находилась внутри. Ведь сосуд *AE* обладал бы большей силой и разреженное и притягивающее вещество, в нем находящееся, должно было бы быть благодаря большему объему более действенным, нежели вещество в совсем маленьком пространстве *B*. <...>

Должен сказать еще, что главное мое намерение не могло осуществиться, а именно определить при помощи прибора *EC*, когда воздух бывает более густым и тяжелым и когда он более тонкий и легкий, ибо уровень *AB* меняется еще и от другой причины (чего я никак не думал), а именно — от теплоты и холода, и притом весьма ощутимо, совершенно так, как если бы сосуд *AE* был полон воздуха.

*Вашей преславной милости преданнейший
и премного обязанный слуга Э. Торричелли
Флоренция, 11 июня 1644 г.*

Комментарий

Перевод письма Э. Торричелли с итальянского выполнен В. П. Zubовым. Приводится только та его часть, в которой речь идет о барометрических опытах. Перевод печатается по публикации: Zubов В. П. Из переписки между Эванджелиста Торричелли с Микельанджело Риччи. Вопросы истории естествознания и техники. М., 1959. Вып. 8, С. 95—101.

Письмо, на которое ссылается Торричелли, не сохранилось.

Оценки Торричелли и других ученых основывались на данных о высоте атмосферы $H = 50$ миль (73 600 м) и измерениях Галилея, касающихся веса воздуха (1/400 веса воды). При оценках полагалось, что, говоря современным языком, плотность воздуха не меняется с высотой. Нетрудно показать, что рассчитываемое на основе этих предположений атмосферное давление должно составить 20 атм. О предложениях Торричелли относительно причин расхождения расчета и данных опыта см. ниже текст письма.

Здесь речь идет о ряде трактатов, в которых рассматривалось явление атмосферной рефракции.

Литература

- [1] Собрание сочинений Э. Торричелли: Torricelli E. Opera. Faenza. Vols. 1—3, 1919; vol. 4, 1944.
- [2] Кудрявцев П. С. Эванджелиста Торричелли. М., 1958.
- [3] Zubов В. П. Флорентийские опыты Торричелли — Вивани/Вестник истории мировой культуры, 1958, № 5, с. 54—66.



Б. Паскаль

1623—1662

О равновесии жидкостей

Значение многих событий в истории физики определяется не только содержанием конкретных опытов, теорий и т. п., с которыми они связаны, но и той ролью, которую эти события сыграли в развитии науки в целом. Часто тот или иной эксперимент или теоретическая работа занимают в истории физики гораздо более заметное место, чем полученные в них результаты — в системе современных физических знаний. Примером таких экспериментов являются опыты Торричелли. Они, в частности, стимулировали исследования французского ученого Б. Паскаля, установившего один из основных законов гидростатики.

Блез Паскаль родился 13 июня 1623 г. в Клермон-Ферране в семье юриста, интересовавшегося естествознанием и математикой и давшего своим детям широкое и глубокое образование.

У Паскаля очень рано проявились математические способности. Уже в 16 лет он написал оригинальное сочинение о конических сечениях, содержавшее одну из основных теорем проективной геометрии. Наиболее интенсивные математические исследования Паскаля относятся к 1640—1650 гг. Около 1642 г. он разработал арифметическую машину для автоматизации вычислений, которую не удалось построить вследствие низкого уровня развития техники. В области теории чисел он установил общий признак делимости любого целого числа на любое целое число, а также изобрел арифметический треугольник («треугольник Паскаля», 1654), с помощью которого можно находить биномиальные коэффициенты.

Следует отметить, что многие математические сочинения Паскаля не были опубликованы при жизни ученого. О полученных в них результатах современники узнавали из писем Паскаля и его друзей.

История издания других работ дает представление о характере научных контактов середины XVII в. Так, например, в июне 1658 г. Паскаль опубликовал анонимное объявление (что нередко делалось в то время) о конкурсе на решение задач, связанных

с циклоидой. На конкурсе были представлены две работы, но они не были удостоены премии. Ответом самого Паскаля стала публикация сочинения «История циклоиды», которое кроме исторических сведений содержало большой оригинальный материал. Особое значение имел предложенный ученым геометрический интегральный метод решения задач на вычисление площадей фигур, объемов и площадей поверхностей тел, нахождение их центров тяжести, длины кривых и т. д. Позднее выдающийся немецкий философ и математик Г. Лейбниц признавался, что исследования Паскаля, касающиеся циклоиды, были полезны ему при разработке интегрального и дифференциального исчисления.

В 1653 г. Паскаль познакомился с Шевалье де Мере, любителем азартных игр. Он ввел ученого в круг проблем, связанных с этими играми, из которых в конечном счете выросла целая область математики — теория вероятностей. Переписка Паскаля и Ферма на эту тему составила важную страницу истории математики.

К концу 1640 — началу 1650 гг. относится увлечение Паскаля проблемами гидро- и аэростатики. Однако его плодотворные исследования законов равновесия жидкостей были прерваны. С начала 50-х годов в связи с печальными событиями в личной жизни (смерть отца, ухудшение и без того слабого здоровья) ученый постепенно отходит от науки — его все больше волнуют религиозные и нравственные проблемы. В 1655 г. он переезжает из Парижа в Пор-Рояль, где становится членом религиозной общины янсенистов — последователей голландского теолога К. Янсения, противопоставлявшего формальную веру истинной христианской вере, которая основана на высоких этических принципах. В это время янсенисты подвергались гонениям, которые возглавляли иезуиты. Паскаль сыграл выдающуюся роль в борьбе янсенистов, опубликовав знаменитые «Письма к провинциалу» (1656—1657), в которых разоблачил казуистику и бесчестную мораль иезуитов. Последние годы жизни Паскаль провел в Пор-Рояле, где вел жизнь аскета, работая над сочинением религиозно-философского содержания. Закончить это сочинение он не успел. Сохранились лишь отдельные фрагменты, которые были изданы после смерти Паскаля под названием «Мысли». Благодаря «Мыслям» Паскаль вошел в историю французской литературы. Он оказал влияние на творчество таких писателей, как Ф. Ларошфуко, Ж. Лабрюйер, М. Лафайет. Паскаль умер 19 августа 1662 г.

Исследования Паскаля по гидростатике начались сразу же после того, как он узнал об опытах Торричелли. Сначала он повторял эти опыты, используя вместо ртути воду и вино, а также менял форму трубок (в это время Паскаль жил в Руане, славившемся своими стеклодувами). Свои эксперименты Паскаль описал в небольшом сочинении «Новые опыты, касающиеся пустоты» (1647). В нем, однако, Паскаль еще не дал объяснения полученным результатам на основе идеи о существовании атмос-

ферного давления, поскольку считал эту идею недостаточно обоснованной. По инициативе Паскаля его зять провел в сентябре 1648 г. опыт на горе Пюи-де-Дом, в ходе которого было обнаружено уменьшение атмосферного давления с ростом высоты места, где оно измеряется. Это послужило решающим доводом в пользу объяснения Торричелли.

Однако на этом исследования Паскаля не закончились. Он начал работать над большим «Трактатом о равновесии жидкостей...», который был закончен в начале 1654 г., но увидел свет лишь после смерти Паскаля, в 1663 г. Это сочинение явилось дальнейшим развитием работ С. Стевина, Г. Галилея, Э. Торричелли. В нем Паскаль отчетливо высказал мысль о давлении, существующем внутри жидкостей, и на этой основе сформулировал закон, названный его именем.

Трактат о равновесии жидкостей

Глава II

Почему жидкости имеют вес, соответствующий высоте их стояния

Из всех этих примеров видно, что тонкий столбик воды удерживает в равновесии большой груз. Остается показать, какова причина этого увеличения силы. Мы сделаем это на следующем опыте.

Новый вид машины для увеличения сил.

Если сосуд, наполненный водой и закрытый со всех сторон, имеет два отверстия, одно во сто раз больше другого, которые прикрыты точно пригнанными к ним поршнями, то один человек, надавливающий на малый поршень, уравновесит силу ста человек, надавливающих на поршень, в сто раз больший, и преодолеет силу девяносто девяти человек [рис. 24, а].

И каково бы ни было отношение этих отверстий, всегда, когда силы, приложенные к поршням, относятся друг к другу, как отверстия, силы эти будут в равновесии. Отсюда следует, что сосуд, наполненный водой, является новым принципом механики и новой машиной для увеличения сил в желаемой степени, потому что при помощи этого средства человек может поднять любую предложенную ему тяжесть.

Надо признать, что в этой новой машине проявляется тот же постоянный закон, который наблюдается и во всех прежних, как-то: рычаге, блоке, бесконечном винте и т. д., — и который заключается в том, что путь увеличивается в той же пропорции, что и сила. Ибо очевидно, что если одно из этих отверстий в сто раз больше другого, то человек, который давит на малый поршень и опускает его на дюйм, вытолкнет другой поршень лишь на одну сотую часть дюйма. В самом деле, этот толчок происходит вследствие непрерывности воды, соединяющей один поршень с другим и обуславливающей то, что один поршень не мо-

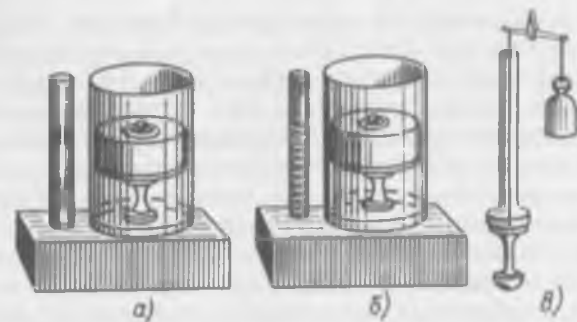


Рис. 24

жет двигаться, не толкая другого. Поэтому, когда малый поршень продвинется на один дюйм, вода, которую он вытеснит, встретит, толкая другой поршень, отверстие, во сто раз большее, и займет по высоте лишь сотую часть дюйма. Таким образом, путь относится к пути, как сила к силе. Это можно даже принять за истинную причину указанного явления, так как ясно, что совершенно безразлично, заставить ли сто фунтов воды пройти путь в один дюйм или один фунт воды — путь в сто дюймов. Если фунт воды так связан со ста фунтами ее, что сто фунтов не могут сдвинуться на один дюйм без того, чтобы не передвинуть один фунт на сто дюймов, то сто фунтов и один фунт воды необходимо должны находиться в равновесии, ибо один фунт имеет столько же силы, чтобы заставить сто фунтов сделать путь в один дюйм, сколько сто фунтов для того, чтобы заставить один фунт сделать путь в сто дюймов.

Для еще большего пояснения можно добавить, что вода под этими двумя поршнями сжата одинаково, потому что если один поршень несет груз, в сто раз больший, чем другой, то зато он касается и в сто раз большего числа частиц воды, так что каждый поршень давит одинаково. Следовательно, все частицы должны быть в покое, ибо нет никакого основания, почему бы одна должна была уступать другой. Таким образом, если сосуд, наполненный водой, имеет только одно отверстие размером, например, в один дюйм, в которое вставлен поршень, нагруженный весом в один фунт, то вес тот вследствие непрерывности и жидкого состояния воды оказывает давление вообще на все части сосуда. Чтобы определить, какое давление испытывает каждая часть, — вот правило: каждая часть размером, как и отверстие, в один дюйм подвергается такому же давлению, как если бы на нее действовал груз в один фунт (не считая веса воды, о котором я здесь не говорю, так как я имею в виду только груз на поршне), потому что именно этот вес в один фунт давит на поршень, находящийся в отверстии. Каждая часть сосуда, большая или меньшая по размеру, испытывает большее или меньшее давление, соответствующее в точности величине части сосуда, незави-

симо от того, находится ли она против отверстия, сбоку, далеко или близко, потому что непрерывность и жидкое состояние воды уравнивают и делают безразличными эти обстоятельства. Таким образом, нужно, чтобы материал, из которого сделан сосуд, имел во всех своих частях достаточное сопротивление, чтобы выдержать все эти условия. Если сопротивление какой-нибудь части будет меньше, то она лопнет; если больше, то она окажет нужное противодействие; однако излишек прочности в данном случае будет бесполезным. Точно так же, если сделать новое отверстие в этом сосуде, то, чтобы остановить воду, которая из него польется, необходима сила, равная тому сопротивлению, которое эта часть должна оказывать, т. е. сила в один фунт, если это отверстие таково же по величине, как и первое.

Вот еще одно доказательство, которое будет понятно только одним геометрам и может быть опущено другими.

Я принимаю за принцип, что никогда тело не движется под действием своего веса без того, чтобы центр тяжести его не понижался. Отсюда я вывожу, что два поршня, изображенные на рис. 24, а, находясь в равновесии.

Действительно, их общий центр тяжести лежит в точке, которая делит линию, соединяющую их частные центры тяжести, в отношении их весов. Пусть теперь эти поршни, если только это возможно, сдвинутся. При этом их пути будут относиться между собою, как мы уже показали, обратно их весам. Но если отыскать их общий центр тяжести для этого второго положения, то он окажется в том же точно месте, как и в первом случае, потому что он всегда лежит в точке, которая делит линию, соединяющую их частные центры тяжести, в отношении их весов. Таким образом, вследствие параллельности направлений их путей он всегда будет находиться на пересечении двух линий, соединяющих центры тяжести их в двух положениях. Значит, общий центр тяжести будет находиться в той же точке, как и прежде, и потому два этих поршня, рассматриваемые как одно тело, должны бы были сдвинуться без понижения их общего центра тяжести. Это, однако, противоречит принципу, и потому они сдвинуться не могут, а должны оставаться в покое, т. е. в равновесии, что и требовалось доказать.

Этим методом я доказал в небольшом Трактате по механике причину всех увеличений сил, которые имеют место во всяких других механических приборах, изобретенных до сего времени. Ибо я обнаруживаю повсюду, что неравные грузы, находящиеся в равновесии и обуславливающие выгодность применения машин, располагаются благодаря самому устройству этих последних таким образом, что общий центр тяжести грузов не может никогда понизиться, какое бы положение они ни занимали. Отсюда следует, что они должны оставаться в покое, т. е. в равновесии.

Итак, примем за несомненную истину, что если в сосуде, наполненном водой, имеются отверстия, к которым приложены силы, пропорциональные их площадям, то силы эти находятся в

равновесии. В этом состоит основание и смысл равновесия жидкостей, несколько примеров которого мы сейчас приведем.

Этот новый механический прибор позволяет понять, почему жидкости имеют вес, соответствующий высоте их стояния.

Этот механический прибор для увеличения сил, если хорошо понять его сущность, выявляет причину, по которой жидкости имеют вес, соответствующий высоте их стояния, а не ширине сосудов, во всех случаях, о которых мы говорили выше.

Так, на рис. 24, б видно, что вода в маленькой трубке уравнивает поршень, нагруженный ста фунтами. Действительно, нижний сосуд является сам по себе сосудом, наполненным водой и имеющим два отверстия. К одному из них примыкает большой поршень, а к другому — вода в трубке, являющаяся, в сущности, таким же поршнем и имеющая собственный вес, который и должен уравнивать вес другого поршня, если их веса относятся между собой, как площади соответствующих отверстий.

Так же и на рис. 24, в вода в тонкой трубке находится в равновесии с грузом в сто фунтов, потому что нижний сосуд, широкий, но небольшой по высоте, является сосудом, закрытым со всех сторон, наполненным водой и имеющим два отверстия — одно внизу, широкое, где находится поршень, и другое наверху, узкое, где помещена маленькая трубка. Вода в такой трубке является, вообще говоря, поршнем, имеющим собственный вес и уравнивающим другой вследствие пропорциональности весов и площадей отверстий, а также того обстоятельства, что, как уже указывалось выше, совершенно безразлично, расположены ли эти отверстия друг против друга или нет.

Отсюда видно, что вода в этих трубках играет ту же роль, как и медные поршни того же веса, ибо медный поршень, весящий одну унцию, будет точно так же находиться в равновесии с грузом в сто фунтов, как и маленький столбик воды, весящий одну унцию.

Таким образом, причина того явления, что небольшой груз уравнивает груз более тяжелый, которое наблюдается во всех этих примерах, лежит не в том, что тела, которые весят так мало и которые уравнивают гораздо более тяжелые, сами состоят из жидкого вещества.

Действительно, это не было непременно условием во всех опытах, потому что и там, где маленькие медные поршни уравнивали более тяжелые, оказывалось то же самое. Причина состоит в том, что вещество, которое содержится в сосудах и заполняет их от одного отверстия до другого, — жидкое, ибо именно это обстоятельство является общим для всех примеров. Это и есть истинная причина такого увеличения силы.

Точно так же если в примере на рис. 24, в вода, находящаяся в маленькой трубке, замерзнет, а вода, находящаяся в широком нижнем сосуде, остается жидкой, то понадобятся сто фунтов, чтобы удержать вес этого льда. Если же замерзнет вода, на-

ходящаяся в нижнем сосуде, то независимо от того, замерзнет ли вода в другом сосуде или останется жидкой, понадобится только одна унция, чтобы уравновесить ее.

Отсюда, кажется, становится вполне ясным, что жидкое состояние тела, простирающегося от одного отверстия до другого, является причиной увеличения сил. Это и есть основание тому, что, как мы уже говорили, сосуд, наполненный водой, представляет собой механический прибор для увеличения сил. <...>

Комментарии

Перевод с французского отрывков из трактатов Б. Паскаля выполнен А. Н. Долговым. Отрывки воспроизводятся по изданию: Начала гидростатики, М. — Л., 1933. Полное название сочинения Паскаля: «Трактат о равновесии жидкостей и весе массы воздуха, содержащие объяснение причин различных явлений природы, которые до сих пор не были достаточно известны, и в частности тех, которые приписывают боязни пустоты» (Traitez de l'équilibre des liquors et de la pesanteur de la masse de l'air. Contenant l'explication des causes de divers effects de la nature qui n'avoient point esté bien connus jusques — icy, & particulièrement de ceux que l'on avoit attribuez à l'horreur du Vuide).

Литература

- [1] Полное собрание сочинений Паскаля: Oeuvres de Blaise Pascal publiées selon l'ordre chronologique. T. 1—14. Paris, 1904—1914.
- [2] L'oeuvre scientifique de Pascal. Paris, 1964.
- [3] Кляус Е. М., Погребысский И. Б., Франкфурт У. И. Паскаль. М., 1971.
- [4] Тарасов Б. Паскаль. М., 1979.



О. Герике

1602—1686

Опыты с пустотой

Дискуссия относительно существования пустого пространства, развернувшаяся в середине XVII в., имела своим следствием не только опровержение представлений перипатетиков о «боязни пустоты», присущей природе, но также и изобретение ряда физических приборов, ставших впоследствии важнейшими инструментами физиков-экспериментаторов. Среди этих приборов особое место занимает воздушный насос, в усовершенствованном виде широко используемый и в наши дни. Изобретателем первого насоса является немецкий естествоиспытатель О. Герике.

Отто Герике родился 20 ноября 1602 г. в Магдебурге в обеспеченной семье. Он получил хорошее образование: с 1617 по 1626 г. Герике учился праву в университетах Лейпцига, Гельмштедта и Йены, а затем слушал лекции по математике и инженерному делу в Лейпциге, после чего совершил длительное путешествие по Франции и Англии. По возвращении на родину он был избран членом городского совета и много сил отдавал строительству и укреплению Магдебурга. В 1631 г. в ходе Тридцатилетней войны (1618—1648) Магдебург был разрушен, и Герике пришлось покинуть город. В течение десяти лет он выполнял обязанности инженера сначала в Эрфурте, находясь на службе у шведского короля, а затем в Саксонии. В эти же годы он занимался дипломатической деятельностью, которая во многом способствовала возрождению Магдебурга и заключению выгодного для города соглашения о его послевоенном статусе. За заслуги перед Магдебургом в 1646 г. Герике был избран его бургомистром. Он занимал этот пост в течение 30 лет. В 1666 г. Герике был возведен в дворянское достоинство. В 1681 г. он переехал из Магдебурга в Гамбург, где и провел последние годы жизни. Умер Герике 11 мая 1686 г.

Несмотря на большую занятость государственными и дипломатическими обязанностями, Герике на протяжении всей жизни интересовался вопросами естествознания. Его частые поездки по делам службы способствовали получению информации о работах

других ученых и распространению сведений о его собственных опытах.

Особенно остро со студенческих времен Герики волновала проблема пространства. Одним из аспектов этой проблемы был вопрос о существовании пустого пространства. Размышляя над ним, Герики решил проверить на опыте теорию Декарта, согласно которой все пространство заполнено материей. Так возникла идея его первых экспериментов по получению «пустоты», которые в конечном счете привели к созданию насоса. Используя насос, он поставил множество оригинальных опытов, доказав, в частности, что птицы и животные в безвоздушном пространстве гибнут, что колокольчик, помещенный в откачанный сосуд, перестает звенеть, что воздух занимает весь предоставленный ему объем, и т. д. Особенностью экспериментов Герики была их наглядность и убедительность, что с особой силой проявилось в истории с «магдебургскими полушариями».

Опыты Герики были многочисленны и разнообразны. Он, например, сконструировал и построил водяной барометр, с помощью которого с 1660 г. вел метеорологические наблюдения. Герики был создателем первой электростатической машины. Она представляла собой шар из серы, насаженный на горизонтальную ось, при касании которого рукой во время его вращения можно было добиться гораздо большей электризации, чем традиционным методом натирания кусочка янтаря.

Следует отметить, что Герики рассматривал свои пневматические и электрические опыты не как отдельные любопытные наблюдения, а в рамках общих представлений о системе мира. Эти представления были для XVII в. весьма смелыми. Будучи убежденным сторонником учения Коперника, Герики стремился обосновать гипотезу о множественности обитаемых миров и считал, что свойства пустого пространства независимы от божественного промысла.

Из-за большой занятости Герики не смог сам описать свои опыты. Это сделал (с его согласия) профессор математики Вюрцбургской академии иезуит К. Шотт в нескольких книгах, опубликованных в 1657—1664 гг. Именно в описании Шотта опыты Герики стали известны другим ученым и, в частности, побудили Бойля поставить опыты по исследованию свойств газов. В 1663 г. Герики подготовил свое описание экспериментов, как уже известных по книгам Шотта, так и новых. Однако его книга «Новые, так называемые магдебургские, опыты о пустом пространстве» увидела свет лишь в 1672 г. Этот труд стал одним из символов экспериментальной науки Нового времени.

Новые, так называемые магдебургские, опыты...

Глава II

Первый опыт создания пустоты путем извлечения воды

Когда я размышлял о беспредельности пространства и о том, что оно должно быть всюду, я придумал следующий опыт.

Винная или пивная бочка наполнена водой и со всех сторон прочно закупорена, так чтобы в нее не мог проникнуть наружный воздух. К нижней части бочки прикреплена металлическая трубка, с помощью которой можно извлекать воду. Тогда вода вследствие собственной тяжести должна опускаться и оставлять над собой в бочке пространство, свободное от воздуха и вследствие этого от всякого другого вещества.

Чтобы продемонстрировать справедливость этих соображений, я приготовил латунную трубу *abc* [рис. 25], которая используется при пожарах, со штоком *c* или *f*, тщательно обработанным поршнем *g* [так чтобы воздух не находил места по бокам для выхода или входа]. К трубе были прикреплены два кожаных клапана, из которых внутренний *a* или *d* на крышке трубы должен был способствовать поступлению воды, а внешний *b* — ее стоку. После установки трубы [посредством железных колец, снабженных четырьмя ушками *e*] в нижней части бочки я попытался извлечь из нее воду. Однако прежде чем вода последовала за поршнем, лопнули железные обручи и болты, с помощью которых труба была прикреплена к бочке.

Тем не менее усилия вовсе не были безнадежными. После того как недостатки установки были устранены посредством использования более прочных болтов, трое сильных мужчин, тянувших за шток, смогли наконец извлечь через верхний клапан следующую за поршнем воду.

Воздух проникает через дерево.

При этом, однако, во всех частях бочки слышался шум, как будто вода сильно кипела, и это продолжалось до тех пор, пока бочка вместо извлеченной воды не заполнилась воздухом.

Этот недостаток нужно было как-то исправить. Для этого была приобретена меньшая бочка, которую поместили внутри большей. Теперь, после того как трубка с более длинным заостренным концом была пропущена через стенки обеих бочек, я смог наполнить эту меньшую бочку водой, уплотнить отверстие, затем наполнить водой и большую бочку и начать работу заново. На этот раз уже удалось извлечь воду из меньшей бочки, и на месте воды, без сомнения, осталось пустое пространство.

Вода проникает через дерево.

Однако после того как через несколько дней работа была прекращена и все вокруг было спокойно, из бочки стал слышаться меняющийся время от времени звук, похожий на тихое ще-



Рис. 25

бетание певчих птиц. Это продолжалось почти три полных дня.

Когда же после этого открыли отверстие меньшей бочки, то оказалось, что ее большая часть заполнена воздухом и водой. Тем не менее часть ее все же была пустой, поскольку немного воздуха проникло в бочку во время ее вскрытия.

Вследствие трения воды возникает немного воздуха.

Все были удивлены тем, как вода попала в бочку, которая была со всех сторон так тщательно зашпаклевана и закупорена. Наконец, на основе многократно повторенных опытов я сделал вывод, что вода, находящаяся под большим давлением, просачивается через дерево и что из-за сжатия и возникающего при просачивании через дерево трения из воды в бочке всегда одновременно выходит немного воздуха [что впоследствии, вероятно, также следует учитывать]. Бочка, однако, не может быть полностью заполнена воздухом вследствие сопротивления, которое дерево оказывает [его] прохождению. При снятии давления прекращается также и просачивание воздуха и воды. Следовательно, в опыте была получена как бы наполовину откачанная бочка. (...)

Глава IV

Устройство специальной машины, предназначенной для создания пустоты

Поскольку воздух исключительно тонкое тело, он невероятно быстро проходит через все отверстия и заполняет промежутки, какими бы малыми они ни были, и всегда некоторое количество воздуха незаметно проходит как мимо краев поршней, так и че-

клапаны. Поскольку невозможно установить поршень или вентиль настолько тщательно, чтобы они препятствовали любому проникновению воздуха, я построил несколько машин [так, я изготовил приспособление, с помощью которого можно было окружить воздушный насос как сверху, так и снизу водой], впервые описанных преподобным патером Каспаром Шоттом в его книге «Гидравлико-пневматическое искусство», а затем в первой книге его «Удивительной техники» и названных «магдебургскими диковинами».

Поскольку эти машины было сложно перевозить, а мой всемилостивый и могущественный господин, курфюрст Бранденбургский, мой благосклонный повелитель, пожелал увидеть эти эксперименты [которые вышеупомянутый патер Шотт назвал магдебургскими], я изготовил описываемое ниже устройство.

1. Была выкована железная тренога *abcdf* [рис. 26, *a*], высотой примерно в 2 локтя, опоры которой наверху прикрепляются к железному кольцу *bc* [рис. 26, *a*, *b*], а внизу с помощью железных болтов *afd* [рис. 26, *a*] — к полу.

2. В качестве воздушного насоса *gh* [рис. 26, *a*, *в*] следует взять латунную пожарную трубу так, как мы это описали в гл. II, а именно со свинцовым кольцом *y* наверху.

3. На этой верхней части *y* следует расположить латунную крышку *mn* [рис. 26, *a*], снабженную трубкой *n* [в которую с помощью кранов могут быть вставлены подлежащие полной откачке сосуды], укрепленную тремя болтами. Предварительно между ними следует поместить кожаное кольцо.

4. В середине с внутренней или внешней стороны эту крышку необходимо снабдить кожаным клапаном, так что поршень *h* со штоком *f* при опускании может вытягивать воздух или воду из откачиваемого сосуда в насос *gh*, а при подъеме — выводить их наружу через клапан *z* [рис. 26, *z*].

5. К изготовленному из свинца ранту воздушного насоса следует прикрепить медный сосуд *xx* [рис. 26, *a*], предназначенный для наполнения водой.

6. Насос *ygh* [рис. 26, *b*] вместе с прикрепленным к нему сосудом ставится на треногу, причем продевается через отверстие *e* кольца *bc* [рис. 26, *b*], и затем прикрепляется к ее свинцовому ранту тремя железными болтами.

7. Чтобы нижний конец насоса не двигался, там устанавливается железное кольцо *kk* [рис. 26, *a*], которое с помощью таких же болтов крепится к трем ланкам *ooo*, стягивающим треногу.

8. К одной из ног треноги в точке *w* приделан железный рычаг *awh* [рис. 26, *a*], который можно поднимать и опускать вокруг штифта *w*.

9. С рычагом соединяется железный стержень *wt*, который, в свою очередь, в точке *t* связан с деревянным штоком *fh* [рис. 26, *в*]. Шток снабжен массивным поршнем *h* так, что с помощью этих деталей может быть приведен в действие.

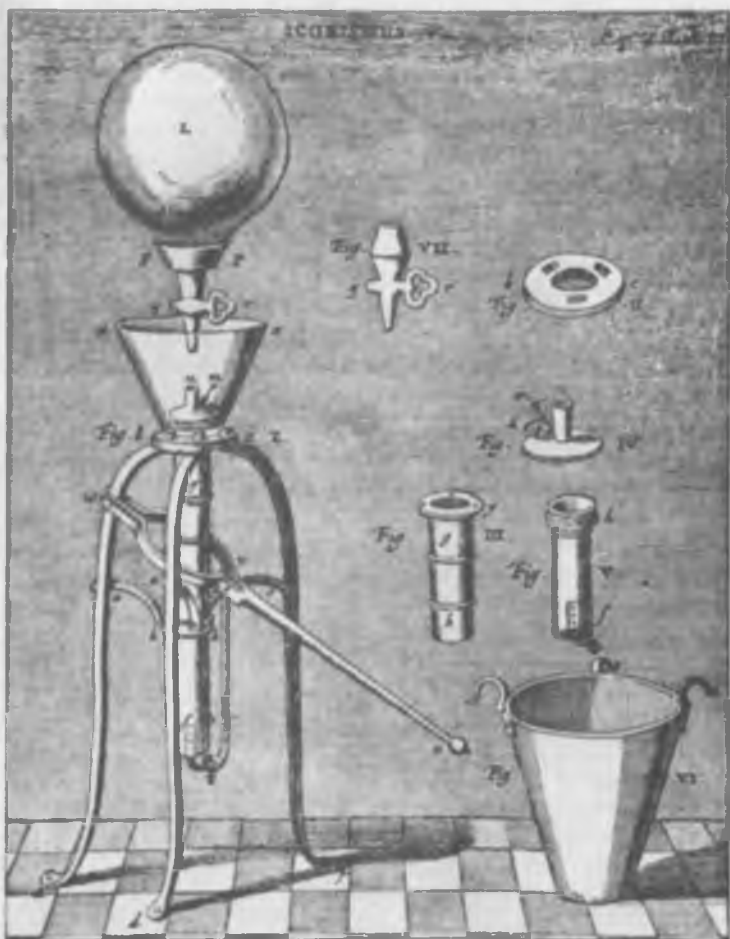


Рис. 26

10. Чтобы при этом снизу и сбоку от поршня в насос не про-
никнул воздух, следует изготовить продолговатый медный сосуд,
похожий на котелок [рис. 26, e], который тремя крючками ве-
шается на лапки *ooo* и заполняется водой. Таким образом, ниж-
нее отверстие воздушного насоса внутри *kk*, как и плунжер, и
все другие детали с помощью воды могут быть постоянно уплот-
нены, так что ни сверху, ни снизу не может проходить воздух.

11. Каждое извлечение воздуха, однако, происходит, как пра-
вило, вследствие силы его упругости или расширения, так что
при движении поршня воздух всегда выходит из откачиваемого
сосуда в пустой насос, из которого он постепенно выталкивается.
То незначительное количество воздуха, которое остается в отка-
чиваемом сосуде, уже не обладает упругостью, достаточной для
того, чтобы открыть кожаный клапан [который в большинстве

случаев снабжен металлической пружиной, чтобы клапан всегда был хорошо закрыт].

Как с помощью специальной трубки могут быть окончательно удалены остатки воздуха.

На крышке *zml* насоса между клапаном *z* и трубкой *h* можно прикреплять трубочку, снабженную поршнем и штоком с выступом, и с ее помощью открывать и закрывать внутренний клапан. Вследствие этого удается извлекать оставшиеся в сосуде следы воздуха и в конце концов без труда можно достичь веса, свойственного им в насосе. Это устройство, однако, является избыточным, и здесь о нем достаточно лишь упомянуть для любознательных.

Если поршень поднят, то внутри насоса создается пустота.

Из описания этой машины отчетливо следует, что с ее помощью создается пустота, и те трудности, которые обычно считались непреодолимыми, могут быть разрешены. А именно, если рычаг *wai* поднят, то поршень *fh* касается крышки *ml* и насос освобожден от поршня: если поршень опустить, то внутри насоса возникает пустота. В него проникает воздух из сосуда, вследствие чего сосуд становится в конце концов пустым. <...>

Глава XXIII

Опыт, посредством которого показывается,
что вследствие давления воздуха два полушария
могут быть так прочно соединены,
что их не могут оторвать
друг от друга шестнадцать лошадей

Я велел изготовить два полушария, или чаши, из меди диаметром около $3/4$ или точно $67/100$ магдебургского локтя [поскольку обычно изготавливаемые вручную сосуды делаются не столь точно, как желательно]. Они хорошо подходят друг к другу и при том одно было снабжено краном, или, скорее, клапаном *H*, с помощью которого извлекается находящийся внутри воздух, а доступ воздуха снаружи может быть предотвращен. <...> Кроме того, чаши следует снабдить железными кольцами *NNNN*, чтобы цеплять к ним лошадей, что видно из рисунка. Далее, я велел сшить кольцо *D* из кожи, пропитанной воском [смешанным со скипидаром], так чтобы оно совершенно не пропускало воздух.

После того как это кольцо было проложено между чашами, я прижал их друг к другу и быстро выкачал из них воздух. <...> Я убедился, с какой силой были соединены чаши, между которыми находилось такое кольцо. Сжатые давлением окружающего воздуха, они соединялись так прочно, что шестнадцать лошадей либо совсем не могли их разорвать, либо могли это сделать с большим усилием. Когда же, наконец, благодаря напряжению всех сил чаши удалось разъединить, то возник шум, похожий на звук ружейного выстрела.



Рис. 27

После пропускания воздуха чаши могут быть легко разделены.

Однако как только мы, открывая кран *H*, предоставим доступ воздуху, чаши могут быть разделены или оторваны друг от друга вручную. Чтобы знать точно, насколько велик вес, столь сильно сдвигающий полушария, необходимо определить вес воздушных цилиндров, диаметр которых составляет 67/100 магдебургского локтя. Мы выбрали здесь именно этот пример с той целью, чтобы по возможности облегчить понимание опыта.

Давление, которое соединяет чаши.

Вес этих цилиндров оказывается равным 2686 или 2687 фунтам, откуда следует, что давление воздуха прижимает одну из чаш к другой с силой 2686 фунтов. Другая оказывает равное противодействие. Поэтому восемь лошадей с одной стороны должны создать силу тяги 2686 фунтов для отрыва чаши, точно так же как восемь лошадей с другой стороны с той же силой тяги 2686 фунтов должны удалить вторую чашу.

Хотя восемь лошадей и могут без особого труда сдвинуть с места телегу, нагруженную 2686 фунтами, все-таки в данном случае использование тяги затруднено, поскольку сила лошадей направлена против всего столба воздуха и, так сказать, в большей степени против природы, чем при перемещении груза с помощью телеги.

Как они могут быть оторваны друг от друга с помощью груза.

Отсюда следует, что когда чаши подвешены и на нижнем конце закреплен груз 2686 фунтов, то нижняя чаша может быть оттянута и оторвана от верхней посредством этого веса [рис. 28]. Следует лишь отметить [так как давление воздуха становится то больше, то меньше], что этот вес также изменяется в соответствии с состоянием воздуха. Следовательно, этот вес



Рис. 28

представляет [конечно, сообразно размерам или, вернее сказать, основанию соответствующих цилиндров] полную массу небес.

Что следует понимать под массой небес?

Когда кто-либо пожелает узнать последнее, т. е. вес общей массы воздуха вокруг Земли, то он должен искать его, сначала вычисляя площадь Земли в квадратных милях, затем перевести ее в квадратные локти и далее действовать в соответствии с золотым правилом, как это было разъяснено в предыдущей главе. Так определяется искомый вес.

Земля вместе с воздухом образует особое космическое тело.

В результате следует вывод, что Земля [поскольку окружающий воздух обладает своим собственным весом] есть особенное и само по себе существующее мировое тело, которое сохраняется свободным и не погружено в некую небесную материю или окружено ею.

Комментарии

Перевод с немецкого отрывков из книги О. Герике выполнен Б. В. Булюбашем и С. Р. Филоновичем по изданию: Otto von Guericke's Neue «Magdeburgische» Versuche über den leeren Raum. Leipzig, 1894. Полное название книги Герике впервые изданной в 1672 г. на латинском языке в Амстердаме таково: «Новые, так называемые магдебургские, опыты о пустом пространстве, впервые изданные преосвященным отцом Каспаром Шоттом, членом Общества Иисуса и профессором математики Вюрцбургской Академии; теперь же самим авто-

ром более совершенно изданные и увеличенные другими различными экспериментами, с добавлением надежных сведений о весе воздуха, окружающего Землю; о мировых силах и системе планетного мира, а также о неподвижных звездах и том неизмеримом пространстве, которое как внутри, так и ввне их находится».

¹ Об этом идет речь в гл. I книги.

² Об упругости воздуха Герике подробно говорит в гл. XXXIII.

Вот как описывает сам Герике события, связанные с этим знаменитым опытом, в предисловии к книге: «Потом, когда я был послан по государственным делам на Имперский сейм, проведенный в 1654 г. в Регенсбурге, некоторые любители этих вопросов узнали об упомянутых опытах с пустотой и стали настоятельно от меня требовать, чтобы я показал им некоторые из них, что я и попытался, в меру своих возможностей, сделать.

К концу сейма, когда его участники уже начали разъезжаться, случилось так, что мои опыты стали известны Его Императорскому Величеству, курфюрстам и некоторым князьям, которые пожелали посмотреть их до отъезда; отказать этому желанию я не мог, да и не считал должным.

Больше всего они понравились Высочайшему Курфюрсту Иоганну-Филиппу, архиепископу Майнцскому и епископу Вюрцбургскому, и он настоятельно просил меня сделать подобные инструменты. Но так как трудности того времени не позволили мастерам сделать такие же инструменты, он просил меня уступить ему привезенные мною в Регенсбург машины после уплаты их стоимости и даже позаботился, чтобы они были перевезены в Вюрцбургский замок». Отметим, что «машины» Герике сохранились до наших дней.

Литература

- [1] Современное издание сочинения Герике на немецком языке с добавлением его переписки: Otto von Guericke's Neue (sogenannte) Magdeburger Versuche über den leeren Raum, nebst Briefen, Urkunden und anderen Zeugnissen seiner Lebens- und Shaffensgeschichte. Hrg. von H. Schimank. Düsseldorf, 1968.
- [2] Kaufeld A. Otto von Guericke. Leipzig, 1980.
- [3] Калица С. П. Отто фон Герике — выдающийся физик XVII в. // Природа. 1973. № 3. С. 80—85.
- [4] Овчинников Н. Ф. О натурфилософском и опытным знаниям. По поводу магдебургских опытов О. Герике // Природа. 1973. № 3. С. 85—87.



Р. Бойль

1627—1691

О законе сжатия и расширения газов

Установление законов, которым подчиняются достаточно разреженные газы, сыграло важную роль в становлении атомно-молекулярного учения. Достаточно напомнить, к каким значительным последствиям привела разработка теории идеального газа, в своей основе опирающейся на эксперименты с разреженными газами. История газовых законов охватывает значительный исторический период: закон Бойля — Мариотта был опубликован в 1662 г., закон Шарля — в 1787 г., а закон Гей-Люссака — в 1802 г. За эти почти полтора столетия в физике произошли очень серьезные изменения. Поэтому мотивы постановки опытов, приведших к открытию каждого из законов, экспериментальные средства и методики их проведения очень сильно различаются. Для истории физики особый интерес представляет исследование изотермического расширения и сжатия газа, поскольку соответствующие эксперименты явились первыми количественными опытами в этой области. Историческая традиция связывает установление закона $pV = \text{const}$ ($T = \text{const}$) с именем выдающегося английского естествоиспытателя Р. Бойля.

Роберт Бойль родился 25 января 1627 г. в Лисморе (Ирландия). Он был последним, четырнадцатым, ребенком в семье Ричарда Бойля, принадлежавшей к высшим кругам английской аристократии. Бойль сначала воспитывался дома, затем был отдан на несколько лет в Итон — привилегированную школу для детей знати — и, наконец, в возрасте 12 лет вместе со старшим братом был отправлен для завершения образования в страны континентальной Европы. Учился Бойль в основном в Швейцарии, но путешествовал и по другим странам. В Италии, например, он ознакомился с трудами Галилея, которые произвели на него глубокое впечатление.

Во время пребывания Бойля за границей скончался его отец, и когда молодой человек вернулся на родину, он оказался богатым наследником и мог распоряжаться своей судьбой по собственному усмотрению. Юноша был чужд светских удовольствий. Он интересовался астрономией, медициной, сельским хозяйством, затем увлекся химией. Находясь под влиянием идей Ф. Бэкона и

Р. Декарта, Бойль быстро вошел в круг английских любителей естествознания («невидимый колледж»), многие из которых впоследствии (1660) стали основателями Лондонского королевского общества — английской академии наук.

В 1656 г. в связи с обострением внутрисполитической обстановки в Англии Бойль переехал в Оксфорд. Там он оборудовал прекрасную лабораторию, где с помощью специально приглашенных ассистентов проводил многочисленные опыты. Одним из ассистентов Бойля был Р. Гук, ставший впоследствии известным ученым. Именно Гук по заданию Бойля разработал усовершенствованный воздушный насос, имевший перед насосом О. Герике важное преимущество: в откачиваемый объем можно было помещать различные предметы, что значительно расширяло круг возможных экспериментов. Кроме того, этим насосом мог пользоваться один человек, даже не обладающий особой физической силой. Проведенные опыты Бойль описал в книге «Новые физико-механические опыты, касающиеся упругости воздуха и его воздействий» (1660). В ней были приведены доказательства веса воздуха, описан опыт, демонстрировавший эффект давления газа: при откачке части воздуха из-под колокола насоса раздувался закупоренный бараний мочевого пузыря, из которого предварительно была выпущена часть воздуха. Одним из важнейших экспериментов Бойля было повторение опыта Торричелли в сосуде, откуда постепенно откачивался воздух: при этом столбик ртути в барометрической трубке опускался. Такой эффект свидетельствовал, что именно действие воздуха заставляет ртуть удерживаться на определенной высоте.

Пневматическим опытам Бойль посвятил несколько лет жизни, однако ими его научные интересы не ограничивались. Вскоре после выхода в свет книги об упругости воздуха ученый публикует сочинение «Химик-скептик», занимающее выдающееся место в истории химии. В этой книге Бойль формулирует задачи химии, ставит изучение химических явлений на истинно научную основу. Особое значение имело придание нового смысла понятию «химический элемент», которое близко к современному. Отметим также, что идеи Бойля в области химии базировались на атомно-молекулярных представлениях (хотя и упрощенных, а иногда и неверных).

Перу Бойля принадлежит множество других работ по химии и физике, в частности сочинение «Опыты и размышления, касающиеся цветов» (1664), в котором описаны первые наблюдения цветов тонких пленок. Много внимания ученый уделял философским и методологическим вопросам, последовательно выступая против отживших учений перипатетиков и схоластов.

Авторитет Бойля в научных кругах был очень велик. О его исследованиях с восхищением отзывались многие крупные ученые второй половины XVII в. Многих современников привлекала в Бойле естественность и скромность. Двери лондонского дома сестры Бойля, в котором ученый проживал с 1668 г., были всегда

открыты для любителей науки, желавших обсудить ее актуальные проблемы. Когда же Бойлю предложили занять пост президента Лондонского королевского общества, он отказался от этой чести — для него главным были научные исследования. Научная активность Бойля сохранялась практически до самой смерти ученого, последовавшей 30 декабря 1691 г.

Исследования Бойля в области пневматики получили широкую известность практически сразу после выхода в свет его «Новых физико-механических опытов...». Однако книга вызвала не только одобрительные отзывы, но и резкую критику со стороны известного философа Т. Гоббса, а также ученого-иезуита Ф. Линуса. Реакция Гоббса и Линуса вынудила Бойля подготовить второе издание книги (1662), дополненное возражениями на доводы оппонентов. Кроме того, в книгу были включены описания количественных экспериментов, ставших обоснованием закона Бойля.

Поскольку пневматические опыты в конце 50-х — начале 60-х годов XVII в. привлекали внимание многих ученых и любителей, то, как часто бывало, с установлением закона $pV = \text{const}$ связаны серьезные приоритетные вопросы. Несомненно, Бойль еще до проведения своих опытов знал о гипотезе относительно обратной пропорциональности давления и объема, выдвинутой английскими исследователями Г. Пауэром и Р. Таунли, которые пытались обосновать ее опытным путем. Кроме того, Гук, по свидетельству самого Бойля, к началу проведения экспериментов уже располагал некоторыми данными, подтверждающими гипотезу Пауэра и Таунли. Эти факты показывают, что не один Бойль мог претендовать на открытие и доказательство закона $pV = \text{const}$ *. Однако следует отметить, что он первым опубликовал свои результаты, которые по полноте и точности намного превосходили данные Пауэра и Таунли. Отметим также, что последние проверяли выдвинутую ими гипотезу только для давлений, меньших атмосферного, в то время как Бойль проверил ее в достаточно широких пределах для давлений как больше, так и меньше одной атмосферы. Поэтому присвоение имени Бойля указанному закону имеет веские основания.

* Имя французского ученого Э. Мариотта часто присоединяется к названию этого закона на том основании, что в 1679 г. Мариотт в «Речи о природе воздуха» описал опыты, аналогичные экспериментам Бойля, без ссылок на работы последнего. Сомнительно, что Мариотт не знал об исследованиях Бойля, поскольку «Новые опыты...» были изданы к этому времени не только на английском, но и на латинском языке. Кроме того, следует отметить, что исследования Мариотта значительно уступают опытам Бойля по точности. Поэтому имя Мариотта в названии рассматриваемого закона не имеет серьезных оснований и представляет лишь дань традиции.

Новые физико-механические эксперименты, касающиеся упругости воздуха...

ЧАСТЬ II

Глава V

Два новых опыта, касающиеся измерения силы упругости сжатого и разреженного воздуха

<...> Затем мы взяли длинную стеклянную трубку, которая на конце была изогнута умелой рукой при помощи лампы так, что некоторая ее часть оказалась направленной вверх, почти параллельно остальной части трубки, а отверстие этого более короткого колена сифона (если мне позволительно так называть весь прибор) было герметически запаено. Это колено по всей длине было разделено на дюймы (каждый из которых подразделялся на восемь частей) с помощью прямого листа бумаги, тщательно приклеенного вдоль всего колена, на котором были нанесены деления. Затем [в прибор] наливалось столько ртути, сколько было необходимо для заполнения дуги или изогнутой части сифона, чтобы ртуть стояла в одном колене на уровне, достигающем нижнего края градуированной бумажки, и на том же уровне или горизонтальной линии — в другом. Часто, наклоняя трубку так, что воздух мог свободно проходить из одного колена в другое над ртутью, мы старались, чтобы воздух, который в конечном счете оказывается заключенным в коротком цилиндре, обладал такой же разреженностью, как и остальной окружающий прибор воздух. Сделав это, мы начали доливать в длинное колено сифона ртуть, которая, сдавливая своим весом ртуть в коротком колене, постепенно сдавливала заключенный в нем воздух. Мы продолжали доливать ее до тех пор, пока воздух в коротком колене не был сжат так, что занимал лишь половину пространства, которым он обладал ранее (я говорю обладал, но не заполнял). Затем мы устремили взгляд на длинное стеклянное колено, на котором был приклеен лист бумаги, тщательно разделенный на дюймы и их части, и увидели, не без удовольствия и удовлетворения, что ртуть в этой длинной части трубы была на 29 дюймов выше, чем в другом¹. Теперь тот, кто примет во внимание наше учение, легко поймет, что это наблюдение в действительности одновременно и очень хорошо согласуется с нашей гипотезой и подтверждает ее. И опыты Паскаля², и эксперименты нашего английского друга³ доказывают, что чем больший вес действует на воздух, тем более сильным становится его стремление к расширению и, следовательно, его сила сопротивления (как иные рессоры становятся более сильными, когда изгибаются большими грузами). Если рассмотреть это [наблюдение], то выяснится, что оно на редкость хорошо согласуется с гипотезой, согласно которой воздух при том уровне плотности и соответствующей мере сопротивления, до которых довела его

лежащая над ним атмосфера, способен уравновесить и противодействовать давлению ртутного столба [высотой] около 29 дюймов, чему научил нас опыт Торричелли; так что здесь тот же воздух, доведенный до уровня плотности примерно вдвое большего, чем раньше, получает упругость вдвое большую, чем первоначальная. Это явствует из того, что он может удержать столб (или сопротивляться ему) в 29 дюймов в длинной трубке вместе с весом столба атмосферы, который действует на эти 29 дюймов ртути и который, как мы только что вывели из опыта Торричелли, был им эквивалентен.

В это время продолжение опыта было прервано вследствие случайной поломки трубки. Но поскольку точный эксперимент такого рода должен иметь величайшее значение для учения об упругости воздуха и так как он до сих пор (насколько я знаю) не был никем проведен, а также поскольку осуществить опыт гораздо труднее, чем можно было бы подумать, учитывая как сложность изготовления изогнутых трубок, приспособленных для этой цели, так и трудность проведения правильных отсчетов истинного положения выпуклой поверхности ртути, я решил, что для читателя не будет нежелательным, если я сообщу, что после нескольких дополнительных испытаний, в одном из которых мы сделали трубку с перпендикулярным длинным коленом и параллельным горизонту коленом, содержащим воздух, мы, наконец, получили трубку, имевшую форму, которая показана на рис. 29. Эта трубка, хотя и довольно большая по диаметру, была все же настолько длинной, что на цилиндре, образовавшем короткое колено, умещался лист бумаги, предварительно разделенный на 12 дюймов и их четверти, а на длинном колене умещался другой лист длиной в несколько футов, разделенный таким же образом. После того как в изогнутую часть стеклянной трубки была налита ртуть так, что ее поверхность находилась



Рис. 29

Таблица сжатия воздуха

A	A	B	C	D	E
48	12	00	$29 \frac{1}{8}$	$29 \frac{2}{16}$	$29 \frac{2}{16}$
46	$11 \frac{1}{2}$	$01 \frac{7}{16}$		$30 \frac{9}{16}$	$33 \frac{6}{16}$
44	11	$02 \frac{13}{16}$		$31 \frac{15}{16}$	$31 \frac{12}{16}$
42	$10 \frac{1}{2}$	$04 \frac{6}{16}$		$33 \frac{8}{16}$	$33 \frac{1}{7}$
40	10	$06 \frac{3}{16}$		$35 \frac{5}{16}$	35

A	A	B	C	D	E
38	$9\frac{1}{2}$	$07\frac{14}{16}$		37	$36\frac{15}{19}$
36	9	$10\frac{2}{16}$		$39\frac{5}{16}$	$38\frac{7}{8}$
34	$8\frac{1}{2}$	$12\frac{8}{16}$		$41\frac{10}{16}$	$41\frac{2}{17}$
32	8	$15\frac{1}{16}$		$44\frac{3}{16}$	$43\frac{11}{16}$
30	$7\frac{1}{2}$	$17\frac{15}{16}$		$47\frac{1}{16}$	$46\frac{3}{5}$
28	7	$21\frac{3}{16}$		$50\frac{5}{16}$	50
26	$6\frac{1}{2}$	$25\frac{3}{16}$		$54\frac{5}{16}$	$53\frac{10}{13}$
24	6	$29\frac{11}{16}$		$58\frac{13}{16}$	$58\frac{2}{8}$
23	$5\frac{3}{4}$	$32\frac{3}{16}$		$61\frac{5}{16}$	$60\frac{18}{23}$
22	$5\frac{1}{2}$	$34\frac{15}{16}$		$64\frac{1}{16}$	$63\frac{6}{11}$
21	$5\frac{1}{4}$	$37\frac{15}{16}$		$67\frac{1}{16}$	$66\frac{4}{7}$
20	5	$41\frac{9}{16}$		$70\frac{11}{16}$	70
19	$4\frac{3}{4}$	45		$74\frac{2}{16}$	$73\frac{11}{19}$
18	$4\frac{1}{2}$	$48\frac{12}{16}$		$77\frac{14}{16}$	$77\frac{2}{3}$
17	$4\frac{1}{4}$	$53\frac{11}{16}$		$82\frac{12}{16}$	$82\frac{4}{17}$
16	4	$58\frac{2}{16}$		$87\frac{14}{16}$	$87\frac{3}{8}$
15	$3\frac{3}{4}$	$63\frac{15}{16}$		$93\frac{1}{16}$	$93\frac{1}{5}$
14	$3\frac{1}{2}$	$71\frac{5}{16}$		$100\frac{7}{16}$	$99\frac{6}{7}$
13	$3\frac{1}{4}$	$78\frac{11}{16}$		$107\frac{13}{16}$	$107\frac{7}{13}$
12	3	$88\frac{7}{16}$		$117\frac{9}{16}$	$116\frac{4}{8}$

Пояснения к таблице

- АА. Число равных объемов в коротком колене, содержащих одну и ту же порцию воздуха, по-разному расширенного.
- В. Высота столба ртути в длинном колене, сжимающего воздух до данных размеров.
- С. Высота ртутного столба, который уравнивает давление атмосферы.
- Д. Сумма данных двух последних столбцов В и С, представляющая давление, которое, испытывает запертый воздух.
- Е. Давление, которое должно существовать согласно гипотезе, предлагающей, что давление и расширение должны находиться в обратной пропорции

в обоих коленях на одном и том же уровне [рис. 29, а], о чем мы только что говорили, в длинное колено доливалось все больше ртути. При том ртуть поднялась до определенного деления короткого колена, производились отсчеты, насколько она поднялась в длинном колене [рис. 29, б, в]. Несколько последовательных наблюдений, выполненных таким образом и приведенных в систему, позволили нам составить такую таблицу.

Для лучшего понимания этого опыта неплохо принять во внимание следующие обстоятельства.

1. Трубка была столь длинной, что мы не могли с удобством пользоваться ею в комнате, а вынуждены были применять ее на паре лестниц, которые все же были очень легкими, причем трубка для сохранности удерживалась веревками, подвешенными так, что она едва касалась ящика, о котором теперь надо упомянуть.

2. Нижняя изогнутая часть трубки помещалась в квадратный деревянный ящик достаточной вместимости и глубины для предотвращения потерь ртути, которая могла течь мимо при переходе из сосуда в трубку, а также для сбора всей ртути в случае поломки трубки.

3. Мы должны были проводить наблюдения вдвоем, чтобы один из нас делал отсчеты внизу, измеряя, насколько поднялась ртуть в коротком колене, а другой — доливал ртуть в отверстие длинного колена, поскольку для одного человека очень трудно и опасно проделывать и то и другое достаточно аккуратно.

4. Ртуть доливалась понемногу, по указаниям наблюдателя, стоявшего внизу, поскольку было гораздо легче добавить ртуть, чем изъять какую-либо ее часть, если одновременно ее доливалось слишком много.

5. В начале наблюдений, чтобы можно было с большей уверенностью убедиться, где в тот или иной момент находилась ртуть, мы пользовались маленьким зеркалом, установленным в удобном положении. (. . .)

6. Когда воздух был сжат настолько, что загонялся в объем, составлявший менее четверти занимавшегося им первоначально пространства, мы проверяли, не сгустит ли его холод льняной ткани, смоченной в воде. И порой казалось, что воздух немного сжимается, но не настолько отчетливо, чтобы мы решились построить на этом основании какие-либо заключения. Затем, аналогично, мы пробовали, расширит ли его, несмотря на столь сильную компрессию, теплота. При приближении пламени свечи к той части трубки, где находился воздух, обнаруживалось, что тепло оказывает более сильное действие, чем ранее оказывал холод. Так что мы практически не сомневались, что расширение воздуха, несмотря на сжимающий его вес, бросалось бы в глаза, если бы опасение несвоевременного повреждения стеклянной трубки не удерживало нас от увеличения нагрева.

Далее, мы не отрицаем, что некоторые детали нашей табли-

цы не столь точно отвечают тому, чего, вероятно, мог ожидать читатель на основе вышеупомянутой гипотезы. Однако эти отклонения не столь значительны. Их с достаточной вероятностью можно приписать такому недостатку точности, которого в столь тонких экспериментах едва ли можно избежать. Но по этой причине до тех пор, пока дальнейшие эксперименты не покажут мне этого более ясно, я не решусь определить, справедлива ли упомянутая теория в точности и универсальна ли она как при сжатии, так и при разрежении. Все, на чем я сейчас настаиваю, заключается в том, что уже проведенный опыт в достаточной степени доказывает основное положение, ради которого я здесь на этот опыт и ссылаюсь. Из опыта, очевидно, следует, что если объем обычного воздуха уменьшить наполовину, то он получает упругость, приблизительно вдвое большую, чем имел ранее. Если сжатый до такой степени воздух загнать в половину этого малого пространства, то он приобретает [дополнительную] упругость, равную той, что он имел в последнем случае, и, следовательно, будет в четыре раза более упругим, чем обычный воздух. И нет причины сомневаться, что если бы нам предоставили очень прочную трубку, то мы могли бы путем дальнейшего сжатия запертого воздуха уравновесить давление гораздо более высокого и тяжелого столба ртути. Поскольку ни один человек, вероятно, еще не знает, насколько близко к состоянию бесконечного сжатия способен приблизиться воздух, если в достаточной степени увеличить сжимающую силу. (...)

И чтобы показать вам, что мы небезосновательно (как это сделали немного выше) упомянули о весе возлежащего столба атмосферы как части веса, которому противодействует запертый воздух, добавим, что, когда столб ртути в длинном колене составлял по высоте около сотни дюймов, мы заботились о том, чтобы кто-нибудь отсосал ртом воздух из открытого конца; после чего (как мы и ожидали) ртуть заметно поднималась. (...)

И поэтому мы укажем такую причину происходящего: при удалении части давления возлежащего воздуха путем его расширения в увеличившейся грудной клетке сосущего запертый воздух сам получал возможность заметно расшириться и вытолкнуть сжимавшую его ртуть до такого уровня, при котором достигалось равенство сил между значительной упругостью сжатого воздуха, с одной стороны, и высоким столбом ртути вместе с прилегающим расширенным воздухом — с другой.

Теперь, если к тому, что мы таким образом узнали относительно сжатия воздуха, добавить несколько наблюдений, касающихся его самопроизвольного расширения, будет лучше видно, насколько явления, наблюдающиеся в этих экспериментах со ртутью, зависят от различающихся мер силы, которая должна встречаться в упругости воздуха, в соответствии с различными степенями его сжатия и разреженности.

Для того чтобы сделать эксперимент с ослабленной силой расширившегося воздуха более ясным, нелишним будет отметить

некоторые детали, в особенности касающиеся метода постановки опыта, который мы проводили [по причинам только что изложенным] на паре лестниц, используя ящик, также обклеенный бумагой, для сбора ртути, которая может быть пролита.

1. Учтя, что должно было потребоваться значительное и в немногих местах доступное количество ртути для заполнения сосудов, подобных обычно используемым в опыте Торричелли, мы применили стеклянную трубку длиной около шести футов. Поскольку она была герметически запаяна с одного конца, то служила нам так же, как если бы мы могли проводить опыт в бадье или пруде глубиной семьдесят дюймов.

2. Мы также располагали узкой стеклянной трубкой величиной примерно с лебединое перо, открытой с обоих концов, вдоль всей длины которой был приклеен узкий листок бумаги, разделенный на дюймы и их восьмые части.

3. Когда эта узкая трубочка опускалась в большую трубку, почти заполненную ртутью [рис. 30], стекло способствовало тому, чтобы последняя сделалась выпуклой у верхнего края трубки. И ртуть, проникая через нижнее отверстие трубочки, заполняла ее до тех пор, пока заключенная внутри ртуть не оказывалась почти на уровне с поверхностью окружающей ртути в трубке.

4. Когда узкая трубочка выступала над поверхностью окружающей ртути чуть больше, чем на один дюйм, насколько мы могли заметить, и, следовательно, в этой части оставалась незаполненной, выступающее отверстие тщательно заделывалось с помощью расплавленного сургуча. После этого трубочку на некоторое время оставляли в покое, чтобы воздух, слегка расширившийся под действием тепла сургуча, мог сжаться до своей обычной плотности. Затем посредством вышеупомянутого листа бумаги мы наблюдали, не ограничили ли мы несколько больше или несколько меньше, чем один дюйм воздуха. В обоих случаях мы были вынуждены исправлять ошибку, протыкая маленькое отверстие (нагретой булавкой) в сургуче, а затем заделывая его.

5. Закрыв, таким образом, ровно дюйм воздуха [рис. 30, а], мы постепенно поднимали тонкую трубочку до тех пор, пока воздух не расширился на один дюйм, полтора дюйма, два дюйма и т. д. [рис. 30, б, в], и измеряли число дюймов и восьмых частей ртутного столба, который при каждой степени расширения воздуха возвышался над поверхностью остальной ртути в трубке.

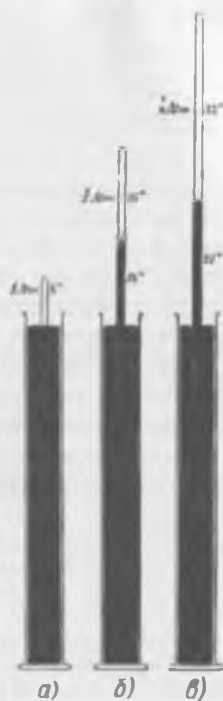


Рис. 30

6. Как только эксперимент заканчивался, мы проводили опыт Торричелли с большой трубкой шести футов длиной, т. е. мы могли знать высоту столба ртути для данного дня и часа. Было найдено, что эта высота составляла $29\frac{3}{4}$ дюйма.

7. Наши наблюдения позволили составить таблицу, в которой, вероятно, не было бы найдено разницы между силой воздуха, когда он расширился до удвоенного начального объема, и той силой, которая должна была бы наблюдаться в точном согласии с теорией, если бы не небольшое приращение запертого дюйма воздуха, полученное во время проведения опыта. То, что заставило нас заподозрить наличие вновь отмеченной разницы, мы обнаружили путем нового погружения трубочки в ртуть, при котором запертый воздух получил приращение в $1/16$ дюйма, что, насколько мы понимаем, произошло от нескольких маленьких пузырьков воздуха, содержащихся в ртути, находящейся в трубочке (так легко потерять точность в столь тонких экспериментах) [...]

Таблица разрежения воздуха

A	B	C	D	E
1	$00\frac{0}{0}$	$29\frac{3}{4}$	$29\frac{3}{4}$	$29\frac{3}{4}$
$1\frac{1}{2}$	$10\frac{5}{8}$		$19\frac{1}{8}$	$19\frac{5}{6}$
2	$15\frac{3}{8}$		$14\frac{3}{8}$	$14\frac{7}{8}$
3	$20\frac{2}{8}$		$9\frac{4}{8}$	$9\frac{5}{12}$
4	$22\frac{5}{8}$		$7\frac{1}{8}$	$7\frac{7}{16}$
5	$24\frac{1}{8}$		$5\frac{5}{8}$	$5\frac{19}{20}$
6	$24\frac{7}{8}$		$4\frac{7}{8}$	$4\frac{27}{26}$
7	$25\frac{4}{8}$		$4\frac{2}{8}$	$4\frac{1}{4}$
8	$26\frac{0}{0}$		$3\frac{6}{8}$	$3\frac{23}{22}$
9	$26\frac{3}{8}$		$3\frac{3}{8}$	$3\frac{11}{86}$
10	$26\frac{6}{8}$		$3\frac{0}{0}$	$2\frac{19}{40}$
12	$27\frac{1}{8}$		$2\frac{5}{8}$	$2\frac{23}{48}$
14	$27\frac{4}{8}$		$2\frac{2}{8}$	$2\frac{1}{8}$
16	$27\frac{6}{8}$		$2\frac{0}{0}$	$1\frac{55}{64}$
18	$27\frac{7}{8}$		$1\frac{7}{8}$	$1\frac{47}{72}$

Продолжение

A	B	C	D	E
20	$28\frac{0}{0}$		$1\frac{6}{8}$	$1\frac{9}{80}$
24	$28\frac{2}{8}$		$1\frac{4}{8}$	$1\frac{23}{96}$
28	$23\frac{3}{8}$		$1\frac{3}{8}$	$1\frac{1}{16}$
32	$28\frac{4}{8}$		$1\frac{2}{8}$	$0\frac{119}{128}$

Столбцы A, C, E аналогичны соответствующим столбцам предыдущей таблицы; B — высота ртутного столба в узкой трубке, D — разность между C и B, показывающая давление запертого воздуха.

Комментарий

Перевод с английского отрывков из книги Р. Бойля выполнен С. Р. Филоновичем. Полное название книги: *New Experiments physico — mechanicall, touching the Spring of the Air. The Authors Explication of the Experiments, against the Objections of Franciscus Linus and Thomas Hobbes* (Oxford, 1662).

Следует обратить внимание на то, что Бойль ничего не говорит о постоянстве температуры воздуха. Судя по описанию опыта, он проводился довольно медленно и температура сжатого воздуха успевала выравниваться с температурой воздуха, окружающего прибор, и поэтому условие изотермичности соблюдалось.

Здесь, видимо, имеется в виду знаменитый опыт на горе Пюи-де-Дом, проведенный по инициативе Паскаля его зятем Ф. Перье в 1648 г. С помощью этого опыта было доказано, что высота столба ртути в барометре уменьшается с ростом высоты места наблюдения.

³ Бойль, видимо, имеет в виду Р. Гука, который по некоторым данным проводил опыты, подобные описанным Бойлем (1660—1661) [4].

Литература

- [1] Собрание сочинений Р. Бойля: *The Works of the Honourable Robert Boyle*. 2nd ed., vols. 1—6, London, 1772.
- [2] More L. T. *The life and works of the honourable Robert Boyle*. London, 1944.
- [3] Robert Boyle's experiments in pneumatics. Ed. by J. B. Conant. Cambridge (Mass.), 1950.
- [4] Cohen I. B. Newton, Hooke, and «Boyle's law». «*Nature*», 1964, vol. 204, p. 618—621.
- [5] Крицман В. А. Роберт Бойль, Джон Дальтон, Амедео Авогадро. Создатели атомно-молекулярного учения в химии. М., 1976.



Ф. Гримальди

1618—1663

О дифракции света

В истории оптики XVII в. занимает особое положение. На протяжении этого столетия были изобретены телескоп и микроскоп, установлен закон преломления света. Во второй половине XVII в. были открыты явления, относящиеся к физической оптике (дифракция света, цвета тонких пленок, двойное лучепреломление), установлена объективность цвета как характеристики света, а также измерена скорость света. Эти открытия послужили основой для развития теоретических представлений о свете. В конце столетия были сформулированы две важнейшие гипотезы относительно природы света — волновая и корпускулярная. Открытие дифракции света оказалось первым в ряду достижений физической оптики и представляет собой яркий пример использования экспериментального метода, развитие которого составляет важнейшую черту научной революции XVII в. Честь обнаружения и первичного исследования дифракции принадлежит итальянскому ученому Ф. Гримальди.

Франческо Мария Гримальди родился 2 апреля 1618 г. в Болонье в обеспеченной семье торговца шелком. Еще мальчиком Гримальди вступил в орден иезуитов. На протяжении ряда лет он изучал философию, риторику и теологию в нескольких иезуитских школах и университетах Италии и в 1647 г. получил степень доктора философии. На протяжении многих лет Гримальди преподавал в иезуитской коллегии в Болонье. В 1651 г. он принял сан священника.

Несмотря на принадлежность к ордену иезуитов, Гримальди придерживался прогрессивных для своего времени взглядов, из-за чего у него неоднократно возникали конфликты с братьями по ордену. Отклонение взглядов Гримальди от некоторых канонических религиозных воззрений привело к тому, что он был фактически отстранен от чтения курса философии и в конце жизни преподавал математику. Умер ученый 28 декабря 1663 г. в возрасте 45 лет.

Первоначально научные интересы Гримальди относились к астрономии. Его исследования в этой области начались под воздействием известного итальянского астронома Дж. Риччиоли. В 1640 г. Гримальди проводил по его просьбе опыты по сво-

бодному падению. Риччиолли отмечал большую помощь, которую ему оказал Гримальди при подготовке книги «Новый Альмагест» (1651), и подчеркивал его способности к изобретению новых приборов и проведению точных измерений.

От астрономических вопросов Гримальди перешел к проблемам оптики. Последние годы жизни он был занят подготовкой книги по оптике, которая увидела свет лишь после его смерти. Гримальди попытался исследовать поведение очень узких световых пучков, надеясь таким образом выяснить природу света. Опыты с узкими световыми пучками привели ученого к открытию явления дифракции (этот термин предложил сам Гримальди). В вопросе о природе света он колебался в выборе между субстанциальным и акцидентальным взглядами. Отрицая представления о свете как потоке частиц, он не мог решить, является ли свет непрерывной средой (субстанцией), подобной жидкости, или представляет собой свойство (акциденцию) некоей непрерывной среды. Из анализа его сочинения «De lumine» можно заключить, что Гримальди склонялся ко второй точке зрения. Из аналогии между оптическими явлениями и движениями жидкости, которой пользовался Гримальди, в его позиции можно увидеть элементы волновой теории света.

Физическое учение о свете, цветах и радуге...

КНИГА I

Предложение 1. Свет распространяется или расходится не только прямолинейно, путем преломления и отражения, но также еще четвертым путем — посредством дифракции.

Первый эксперимент. В оконной ставне тщательно затемненной комнаты проделано очень маленькое отверстие AB [рис. 31] и через него в комнату пропускается солнечный свет от очень чистого неба. Распространение этого света будет происходить внутри конуса или внутри области, близкой к конусу, $ACDB$; оно становится видимым, если воздух наполняется пылью или если в него добавляют некоторое количество дыма. В этот конус на большом расстоянии от отверстия AB помещают непрозрачное тело EF так, что по крайней мере один из его концов оказывается освещенным. Затем вышеупомянутый конус падает на белую доску или лист белой бумаги, лежащий на полу, на котором видно его освещенное основание CD с тенью GH , отбрасываемой телом EF , которое помещено в конус и имеет освещенным либо конец E , либо F . Эта тень, согласно законам оптики, не будет определена точно и не заканчивается в точке G с одной стороны и в точке H с другой; но вследствие [конечной] ширины отверстия AB , а также из-за протяженности Солнца и по другой причине край тени будет до некоторой степени неопределенным благодаря так

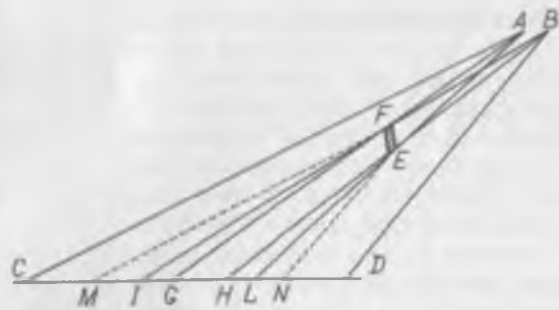


Рис. 31

называемой полутени и с ощутимым уменьшением или, как говорят, затенением света на отрезке IG между резкой тенью и ярким светом на одной стороне основания, а также на отрезке HL с другой стороны.

Однако надо особо отметить тот факт, что тень IL в действительности оказывается значительно шире, чем она должна быть, если предполагать, что все действие происходит по прямым линиям, проведенным от концов AB через любой из концов EF , как показано на рисунке, и больше, чем получилось бы из расчета, основанного на данных расстояниях EL и FI и на размерах AB и EF , а также исходя из [знания] всех углов, необходимых для решения показанных на рисунке треугольников, в чем мы сами часто убеждались при испытаниях. Коротко говоря, по трем сторонам треугольника AFE с помощью тригонометрии получаем угол A , зная который в треугольнике AGL по сторонам AG или AL и наблюдаемому углу G находим GL . Затем в треугольнике AFB , который может считаться равнобедренным, по трем данным сторонам находим угол F и вертикальный [по отношению к нему] и равный угол IFG , зная который в треугольнике IFG , а также зная расстояние FI и наблюдая угол I , получаем отрезок IG , который при сложении с уже найденным отрезком GL дает искомого основание IL таких размеров, какие оно должно было бы иметь, если бы все распространение [света] шло по прямым линиям в световом конусе, прерываемом непрозрачным телом EF . Эти треугольники имеют очень острые углы, так что нужны таблицы, рассчитанные до больших радиусов, тем не менее их решение не невозможно. Таким образом, мы можем показать на рисунке тень, определенную из расчета, когда она найдена по прямым линиям, как указано выше. Это будет отрезок IL . Однако истинная тень, которая возникает при наблюдении, — это MN .

Вдобавок при наблюдении части поля CM или ND , которое ярко и сильно освещено, будут видны полосы или зоны окрашенного света такого вида, что в любой из них в середине свет очень чистый и ясный, но по краям у них наблюдается некоторая окраска, всегда голубоватая с той стороны, которая ближе к тени MN , и красноватая с дальней стороны. Эти яркие полосы отчет-

ливо зависят от размеров отверстия AB , поскольку они не видны, если оно очень велико, хотя они и не определяются им. Также не определяются они и диаметром Солнца, что выяснится из сказанного далее.

Относительно вышеупомянутых полос или зон окрашенного света можно заметить, что когда они тянутся от M к C (и то же самое мы можем сказать о других [полосах] между N и D), то первая шире второй, а вторая шире третьей (никогда еще не случалось, чтобы было видно более трех [полос]). Они уменьшаются по интенсивности света и цветов в том же порядке, в каком удаляются от тени. Тем не менее отдельные полосы тем шире и тем более удалены друг от друга, чем дальше находится белая доска, на которой они воспринимаются, от непрозрачного тела, дающего тень, и разделены тем сильнее, чем более наклонно она расположена по отношению к солнечному излучению. Это естественно, поскольку они образованы лучами, составляющими часть светового конуса, которые становятся все более отдаленными друг от друга по мере их распространения.

Возможно, что найдется некто, вследствие неспособности осознать это наблюдение, не желающий признать, что вышеупомянутые полосы суть полосы света, в то время как мы сказали, что это так, но будет утверждать, что и их скорее следует называть полосами тени, поскольку он не обратил достаточно внимания на те темные цвета, которые, как мы сказали, появляются по сторонам этих световых полос. Это можно более отчетливо пояснить на рисунке, где рядом с тенью X , создаваемой непрозрачным телом и падающей на доску или лист белой бумаги, показаны три [из шести] светящиеся полосы, каждая из которых состоит из трех меньших полос [рис. 32]. Первая, самая широкая, полоса — это NMO , середину которой составляет M , самая широкая и яркая область из всех, не дающая цвета, но ограниченная двумя меньшими окрашенными полосками. Одна из них, N , ближняя к тени, голубоватая, а другая O — красноватая. Вторая полоса QPR уже, чем первая, в ее середине находится P — яркая неокрашенная полоска, которая ограничена двумя полосками, окрашенными, но неяркими; одна Q , ближайшая к тени, голубоватая, другая R — красноватая. Третья полоса TSV самая узкая из всех. У нее в середине находится полоска S , а по краям — две менее заметные окрашенные полоски, из которых T — голубоватая, а V — красноватая.

Второй эксперимент. В оконной ставне хорошо затемненной комнаты делается отверстие, возможно, в палец шириной, в это отверстие помещается тонкая непрозрачная пластинка AB [рис. 33] и через очень узкое отверстие в этой пластинке пропускается солнечный свет, образующий световой конус. На большем расстоянии от пластинки AB помещается другая пластинка EF , пересекающая этот конус под прямыми углами. В ней также имеется малое отверстие GH , через которое пропускается часть конуса света, перекрываемого пластинкой EF . Эта пластинка



Рис. 32

располагается так, что основание конуса значительно превышает размеры отверстия GH , и поэтому оно полностью освещено или заполнено светом. Тогда свет, который проходит через отверстие GH , снова образует конус или почти конус. Когда он рассекается под прямым углом или обрывается гладкой белой поверхностью, то образует на поверхности освещенное основание IK , заметно большее, чем то, что должно быть создано лучами, которые пропущены по прямым линиям через два отверстия, и не только лучами, проходящими с одной стороны краев отверстий, подобно CGL и DHM , но даже теми, что проходят с противоположных сторон, как и CHO . (...)

Для того чтобы эксперимент был успешным, солнечный свет должен быть ярким, потому что, как было сказано, отверстия должны быть очень маленькими, в особенности первое, CD , а также поскольку белая поверхность, на которой образуется основание IK , должна находиться на большом расстоянии от отверстия GH , иначе наблюдаемое основание либо вовсе не больше основания NO , определенного расчетом, либо больше него очень ненамного.

Когда наблюдение проводилось в середине дня летом, при чистом небе, наблюдавшееся основание IK настолько превосходило рассчитанное основание NO , что не могло быть никакого вопроса о том, чтобы приписать это [явление] ошибкам наблюдения.

Нельзя упустить и то, что освещенное основание IK кажется залитым в середине чистым светом, а на любом из краев его свет окрашен частично красноватым, частично сильно голубоватым [цветом]. (...)

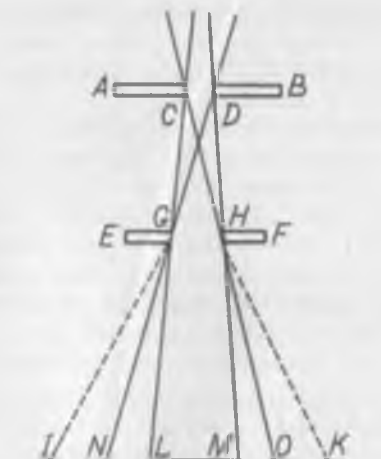


Рис. 33

Комментарий

Перевод с латинского отрывков из работы Ф. Гримальди выполнен С. Р. Филоновичем по изданию: Grimaldi F. M. Physico — mathesis de lumine, coloribus et iride... Bologna, 1963.

Полное название сочинения Гримальди, в котором по традиции кратко излагалось его содержание, звучит так: «Физическое учение о свете, цветах и радуге, а также о других родственных вопросах, в двух книгах, первая из которых представляет новые эксперименты и выведенные из них заключения в пользу субстанциальности света. Однако во второй книге аргументы, приведенные в первой, опровергаются и учение перипатетиков об акцидентальности света защищается как вероятное».

Литература

- [1] Собрание сочинений Ф. Гримальди не издавалось. Переиздание основного сочинения Гримальди вышло в Болонье в 1964 г. к 300-летию со дня смерти ученого (см. выше).
- [2] Tabarroni G. P. F. M. Grimaldi, bolognese iniziatore della ottica — fisica. Bologna, 1964.
- [3] Ронки В. Падре Гримальди и его эпоха. // Успехи физических наук. 1965, т. 87, вып. 2, с. 349—366.

Р. Гук

1635—1703

О законе упругости

Закон упругости является одним из первых количественных соотношений, установленных в механике. Несмотря на то что он не относится к числу фундаментальных законов природы, его роль в физике и прикладных областях исключительно велика. Чаще всего соотношение между силой упругости и деформацией называют кратко «законом Гука» по имени английского ученого, впервые сформулировавшего это соотношение и обосновавшего его экспериментально.

Роберт Гук родился 18 июля 1635 г. в местечке Фрешуотер на английском острове Уайт в семье настоятеля местной церкви. Мальчик рано проявил склонности к изобретательству, но из-за слабого здоровья не смог вовремя пойти в начальную школу. Рано потеряв отца, юный Гук вынужден был сам выбирать жизненный путь. Сначала он стал учеником одного лондонского живописца, но затем стремление к знаниям пересилило, он окончил среднюю школу и поступил в Оксфордский университет. Для учебы в университете нужны были средства, и Гук искал побочных заработков. Зная о склонности Гука к практической механике, один из преподавателей университета порекомендовал его Р. Бойлю в качестве ассистента для проведения экспериментальных исследований. Сотрудничество Бойля и Гука было весьма плодотворным: его результатом стало создание усовершенствованного воздушного насоса, применение которого позволило провести множество интереснейших опытов. Работа у Бойля сыграла в жизни Гука очень важную роль не только потому, что он приблизился к научным исследованиям. В 1662 г. не без участия Бойля он был рекомендован на должность куратора экспериментов (демонстратора) Лондонского Королевского общества. В его обязанности входила подготовка трех-четырёх опытов, которые демонстрировались на еженедельных заседаниях Общества. Эти обязанности он выполнял в течение нескольких десятилетий.

Несмотря на любовь к конструированию научных приборов

и проведению опытов, Гук не ограничивал свою деятельность этой областью. Он был профессором геометрии в одном из лондонских колледжей, а после страшного пожара в Лондоне (1666) много времени уделял выполнению обязанностей смотрителя работ по перестройке разрушенной части города. Известно, что Гук был и талантливым архитектором — по его проекту был возведен ряд общественных зданий.

Однако главной страстью Гука были все же научные исследования. Свою первую самостоятельную научную работу, посвященную капиллярности, Гук опубликовал еще в 1661 г. Затем он занимался разработкой астрономических инструментов, вел наблюдения с целью обнаружения параллакса неподвижных звезд, проводил биологические, географические, геологические исследования, причем внес значительный вклад в соответствующие области науки.

Особую известность приобрело сочинение Гука «Микрография», опубликованное в 1665 г. В этой относительно небольшой книге Гук описал множество наблюдений, произведенных с помощью усовершенствованного им микроскопа. Однако по своей тематике «Микрография» выходит далеко за рамки проблем микроскопа. В ней изложены мысли Гука о природе света, которые позволяют считать ученого одним из основоположников волновой теории света. Там же описываются эксперименты и наблюдения, относящиеся к самым разнообразным областям естествознания — от опытов над упругостью воздуха до астрономических наблюдений.

В 1674 г. в работе «Попытка доказать движение Земли наблюдениями» Гук изложил свои взгляды на движение и взаимодействие небесных тел, близкие к тем, которые были впоследствии развиты И. Ньютоном в «Началах». Есть все основания считать Гука одним из ученых, способствовавших открытию закона всемирного тяготения.

Разнообразие научных интересов Гука имело и некоторые отрицательные последствия. Он часто не доводил свои исследования до конца, что давало повод к многочисленным острым спорам о приоритете с крупнейшими учеными того времени (Х. Гюйгенсом, И. Ньютоном и др.). Однако искренняя преданность науке компенсировала недостатки резкого, неуживчивого характера Гука, и он до самой кончины пользовался глубоким уважением ученых не только Англии, но и всей Европы. Умер Гук 3 марта 1703 г.

В 1666 г. меценат Дж. Кутлер предложил Гуку за довольно большое вознаграждение регулярно читать лекции для членов Лондонского Королевского общества. Гук принял это предложение и в течение многих лет выступал с лекциями, посвященными разнообразным проблемам естествознания. В них Гук излагал результаты собственных исследований, анализировал работы других ученых.

Одна из серий кутлеровских лекций была посвящена пробле-

мам упругости, которые интересовали Гука еще во времена со- трудничества с Бойлем в проведении пневматических экспери- ментов. Широкая трактовка понятия упругости (или по тер- минологии Гука, «восстановительной силы») привела ученого к установлению общего закона, которому подчиняются различные виды деформации. Следует отметить, что теоретические выводы Гука были убедительно обоснованы многочисленными экспе- риментами. Возможно, именно поэтому приоритет Гука в уста- новлении закона упругости никогда не оспаривался. Итоги сво- их исследований в этой области ученый изложил в сочинении «Лекции о восстановительной способности, или об упругости», опубликованном в 1678 г.

О возвращающей силе

Теория пружин, хотя ее и пытались создать различные знаме- нитые математики этого столетия, до сих пор не была никем опу- бликована. Теперь прошло уже около восемнадцати лет с тех пор, как я впервые ее разработал, но, намереваясь использо- вать ее для некоторых частных применений, я воздерживался от публикации.

Около трех лет назад Его Величество с удовольствием наблю- дал эксперимент, поставленный в Уайт-холле, который доказывал эту теорию, а также рассмотрел мои пружинные часы.

Примерно два года назад я опубликовал эту теорию в виде анаграммы в конце моей книги, посвященной описанию гелиос- копов¹, а именно: *ceiioosssttuu, id est, ut tensio sic vis*, т. е. сила любой пружины пропорциональна ее растяжению. Иначе, если одна сила растягивает или изгибает ее на одно протяжение, то две изогнут ее на два [протяжения], три изогнут ее на три [про- тяжения] и так далее. Итак, поскольку теория очень коротка, постольку путь ее проверки очень прост.

Возьмите для этого некоторую меру ровно вытянутой про- волоки либо стальной, либо железной, либо латунной и сверните ее на ровном цилиндре в спираль такой длины и с таким числом витков, какие вам нравятся, затем скрутите концы проволоки в петли, с помощью одной подвесьте эту спираль на гвозде, а к другой прикрепите груз, которым вы хотите растянуть спираль [рис. 34, в]. Подвесивая несколько грузов, тщательно наблю- дайте, на какую длину каждый из них растянет спираль сверх длины, до которой ее растянул собственный вес, и вы обнаружите, что если одна унция или один фунт или один определенный груз удлинил ее на одну линию, один дюйм или одну определен- ную длину, то две унции, два фунта или два груза растянут ее на две линии, два дюйма или две [меры] длины, три унции, фунта или груза — на три линии, дюйма или [меры] длины, и так далее. И это есть правило или закон природы, которому

следуют все формы возвращающего или упругого движения, происходит ли оно от растяжения или разрежения, уплотнения или сжатия.

Или возьмите часовую пружину (рис. 34, б) и сверните ее в спираль так, чтобы ни одна ее часть не касалась другой, затем запаситесь очень легким колесиком из латуни или чего-то подобного и укрепите его на оси, которая имеет две маленькие стальные опоры. На этих опорах очень ровно и плавно поверните край колесика так, чтобы маленькая шелковая нить могла быть накручена на него, а затем поместите это колесико в рамку, чтобы оно могло свободно двигаться на своих опорах. Закрепите центральный конец пружины вблизи отверстия опоры или центра рамки, в которой движется ось колеса, а другой конец [пружины] прикрепите к ободу колесика. Наматывая тонкую гибкую нить из шелка на край колеса, подвесьте маленькую легкую чашку весов, приспособленную для приема перегрузков, которые будут помещаться в нее, к концу нити. Оставляя колесико в его



Рис. 34

естественном положении, с помощью небольшого указателя, прикрепленного к рамке и направленного на обод колесика, сделайте отметку чернилами или чем-нибудь подобным на той части обода, куда направлен указатель. Поместите перегрузок в одну драхму в чашку, позвольте колесу успокоиться и сделайте другую отметку на ободе колеса, куда направлен указатель. Добавьте еще одну драхму, снова дайте колесу успокоиться и, как и раньше, отметьте чернилами то место на ободе, куда смотрит указатель. Добавьте третью драхму, повторите все, как раньше, и так в четвертый, пятый, шестой, седьмой, восьмой раз и т. д., позволяя колесу успокаиваться и отмечая несколько мест по указателю. Затем исследуйте расстояния между всеми этими отметками и, сравнивая их все вместе, вы найдете, что они равны друг другу, так что если [одна] драхма заставляет колесико повернуться на десять градусов, то две драхмы повернут его на двадцать, три — на тридцать, четыре — на сорок, пять — на пятьдесят [градусов] и так далее.

Или возьмите проволочную струну 20, 30 или 40 футов длинной, укрепите ее в верхней части гвоздем, а к нижнему концу подвесьте чашку весов для разновесов (рис. 34, а). С помощью ножек циркуля измерьте расстояние от дна чашки до земли или пола и запишите указанное расстояние; затем поместите перегрузки в чашку так же, как и в предшествующих

испытаниях. Измерьте несколько удлинений названной струны и запишите их. Сравните эти удлинения струны, и вы найдете, что они всегда будут относиться друг к другу, как вызвавшие их нагрузки.

То же самое будет обнаружено, если провести испытание с куском сухого дерева, которое будет изгибаться и восстанавливать [свою форму], если один его конец фиксировать в горизонтальном положении, а к другому подвешивать грузы, которые заставят его изгибаться вниз.

Способ исследования того же вопроса для объема воздуха, как для разрежения, так и для сжатия последнего, я уже опубликовал четырнадцать лет назад в моей «Микрографии», и поэтому мне нет необходимости давать какое-либо новое описание [этого способа]. <...>

Совершенно очевидно, что правило или закон природы для всякого упругого тела состоит в том, что его сила или способность восстанавливать свое естественное состояние всегда пропорциональны той же мере, на которую оно выведено из этого своего естественного состояния. <...>

Комментарий

Перевод с английского отрывков из работы Р. Гука выполнен С. Р. Филоновичем по изданию: *Early Science in Oxford*. Ed. by R. T. Gunter. Vol. 8. Oxford, 1931.

Lectures De Potentia Restitutiva, or of Spring Explaining the Power of Springing Bodies (London, 1678).

Речь идет о сочинении «Описание гелиоскопа и некоторых других приборов, изготовленных Робертом Гуком, членом Королевского общества». Гелиоскоп — астрономический инструмент для наблюдения Солнца.

Литература

- [1] Специальное собрание сочинений Р. Гука не издавалось. Большая часть его работ перепечатана в изданиях:
 - (a) *Early Science in Oxford*. Ed. by R. T. Gunter. Vols. 6—8. Oxford, 1930—1935.
 - (б) *The Posthumous Works of Robert Hooke*. Ed. by R. Waller. London, 1705.
 - (a) *Philosophical experiments and observations of Dr. Robert Hooke*. Ed. by W. Derham. London, 1667.
 - [2] Espinasse M. Robert Hooke. London, 1956.
 - [3] Centore F. F. Robert Hooke's contribution to mechanics. A study in seventeenth century natural philosophy. Haguet, 1970.
 - [4] Боголюбов Н. Н. Роберт Гук (1635—1703). М., 1984



О. Ремер

1644—1710

О скорости света

Вопрос о том, конечна или бесконечно велика скорость света, начал широко обсуждаться уже в первой половине XVII в. С одной стороны, это было связано с развитием оптики и попытками выяснить природу света, а с другой — со стремлением к решению физических проблем путем постановки количественных экспериментов. В 1638 г. Г. Галилей в книге «Беседы и математические доказательства ...» устами своих героев обсудил этот вопрос и предложил схему эксперимента для определения скорости света. На практике опыт, проведенный по схеме Галилея, не дал определенных результатов, однако Галилей, будучи сторонником представлений о конечности скорости света, справедливо указал, что при усовершенствовании методики проведения опыта его итог может оказаться другим. Значительным событием в истории физики стала теоретическая дискуссия между П. Ферма и Р. Декартом (а также его последователями) о скорости света, приведшая Ферма к выдвиганию «принципа наименьшего времени» для описания распространения света. В наши дни ясно, что с помощью экспериментальной техники XVII в. измерение скорости света в земных условиях было невозможно. Поэтому совершенно естественно, что доказательство конечности скорости света и первая оценка ее величины были получены в астрономии. Автором этого доказательства был датский ученый О. Ремер.

Олаф (Оле) Ремер родился в Ааргузе в Ютландии 25 сентября 1644 г. в семье купца. Образование он получил в Копенгагенском университете, где сначала изучал медицину, а затем занялся физикой и астрономией под руководством Э. Бартолина. В 1671 г. французский астроном Ж. Пикар, приехавший в Данию для определения географических координат знаменитой обсерватории Т. Браге, пригласил Ремера для работы в Парижской обсерватории. Ремер принял приглашение.

В Париже Ремер не только проводил разнообразные астрономические наблюдения, но и участвовал в решении ряда технических проблем, а также обучал математике наследника французского престола. Работая в Обсерватории, в 1676 г. он сделал открытие первостепенной важности — доказал конечность скорости света.

После возвращения на родину Ремер занял кафедру математики столичного университета и продолжил астрономические

исследования. Он создал первоклассную обсерваторию, где проводил наблюдения, позволившие определить положение свыше 1000 звезд, которые были впоследствии использованы для установления собственных движений ряда звезд. Ремер уделял много внимания созданию новых астрономических приборов. Он изобрел и изготовил пассажный инструмент, имевший точно разделенный круг, создал меридианный круг, усовершенствовал микрометр, построил ряд других инструментов. Авторитет Ремера в точном приборостроении был очень высок. Сам Лейбниц советовался с ним относительно оборудования обсерватории. К сожалению, инструменты Ремера погибли во время пожара.

Несмотря на увлечение научными исследованиями, Ремер принимал активное участие в общественной и политической жизни Дании. По поручению короля он выполнял множество поручений инженерного характера (был смотрителем дорог королевства, занимался вопросами строительства портов и т. д.). Кроме того, он разработал новую систему налогообложения, исполнял обязанности сенатора, а в конце жизни стал даже главой государственного Совета. Умер ученый 19 сентября 1710 г.

Установление Ремером конечности скорости света явилось «побочным продуктом» его наблюдений одного из спутников Юпитера. Эти наблюдения велись в надежде составить таблицу затмений спутника, которую можно было бы использовать для определения географической долготы точек земной поверхности на море. Сравнение местного времени начала или конца затемнения с табличным значением (определенным для фиксированной точки) позволило бы найти долготу места наблюдения. Во время наблюдений было обнаружено, что в затмениях первого спутника Юпитера наблюдаются отклонения от периодичности, которые Ремер объяснил конечностью скорости распространения света. В сентябре 1676 г. на заседании Парижской Академии наук он, руководствуясь этой идеей, предсказал, что затмение, которое должно было наблюдаться 9 ноября того же года, произойдет на 10 минут позже, чем следует из расчетов, не учитывающих время распространения света от Юпитера до Земли. Хотя предсказание Ремера блестяще подтвердилось, его вывод подвергся резкой критике со стороны директора Обсерватории Дж. Д. Кассини. Молодому ученому пришлось отстаивать свою точку зрения. Следует, однако, отметить, что большинство крупнейших ученых того времени, таких, как Х. Гюйгенс, Г. В. Лейбниц, И. Ньютон, разделяли взгляды Ремера и ссылались на его открытие. Отметим, что скорость света была первой фундаментальной постоянной, вошедшей в арсенал физических констант.

Доказательство, касающееся движения света

В течение долгого времени философы затруднялись решить с помощью какого-либо опыта, переносится ли действие света мгновенно на любое расстояние или это требует времени. Месье Ремер из Королевской Академии наук обнаружил способ, почерпнутый из наблюдений первого спутника Юпитера¹, с помощью которого он показал, что для [прохождения] расстояния примерно 3000 лье, т. е. приблизительно равного диаметру Земли, свету не требуется и одной секунды.

Пусть A [рис. 35] — Солнце, B — Юпитер, C — первый спутник Юпитера, который входит в тень планеты, чтобы выйти из нее в [точке] D , и пусть E, F, G, H, L, K — положения Земли на различных расстояниях.

Предположим, что с Земли, находящейся в L , вблизи второй квадратуры² Юпитера, виден его первый спутник во время выступления из тени в [точке] D , и затем спустя примерно 42 $\frac{1}{2}$ ч, т. е. после одного оборота этого спутника, когда Земля находится в точке K , он виден вновь возвращающимся в точку D . Ясно, что если свету требуется время, чтобы пройти расстояние LK , то спутник будет виден возвратившимся в точку D позже, чем если бы Земля оставалась в точке L . Таким образом, обращения этого спутника, наблюдаемые так по выступлениям из тени, будут запаздывать на такое время, которое требуется свету, чтобы пройти от L до K и наоборот, в другой квадратуре FG , где Земля приближается, идя навстречу свету, обращения [наблюдаемые] по вступлению в тень будут казаться настолько же укороченными, насколько обращения [наблюдавшиеся] по выступлению из тени казались удлиненными. И поскольку за 42 $\frac{1}{2}$ ч, которые этот спутник тратит, чтобы совершить приближенно одно обращение, расстояние между Землей и Юпитером в той или иной квадратуре изменится по меньшей мере на 210 диаметров Земли, то отсюда следует, что если бы для [прохождения] каждого диаметра Земли требовалась 1 с, то свету потребовалось бы 3 $\frac{1}{2}$ мин для прохождения каждого интервала FG , KL , что приведет к разнице примерно в половину четверти часа между двумя обращениями первого спутника, из которых одно наблюдается в FG , а другое — в KL , в то время как никакой ощутимой разницы не отмечается.

Однако из этого не вытекает, что свету совсем не требуется времени: ибо после более тщательного изучения вещей он обнаружил, что незаметное для двух обращений становится весьма значительным для многих [обращений], взятых вместе, и что, например, 40 оборотов, наблюдаемых со стороны [точки] F , были бы заметно короче, чем 40 других, наблюдаемых с противоположной стороны, в каком бы месте зодиака ни оказался

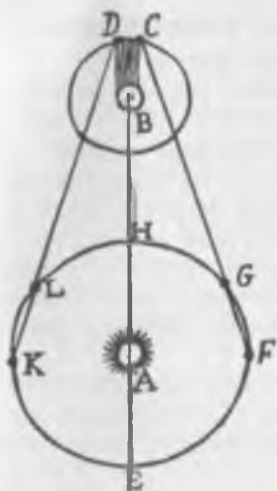


Рис. 35

Юпитер. По этой причине необходимо 22 [минуты] для [прохождения] интервала *HE*, который является удвоенным расстоянием от нас до Солнца³.

Необходимость этого нового уравнения для запаздывания света устанавливается всеми наблюдениями, которые были сделаны в Королевской Академии и в Обсерватории на протяжении восьми лет. Они были вновь подтверждены выступлением из тени первого спутника Юпитера, наблюдавшимся в Париже 9 ноября этого года в $5^h 35^m 45^s$ вечера, на 10 мин позже, чем следовало ожидать, рассчитывая его на основе тех [наблюдений], что были сделаны в августе, когда Земля была гораздо ближе к Юпитеру, что месье Ремер предсказывал в Академии в начале сентября.

Но чтобы устранить всякие сомнения, что это неравенство вызвано запаздыванием света, он показывает, что оно не может происходить из-за какого-либо эксцентриситета или другой причины из тех, которые обычно приводят, чтобы объяснить нерегулярности в движении Луны и других планет.

Комментарий

Перевод с французского работы О. Ремера выполнен С. Р. Филоновичем. Перевод дается по публикации: *Demonstration touchant le mouvement de la lumiere trouvé par M. Römer de l'Academie Royale des Sciences. Journal des Sçavans du lundy 7 Decembre 1676, p. 233—236.*

¹ Речь идет о спутнике Юпитера Ио.

² Квадратурой в данном случае называется положение Юпитера, при котором направления Земля — Солнце и Солнце — Юпитер образуют угол 90°.

³ Причина, по которой Ремер указывает не саму скорость света, а время, за которое свет проходит диаметр земной орбиты, состоит в том, что во второй половине XVII в. этот диаметр не был еще определен с необходимой точностью.

Литература

Собрание работ О. Ремера не издавалось.

- [1] Strömgrön E. Ole Römer, som astronom. København, 1944.
- [2] Römer et la vitesse de la lumière. Paris, 1978.
- [3] Cohen I. B. Römer and the first determination of the velocity of light. N. Y., 1944.
- [4] Филонович С. Р. Самая большая скорость. М., 1983 гл. II.



Х. Гюйгенс

1629—1695

О проблемах механики. О теории света

Две области физики — механика и оптика — в наибольшей степени способствовали формированию классической науки. Это обстоятельство подтверждается тем, что практически все крупнейшие естествоиспытатели XVII в., работавшие в области физики (И Кеплер, Г. Галилей, Р. Декарт, Р. Гук, И. Ньютон), занимались как проблемами механики, так и вопросами оптики. Среди ученых — младших современников Галилея и старших современников Ньютона — особое место занимает голландский физик и математик Х. Гюйгенс, чьи работы в области механики оказали влияние на создателя «Математических начал натуральной философии», а подход к вопросам оптики в виде «принципа Гюйгенса» сохранился в современной науке.

Христиан Гюйгенс родился 14 апреля 1629 г. в Гааге в знатной и богатой семье. Получив юридическое образование в Лейденском и Бредском университетах, Гюйгенс решил все же посвятить себя математике и физике, наклонности к которым проявились у него еще в детстве.

Свой творческий путь он начинает как математик, находясь под сильным влиянием трудов Архимеда и Декарта. Его первые работы посвящены классическим проблемам: «Теоремы о квадратуре гиперболы, эллипса и круга и центра тяжести их частей» и «Открытие о величине круга». В последнем сочинении он сумел, используя алгебраический подход, уточнить значение числа « π ». Написанный им в 1657 г. трактат «О расчетах при азартной игре» является одной из первых работ по теории вероятности.

Увлечшись в молодости шлифованием стекол, Гюйгенс совершенствовал свою технику на протяжении всей жизни. Ему удалось создать линзы с громадными фокусными расстояниями в десятки метров (в том числе в 54 и 63 м), сконструировать окуляр, названный впоследствии его именем и используемый до настоящего времени.

Усовершенствовав конструкцию телескопа, Гюйгенс, подобно Галилею, сам проводил астрономические наблюдения, причем ему удалось сделать ряд астрономических открытий, таких, как наблюдение спутника и установление строения Сатурна, обнаружение шапок на Марсе, полос на Юпитере, туманности в созвездии Ориона. Для измерения видимого диаметра планет ученый сконструировал астрономический микрометр. Свои открытия он описал в книге «Система Сатурна», вышедшей в 1659 г.

Астрономические открытия принесли Гюйгенсу международную известность. Его избирают первым иностранным членом только что созданного Лондонского Королевского общества, а в 1665 г. приглашают в качестве почетного члена Парижской Академии наук. На протяжении многих лет он живет в Париже, и Франция становится его второй родиной. Он способствует поднятию престижа французской науки, завязывает международные научные связи, в частности с английскими физиками Бойлем, Гуком, Ньютоном, немецким математиком Лейбницем. В 1681 г., когда начались враждебные действия католической Франции по отношению к протестантской Голландии, Гюйгенс уезжает на родину, которую не покидает уже до самой смерти (8 июля 1695 г.).

Астрономические наблюдения, а также насущная для Нидерландов — морской державы — проблема определения долгот в открытом море настоятельно требовали определения точного времени. Гюйгенс берется за решение этой задачи, и 16 июня 1657 г. Генеральные штаты Нидерландов закрепляют за ученым приоритет изобретения маятниковых часов. В качестве регулятора, обеспечивающего равномерность хода часов, Гюйгенс использовал маятник. Идею таких часов предложил еще Галилей в последние годы своей жизни, но реализовать эту идею ни ему, ни его сыну не удалось. Гюйгенс пришел к своему изобретению, по-видимому, совершенно независимо от Галилея, хотя после публикации в 1658 г. трактата «Маятниковые часы» некоторые его современники высказывали сомнение в его приоритете. В трактате была изложена теория математического и физического маятников, приведена формула для расчета периода колебаний маятника. Кроме того, Гюйгенс рассмотрел теорию таутохронного маятника, период колебаний которого не зависит от амплитуды. Ученый доказал, что для обеспечения таутохронности центр масс должен двигаться по циклоиде. В конце трактата Гюйгенс приводит теоремы о центробежной силе и ее формулу без вывода. В небольшой работе «О центробежной силе», написанной вскоре после «Маятниковых часов», он дал подробный вывод этой формулы. Важной особенностью этой работы является использование принципа относительности для доказательства ряда теорем.

Важным вкладом в развитие динамики стал мемуар «О движении тел под влиянием удара». Проблема соударения тел была актуальной во второй половине XVII в., поскольку она касалась

одного из простейших примеров взаимодействий тел, которые являются основным предметом динамики. Решение проблемы удара было найдено почти одновременно Валлисом, Реном и Гюйгенсом. В ответ на запрос Лондонского Королевского общества последний вслед за английскими учеными представил 7 января 1669 г. подробное доказательство теорем, касающихся удара упругих тел и правила вычисления их скоростей после взаимодействия. Королевское общество несправедливо замолчало работу Гюйгенса, опубликовав в январе 1669 г. в «Philosophical Transactions» только статьи Рена и Валлиса. Мемуар Гюйгенса «О движении тел под влиянием удара» увидел свет (как и мемуар о центробежной силе) в посмертных трудах, изданных в Лейдене в 1703 г.

Крупнейшим вкладом Гюйгенса в развитие физики была его теория света. Свои результаты по оптике Гюйгенс излагал неоднократно на заседаниях Парижской академии еще в 1678 г., но лишь в 1690 г., достигнув в своих исследованиях необходимой ясности и законченности, он издал «Трактат о свете». В этом небольшом, но очень глубоко сочинении Гюйгенс на основе представления об эфире и движении его частиц смог вывести законы отражения и преломления, а также объяснить особенности двойного лучепреломления, открытого Э. Бартолином в 1669 г. Основой рассмотрения оптических явлений служит знаменитый «принцип Гюйгенса», согласно которому любая точка волнового фронта становится источником вторичных возмущений в эфире, а их огибающая образует новый волновой фронт. Следует отметить, что Гюйгенс не вводил гипотезу о периодичности световых возмущений, поэтому его теорию света лишь условно можно называть «волновой». Несмотря на большие достижения теории Гюйгенса, невозможность объяснения в ее рамках прямолинейности распространения света и некоторых других оптических эффектов привела к тому, что представления Гюйгенса о свете не получили всеобщего признания и были возрождены (конечно, на новой основе) лишь в начале XIX в.

Мировоззрение Гюйгенса складывалось под впечатлением успехов, одерживаемых механикой в объяснении природных явлений. Его можно считать одним из родоначальников механистического подхода к физике. В «Трактате о свете» он писал: «Истинная философия сводит все причины явлений природы к механическим причинам. Именно так надо поступать, по моему мнению, или же вообще оставить всякую надежду, понять что-либо в физике».

Гипотеза I. Тело, приведенное в движение, при отсутствии противодействия продолжает свое движение неизменно с той же скоростью и по прямой линии.

Гипотеза II. Не входя в рассмотрение причины отскакивания твердых тел¹ после соударения, принимаем следующее положение:

Если два одинаковых тела, движущихся с одинаковой скоростью навстречу друг другу, сталкиваются прямым ударом, то каждое из них отскакивает назад с той же скоростью, с какой ударились².

Удар называется прямым, если само движение и соприкосновение происходит по прямой линии, соединяющей центры тяжести тел.

Гипотеза III. Движение тел, а также их одинаковые или разные скорости надо рассматривать как относительные по отношению к другим телам, которые мы считаем покоящимися, не учитывая того, что как те, так и другие тела могут участвовать в другом, общем движении. Поэтому два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало.

Если, например, пассажир корабля, движущегося равномерно, вызовет удар двух равных шаров с одинаковыми, опять-таки по отношению к пассажиру, скоростями, то эти шары отскочат с одинаковыми по отношению к пассажиру и кораблю скоростями, совсем так, как если бы пассажир вызвал удар этих шаров на неподвижном корабле или на берегу³.

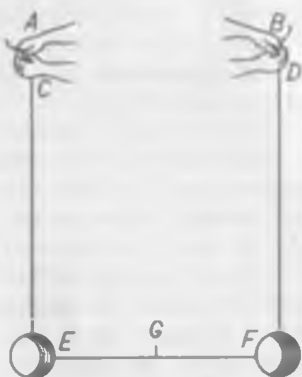
Положив такие гипотезы в основу рассмотрения удара равных тел, выведем законы их воздействия друг на друга. В дальнейшем в должном месте, мы введем еще новые гипотезы, которые нам потребуются при рассмотрении соударения неодинаковых тел.

Предложение I. Если с покоящимся телом соударяется одинаковое с ним тело, то ударившееся тело приходит в состояние покоя, а покоящееся тело приходит в движение со скоростью ударившегося о него.

Представим себе, что лодка плывет у берега по течению. И притом так близко к берегу, что пассажир лодки может подать руки человеку, стоящему на берегу. Пусть пассажир лодки держит в своих руках A и B [рис. 36] два одинаковых, подвешенных на нитях тела E и F . Расстояние EF делится пополам в точке G . Пассажир лодки, двигая свои руки навстречу одна другой с одинаковой скоростью по отношению к себе и лодке, вызовет удар шаров, которые затем отскочат один от другого с одина-



Рис. 36



ковыми скоростями относительно пассажира и лодки (по второй гипотезе).

Пусть лодка движется влево со скоростью GE , т. е. с той скоростью, с которой рука A движется вправо. Ясно, что относительно берега и человека, стоящего на берегу, рука A пассажира находится в покое, а рука B с точки зрения того же человека, движется со скоростью FE , удвоенной по сравнению с GE или FG . Представим себе теперь, что человек, стоящий на берегу, схватил своей рукой C руку A пассажира и вместе с тем конец нити, на которой висит шар E , а другой рукой D — руку пассажира B , держащую нить, на которой подвешен шар F [рис. 36]. Тогда произойдет следующее: в то время как пассажир лодки двигает шары навстречу один другому с одинаковой скоростью (относительно себя и лодки), человек, стоящий на берегу, ударяет по неподвижному шару E шаром F , движущимся со скоростью FE . Для пассажира лодки,двигающего шары указанным способом, не имеет никакого значения то обстоятельство, что человек на берегу схватил его руки и концы нитей, так как человек на берегу только участвует в движении, но движению не мешает. По той же причине человеку на берегу, который ударяет шаром F по неподвижному шару E , не мешает сплетение рук с пассажиром лодки, если только A и C покоятся относительно берега и человека, стоящего на берегу, а руки D и B движутся с одинаковой скоростью FE . Ввиду того что, как сказано, шары E и F отскакивают с одинаковыми скоростями, а именно: шар E — со скоростью GE , а шар F — со скоростью GF относительно лодки и пассажира, а сама лодка за это время проплывает влево со скоростью GE или FG , то относительно берега и человека, стоящего на берегу, шар F после удара останавливается, а шар E , с той же точки зрения, движется влево с двойной скоростью FE , той же самой, с которой человек на берегу двигал шар F к шару E . Таким образом, мы доказали относительно человека, стоящего на берегу, который ударял по неподвижному шару другим шаром, одинаковым с первым, что первоначально движущийся шар потерял при ударе все свое дви-

жение, а первоначально неподвижный шар приобрел все движение. Это и требовалось доказать.

Предложение II. Если два одинаковых тела соударяются разными скоростями, то они при ударе обмениваются скоростями.

Пусть тело E движется направо со скоростью EH [рис. 37], а одинаковое с ним тело F движется ему навстречу с меньшей скоростью FH . Следовательно, они встретятся в H . Я утверждаю, что после удара тело E будет двигаться влево со скоростью FH , а тело F — вправо со скоростью EH .

Представим себе человека, стоящего на берегу реки и следующим образом производящего указанные движения тел. Он держит в руках C и D концы нитей, на которых висят тела, и сближает руки со скоростями EH и FH , сближая, таким образом, и тела E и F .

Пусть расстояние EF делится пополам в точке G . Представим себе лодку, движущуюся вправо со скоростью GH , и на лодке человека. По отношению к этому человеку скорость шара E будет только EG , а скорость шара F будет FG .

Таким образом, относительно человека в лодке оба шара стремятся к столкновению с равными скоростями. Пусть человек в лодке схватил своими руками A и B руки C и D человека, стоящего на берегу, и вместе с руками — концы нитей [с грузами]. Тогда человек, стоящий на берегу, движет шары навстречу один другому со скоростями EH и HF , а человек в лодке — с одинаковыми скоростями EG и FG . Следовательно, с точки зрения человека в лодке оба шара отскочат один от другого с той же скоростью (гипотеза II), а именно: E отскочит со скоростью GE , а F — со скоростью GF . В то же время лодка движется вправо со скоростью GH . Поэтому относительно берега и человека на берегу F будет иметь скорость EH , составленную из GF и GH , а E — скорость HF , разность GE и GH . Следовательно, относительно человека на берегу, вызывающего соударение шаров E и F со скоростями EH и FH , шар E после удара отскакивает со скоростью FH , а шар F — со скоростью EH , что и требовалось доказать.

Если оба тела движутся вправо и притом E со скоростью EH , а F с меньшей скоростью FH [рис. 38], то тело E нагонит тело F и они встретятся в H . Я утверждаю, что после удара F будет продолжать движение со скоростью EH , а E — следовать со скоростью FH . Доказательство подобно вышеприведенному.

Гипотеза IV. Если большее тело соударяется с меньшим, находящимся в покое, то оно сообщает последнему некоторое движение и, следовательно, теряет несколько в своем движении (...)

Гипотеза V. Если при соударении двух твердых, движущихся навстречу друг другу тел обнаруживается, что одно из них сохранило все движение, то и другое не выигрывает и не теряет ничего в движении.

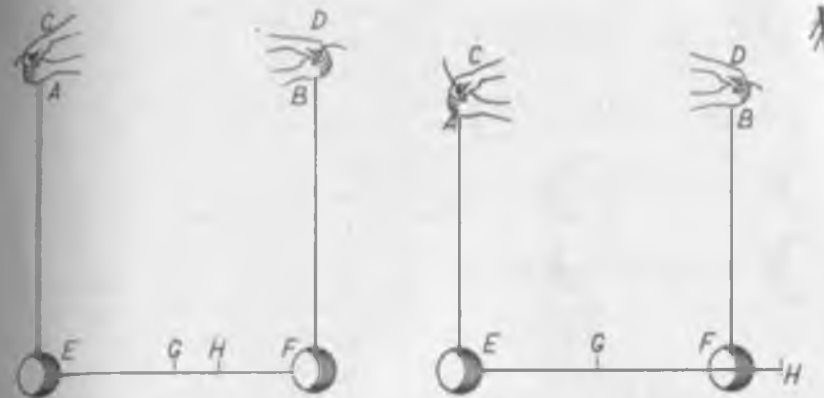


Рис. 37

Рис. 38

Предложение IV. Если два тела сталкиваются, то их относительная скорость удаления после удара та же, что и относительная скорость сближения до удара.

Для одинаковых тел это очевидно по теореме II. Пусть тела будут не равны и пусть сначала рассматривается случай, когда на покоящееся большое тело движется меньшее B со скоростью BA , направленной вправо [рис. 39].

Пусть для пробега BA телу B потребовалось некоторое время.

Я утверждаю, что и после удара через такой же промежуток времени тела будут разделены промежутком BA . Тело A , несомненно, получит от удара некоторую скорость AC . Эта скорость должна быть меньше, чем BA , так как только при равенстве A и B тело A приобрело бы скорость BA (предложение I).

Разделим AC пополам в точке D , и пусть $AE = AD$. Предположим, что наши движения происходят в лодке, движущейся влево со скоростью DA . Тогда ясно, что тело A , с точки зрения наблюдателя на берегу, двигалось до удара влево со скоростью DA , а после удара — вправо со скоростью DC , или AD , так как относительно лодки оно после удара будет двигаться вправо со скоростью AC , а лодка имеет скорость DA , направленную влево.

Таким образом, тело A , с точки зрения наблюдателя на берегу, сохраняет свою скорость до и после удара. Следовательно, и B , согласно гипотезе V, не должно ничего терять в скорости. Но до удара тело B двигалось относительно берега со скоростью BA вправо, так как в лодке B имело скорость BA вправо, а лодка — скорость DA или AE в обратную сторону. Следовательно, и после удара B должно двигаться относительно берега со скоростью BE , но влево. Движению вправо мешает более медлен-



Рис. 39

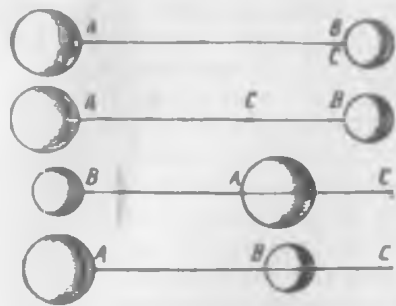


Рис. 40

ное движение тела A . Так как после удара B движется относительно берега влево со скоростью EB , а A вправо со скоростью AE или EA , то оба тела должны удаляться друг от друга со скоростью, составленной из BE и EA , т. е. со скоростью BA . Это будет справедливо не только относительно берега, но и относительно лодки, так как оба тела действительно удаляются друг от друга с этой скоростью. То, что проис-

ходит с телами при столкновении в движущейся лодке, будет происходить таким же образом и вне лодки в любом другом месте.

После доказательства разобранного случая легко доказываются и все остальные. Остаются еще четыре возможности: или поконится меньшее тело, или оба тела движутся навстречу одно другому, или меньшее тело следует за большим с большей скоростью, или наоборот.

Все эти случаи можно рассмотреть одновременно. Пусть, как и раньше, тело A больше тела B [рис. 40] и движется со скоростью AC ; B или находится в покое, или движется со скоростью BC . Тела, движущиеся таким образом, имеют относительную скорость AB .

Я утверждаю, что тела после удара разойдутся с той же относительной скоростью AB .

Предположим опять, что эти движения происходят в лодке, движущейся со скоростью CA , т. е. с той же скоростью, которой обладает тело A , но в обратную сторону. Тогда ясно, что относительно берега A неподвижно, а B во всех случаях столкнется с A со скоростью BA . A больше B . Таким образом, мы приходим к вышеразобранному случаю, из которого следует, что тела относительно берега должны разойтись со скоростью AB . Следовательно, и относительно лодки и в действительности они отскакивают одно от другого с этой скоростью. (...)

О центробежной силе

(...) Рассмотрим теперь, какое и с какой силой стремление удалиться от центра имеют тела, прикрепленные к вращающейся нити или колесу.

Пусть колесо BG [рис. 41] движется в горизонтальной плоскости около центра A . Прикрепленный к ободу шарик, пришедший в B , имеет стремление продолжать свое движение по прямой BH , касательной к колесу. В этом направлении шарик начал бы двигаться, если бы освободился от колеса. Шарик будет продолжать это движение неизменно, если только он не будет отклонен

вниз силой тяжести или же если его движению не воспрепятствует столкновение с другим телом. На первый взгляд трудно понять, почему тогда существует натяжение нити AB , если тело B стремится двигаться по прямой BH , перпендикулярной длине нити. Но все объясняется следующим образом. Представим себе это колесо таким большим, чтобы оно легко могло увлечь с собой человека, стоящего на окружности и, конечно, прикрепленного в B так, чтобы его не могло выбросить с колеса.

Пусть этот человек держит в руках нить со свинцовым грузом на конце. Благодаря вращению нить будет натянута таким же образом и с одинаковой силой, [независимо от того] будет ли она удерживаться в руке или продолжена до центра A и там закреплена. Причину натяжения нити мы теперь легче поймем. Возьмем равные дуги BE и EF , малые по сравнению с длиной окружности, например в сотую долю окружности или еще меньше. Эти дуги человек на колесе пройдет за одинаковое время. А свинец, если его освободить, за те же промежутки времени прошел бы по касательной равные этим дугам длины BC и CD . Правда, точки C и D придутся не на продолжение AE и AF , а немного правее, ближе к B . Теперь ясно, что свинец, будучи свободен, находился бы в C , когда человек придет в E , и в D , когда человек придет в F . (...)

Если бы точки C , D лежали на продолжении прямых AE и AF , то свинец стремился бы удалиться от человека по линии, идущей от центра через человека, причем в первом промежутке времени он удалился бы на EC , во втором — на FD , и т. д. Эти расстояния растут как ряд квадратов начиная с единицы: 1, 4, 9, 16 и т. д.

Поэтому можно считать, что в самом начале движения этих отступлений от ряда не будет. Следовательно, это стремление совершенно подобно тому, которые мы чувствуем, когда держим шарик за нить, так как шарик тоже стремится удалиться в направлении нити таким же ускоренным движением, так что в конце первого промежутка времени тело пройдет малое расстояние 1, в конце второго промежутка 4 таких малых расстояния, в конце третьего — 9 малых расстояний, и т. д. (...)

Достаточно, чтобы эта прогрессия осуществлялась в самом начале движения по кривой. Потом шар может двигаться по какому угодно другому закону, что не имеет отношения к стремлению, существующему до начала движения. Указанное стремление совершенно сходно с тем стремлением, с каким подвешенные тела стремятся двигаться вниз.

Отсюда мы заключаем, что центробежные силы разных тел,

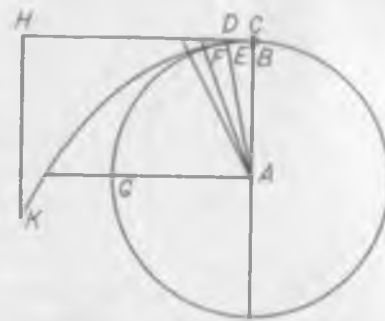


Рис. 41

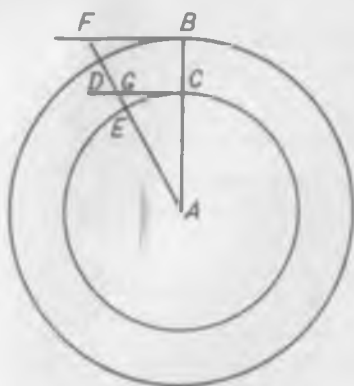


Рис. 42

движущихся по одинаковым кругам с одинаковой скоростью, относятся друг к другу, как веса тел или как количества материи. Как все весомые тела стремятся падать вниз с одинаковой скоростью и одинаковым ускоренным движением, и притом это стремление обладает тем большей силой, чем они больше, так должно быть и с теми телами, которые стремятся удалиться от центра, так как их стремление подобно тому, которое происходит от тяготения. Но в то время как стремление падать у одного и того же шара всегда одно и то же, всякий раз, когда он

подвешен на нити, центробежное стремление разное в зависимости от скорости вращения. Остается еще исследовать величину стремления в зависимости от скорости. Сначала мы определим, с какой скоростью надо вращать колесо, чтобы натяжение нити шаром было такое же, какое получается при подвешивании того же шара на нити.

Предложение I. Если два одинаковых тела описывают в одинаковое время неодинаковые окружности, то отношение центробежной силы на большем круге к центробежной силе на меньшем равно отношению диаметров или длин окружностей.

Даны две окружности с радиусами AB , AC , по которым в одинаковое время совершают оборот два одинаковых [рис. 42] тела. Возьмем на двух окружностях две очень маленькие подобные дуги BD и CE . Отложим на касательных, проведенных в B и C , отрезки BF и CG , равные соответственно BD и CE . Тело, вращающееся на круге BD , имеет стремление удалиться от центра в направлении продолжения радиуса равномерно ускоренным движением и при этом движении в определенный промежуток времени пройти путь DF . В свою очередь, тело, вращающееся по дуге CE , имеет также стремление удалиться от центра и так, чтобы за то же время пройти путь DF . Таким образом, во сколько раз отрезок DF больше отрезка EG , во столько раз натяжение нити у большей окружности больше, чем у малой. Ясно, что $FD : GE = BF : CG$, т. е. как $AB : AC$. Следовательно, центробежная сила на большей окружности во столько раз больше центробежной силы на меньшей окружности, во сколько длина окружности или диаметр большего круга больше диаметра или длины окружности меньшего круга.

Предложение II. Если два равных тела вращаются на одинаковых дугах или колесах с разными скоростями, но оба с равномерным движением, то сила удаления от центра у более быстрого тела относится к силе более медленного, как квадраты их скоростей. Это значит: если протянуть нити от центра вниз и подвесить

гири, как раз уравнивающие центробежную силу, то эти гири будут относиться друг к другу, как квадраты скоростей.

По кругу с центром A и радиусом AB [рис. 43] вращаются два одинаковых тела, сначала одно с большей скоростью, потом другое с меньшей скоростью. Скорости представлены отрезками O и N .

Возьмем две очень маленькие дуги, BE и BF , такие, что $BE : BF = N : O$, тогда несомненно, что более медленное тело пройдет дугу BE , в то время как более быстрое пройдет дугу BF . Отложим на касательной BD отрезок BC , равный BE , и отрезок BD , равный BF . Итак, установлено, что каждое из двух тел имеет стремление удалиться от центра ускоренным движением и притом так, что более медленное тело стремится удалиться от окружности на расстояние EC и более быстрое в то же время — на FD . Более быстрое тело тянет с большей силой, чем тело более медленное, в отношении $DE : EC$. Так как мы взяли очень малые дуги, то отношение $DE : EC$ равно отношению $DB^2 : CB^2$, как мы раньше разъяснили. Но $DB : BC = FB : BE = O : N$; следовательно, $FD : EC = O^2 : N^2$ и в таком же отношении находятся центробежные силы более быстрого и более медленного тела, что и требовалось доказать. (...)

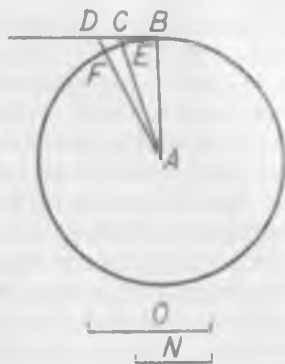


Рис. 43

**Трактат о свете,
в котором объяснены причины
того, что с ним происходит
при отражении и при преломлении,
в частности при странном
преломлении исландского
кристалла**

Предисловие

(...) Доказательства, приводимые в этом трактате, отнюдь не обладают той же достоверностью, как геометрические доказательства, и даже весьма сильно от них отличаются, так как в то время, как геометры доказывают свои предложения с помощью достоверных и неоспоримых принципов, в данном случае принципы подтверждаются при помощи получаемых из них выводов. Природа изучаемого вопроса не позволяет, чтобы это происходило иначе. Все же при этом можно достигнуть такой степени правдоподобия, которая часто вовсе не уступает полной очевидности. Это случается именно тогда, когда вещи, доказанные с помощью этих предполагаемых принципов, совершенно согласуются

с явлениями, обнаруживаемыми на опыте, особенно когда таких опытов много и, что еще важнее, главным образом, когда открываются и предвидятся новые явления, вытекающие из применяемых гипотез, и оказывается, что успех опыта в этом отношении соответствует нашему ожиданию. Если в проведенном мной исследовании все эти доказательства правдоподобия имеются, а мне представляется, что дело как раз так и обстоит, то это должно служить весьма сильным подтверждением успеха моего исследования, и вряд ли положение вещей может значительно отличаться от того, каким я его изображаю. <...>

Глава I

О лучах, распространяющихся прямолинейно

<...> Нельзя сомневаться в том, что свет состоит в движении какого-то вещества. Так, если обратить внимание на его происхождение, то оказывается, что здесь, на земле, его порождают главным образом огонь и пламя, которые, без сомнения, содержат в себе находящиеся в быстром движении тела. Это подтверждается тем, что огонь и пламя растворяют и плавят многие другие и даже самые твердые тела. Если рассмотреть действия, им производимые, то можно заметить, что когда свет собран вместе с помощью, например, вогнутых зеркал, он обладает свойством сжигать, как огонь, т. е. он разъединяет отдельные части тел. Последнее обстоятельство служит убедительным признаком движения, по крайней мере для истинной философии, в которой причину всех естественных явлений постигают при помощи соображений механического характера. По моему мнению, так и следует поступать, в противном случае приходится отказаться от всякой надежды когда-либо и что-нибудь понять в физике. <...>

<...> Как мною выше было сказано, звук делает в то же время за 1 секунду только 180 туазов, значит, скорость света более чем в 600 000 раз больше скорости звука. И все же это нечто совсем отличное от мгновенного распространения, так как разница здесь такая же, как между конечной вещью и бесконечной. Постепенное движение света оказывается, таким образом, подтвержденным, а отсюда следует, как я уже сказал, что это движение, так же как и звук, распространяется сферическими волнами³.

Но если в этом отношении движения света и звука сходны, то во многих других отношениях они расходятся. Так, они различаются: начальным возбуждением причиняющего их движения материей, в которой это движение распространяется, и способом, которым оно передается. В самом деле, известно, что возбуждение звука производится внезапным сотрясением всего тела или значительной его части, что возмущает весь смежный с ним воздух. Но движение света должно зарождаться от каждой точки

светящегося тела; тогда, как это лучше выяснится из последующего, смогут быть видимы все отдельные части светящегося тела. И я думаю, что это движение может лучше всего послужить для объяснения, если предположить, что те из светящихся тел, которые, как пламя и, по-видимому Солнце и звезды, являются жидкими, состоят из плавающих в значительно более утонченной материи частиц. Эта материя приводит их в весьма быстрое движение и заставляет ударяться о частицы окружающего их эфира, причем эти последние значительно меньше первых. Что же касается твердых светящихся тел, как уголь или раскаленный на пламени металл, то у них рассматриваемое движение называется сильным сотрясением частиц металла или дерева, причем те частицы, которые находятся на поверхности, также ударяются о частицы эфирной материи. Впрочем, движение, возбуждающее свет, должно быть значительно более резким и быстрым, чем то, которое производит звук. Ведь мы не замечаем, чтобы содрогание звучащего тела могло произвести свет, точно так же как движением руки нельзя получить свет. (...)

(...) Ничто не мешает нам считать частицы эфира состоящими из материи, сколь угодно приближающейся к совершенной твердости и сколь угодно быстро восстанавливающей свою форму. Нам нет надобности исследовать для этого здесь причины этой твердости и упругости, так как рассмотрение их завлекло бы нас слишком далеко от нашего предмета. Я все же укажу здесь мимоходом, что частицы эфира, несмотря на их малость, можно себе представить состоящими еще из других частиц и что упругость их заключается в очень быстром движении тонкой материи, которая проходит сквозь них со всех сторон и заставляет их ткань располагаться так, чтобы она позволяла этой очень тонкой материи проходить через нее самым легким и свободным образом. Это согласуется с объяснением, которое дает упругости Декарт, но только я не предполагаю, как он, существования пор в форме полых круглых каналов. И не нужно думать, что в этом имеется что-нибудь нелепое или невозможное. Наоборот, представляется весьма вероятным, что природа как раз и пользуется этой бесконечной последовательностью частиц различных размеров, обладающих различной скоростью, чтобы производить такое множество удивительных явлений.

Но если бы даже мы не знали истинной причины упругости, все же мы постоянно видим, что этим свойством обладают многие тела; поэтому нет ничего странного в предположении, что им обладают также и весьма маленькие невидимые тела, как те, что составляют эфир. Если и желать найти какой-нибудь другой способ последовательной передачи движения света, то все же не отыщется такого, который бы лучше, чем упругость, согласовывался с равномерностью распространения движения, потому что если бы движение по мере удаления от источника света и распределения его по все большему количеству материи замедлялось, то на больших расстояниях оно не могло бы сохранить свою боль-



Рис. 44

шую скорость. Если же предположить существование упругости у эфирной материи, то ее частицы будут обладать свойством восстанавливать свою форму одинаково быстро, независимо от того, будет ли воздействие на них сильным или слабым, и, таким образом, распространение света будет постоянно сохранять одну и ту же скорость. <...>

Следует подробнее рассмотреть происхождение этих волн и способ их распространения. Прежде всего из того, что было сказано о происхождении света, следует, что каждая маленькая часть какого-нибудь светящегося тела, как Солнце, свеча или раскаленный уголь, порождает свои собственные волны, центром которых она и является. Так, если в пламени свечи [рис. 44] отметить точки *A*, *B* и *C*, то концентрические круги, описанные около каждой из них, представят собой идущие от них волны. То же самое следует представить себе вокруг каждой точки как поверхности, так и внутренней части пламени.

Так как удары в центрах этих волн совершаются без определенной последовательности, то не нужно представлять себе, что сами волны следуют друг за другом на одинаковых расстояниях. Если на нашем рисунке эти расстояния показаны одинаковыми, то это скорее должно изображать передвижение одной и той же волны за одинаковые промежутки времени, чем несколько волн, исходящих из одного центра.

Впрочем, все это огромное количество волн, пересекающихся, не сливаясь и не уничтожая друг друга, отнюдь не являются непостижимым, раз известно, что одна и та же частица материи может служить для распространения нескольких волн, приходящих с разных и даже противоположных сторон, причем не только в том случае, когда ее толкают удары, близко следующие друг за другом, но даже и тогда, когда удары действуют на нее одновременно; основанием этого служит постепенное распространение движения.

Это может быть доказано на ряде одинаковых шаров из твердого вещества, о которых говорилось выше. Если одновременно ударить по ряду с двух противоположных концов равными шарами *A* и *D* [рис. 45], то каждый из них отскочит с той же скоростью, с какой он шел, а весь ряд останется на месте, хотя движение и прошло по всей длине его в том и другом направлениях. И если эти противоположно направленные движения встречаются в среднем шаре *B* или каком-либо другом шаре *C*, то соответствующий шар должен сжаться и выпрямиться в две стороны и, таким образом, в одно и то же мгновение послужить для передачи этих двух движений.



Рис. 45

Сначала может показаться очень странным и даже невероятным, что волнообразное движение, производимое столь малыми движениями и тельцами, может распространяться на такие огромные расстояния, как, например, расстояние от Солнца или от звезд до нас. Действительно, сила этих волн должна ослабевать по мере их удаления от своего источника, так что каждая из них в отдельности, несомненно, теряет способность воздействовать на наше зрение. Но это перестает быть удивительным, если принять во внимание, что бесконечное число волн, исходящих, правда, из различных точек светящегося тела, на большом расстоянии от него соединяются для нашего ощущения только в одну волну, которая, следовательно, и должна обладать достаточной силой, чтобы быть воспринятой. Таким образом, то бесконечное число волн, которые одновременно нарождаются во всех точках неподвижной звезды, быть может, такой же большой, как и Солнце, для ощущения представляется только одной волной, которая вполне может быть достаточно сильной, чтобы вызвать впечатление в наших глазах. Кроме того, из каждой светящейся точки вследствие частых столкновений частиц, которые в этих точках ударяют в эфир, приходят многие тысячи волн в самое короткое время, которое только можно себе вообразить, а это делает их действие еще более чувствительным.

По поводу процесса образования этих волн следует еще отметить, что каждая частица вещества, в котором распространяется волна, должна сообщать свое движение не только ближайшей частице, лежащей на проведенной от светящейся точки прямой, но необходимо сообщает его также и всем другим частицам, которые касаются ее и препятствуют ее движению. Таким образом, вокруг каждой частицы должна образоваться волна, центром которой она является. Так, если *DCF* [рис. 46] — волна, исходящая из светящейся точки *A*, ее центра, то частица *B*, одна из тех, которые находятся в сфере *DCF*, производит свою отдельную волну *KCL*, которая коснется волны *DCF* в *C* в тот же момент, когда главная волна, исходящая из точки *A*, достигнет *DCF*. И ясно, что только точка *C* волны *KCL*, т. е. та, которая находится на прямой, проведенной через *AB*, коснется волны *DCF*. Таким же образом остальные частицы, заключенные в сфере *DCF*, как *bb*, *dd* и т. д., создадут каждая свою волну. Но каждая из этих волн может быть только бесконечно слабой сравнительно



Рис. 46

с волной DCF , образованию которой содействуют все остальные волны той частью своей поверхности, которая наиболее удалена от центра A . {...}

Глава 2 Об отражении

Объяснив явление световых волн, распространяющихся в однородной среде, мы исследуем затем, что происходит с ними при встрече с другими телами. Сперва мы покажем, как этими же волнами объясняется отражение света и почему при нем сохраняется равенство углов. Пусть AB [рис. 47] — плоская полированная поверхность какого-нибудь металла, стекла или другого тела, которую я сначала приму за совершенно гладкую (о неровностях, от которых она не может быть свободна, я скажу в конце этого доказательства), и пусть прямая AC , наклоненная к AB , представляет собой часть световой волны, центр которой будет так далеко, что эта часть AC может быть принята за прямую линию. Я рассматриваю все это как бы в одной плоскости, представляя себе, что плоскость, в которой находится это изображение, пересекает сферу волны через ее центр, а плоскость AB — под прямыми углами, о чем достаточно предупредить раз навсегда.

Точка C волны AC в некоторый промежуток времени продвинется до плоскости AB к точке B по прямой CB , которую должно представлять себе исходящей из светящегося центра и которая, следовательно, перпендикулярна AC . Но за тот же промежуток времени точка A той же волны не могла, по крайней мере отчасти, сообщить свое движение за пределы плоскости AB и должна была продолжить свое движение в материи, находящейся над этой плоскостью, притом на протяжении, равном

CB ; вместе с тем она должна была, согласно сказанному выше, образовать свою отдельную сферическую волну. Указанная волна изображена здесь окружностью NR , центр которой в A , а радиус AN равен CB .

Если затем рассмотреть остальные точки H волны AC , то ясно, что они не только достигнут поверхности AB по прямым HK , параллельным CB , но еще породят в прозрачной среде из центров K отдельные сферические волны, представленные окружностями, полу-

диаметры которых равны KM , т. е. продолжениям линий NK до прямой BG , параллельной AC .

Но все эти окружности, как это легко видеть, имеют общей касательную прямую BN , т. е. ту же прямую, которая является касательной из точки B к первому из этих кругов, центром которого была точка A , а радиусом, равным прямой BC , AN .

Итак, прямая BN [заключенная между точками B и N , на которую падает перпендикуляр из точки A] как бы образована всеми этими окружностями и заканчивает движение, возникшее при отражении волны AC . Поэтому в этом месте движение имеется в гораздо большем количестве, чем где-либо, и, согласно объясненному выше, BN является распространением волны AC в тот момент, когда ее точка C достигла точки B . Действительно, нет другой прямой, которая, как BN , была бы общей касательной всех данных кругов, если не считать BG под плоскостью AB . Эта BG была бы продолжением волны, если бы движение могло распространяться в среде, однородной с той, которая находится над плоскостью. Если мы хотим видеть, как волна AC постепенно достигла BN , то достаточно провести в той же фигуре прямые KO , параллельные BN , и прямые KL , параллельные AC . Тогда мы увидим, что волна AC из прямой последовательно становится ломаной во всех положениях OKL и снова становится прямой в NB .

Но отсюда видно, что угол отражения оказывается равным углу падения. Из того, что треугольники ACB и BNA прямоугольные и имеют общую сторону AB , а сторона CB равна NA , следует, что углы, противолежащие этим сторонам, будут равны, а следовательно, также углы CBA и NAB . Но как CB , перпендикулярная CA , показывает направление луча падающего, так AN , перпендикулярная волне BN , показывает направление луча отраженного; значит, эти лучи одинаково наклонны к плоскости AB . {...}

Глава 3 О преломлении

{...} Для объяснения причины этих явлений, согласно нашим принципам, допустим, что прямая AB [рис. 48] представляет собой плоскую поверхность, которой ограничены прозрачные тела, простирающиеся по направлению к C и N . Когда я говорю про плоскую поверхность, то имею в виду при этом не совершенно ровность, но такую же, какую мы принимали, когда рассматривали отражение, причем по тем же самым соображениям. Пусть линия AC представляет собой часть световой волны, центр которой, по предположению, так далек, что эту часть можно рассматривать как прямую линию. Тогда точка C волны AC в некоторый промежуток времени достигнет плоскости AB по прямой

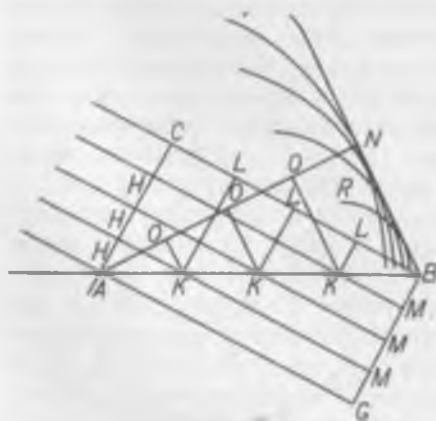


Рис. 47

прозрачность согласно вышеприведенному объяснению. Я приписывал этой категории волн правильное преломление, наблюдаемое в этом камне, предполагая, что эти волны имеют обыкновенную сферическую форму и распространяются более медленно внутри кристалла, чем вне его; я показал, что от этого происходит преломление.

19. Что же касается другой категории, которая должна была произвести неправильное преломление, то я хотел испытать, что будут давать эллиптические или, лучше сказать, сфероидальные волны. Я предполагал в соответствии с последним способом, которым я объяснял прозрачность, что эти волны будут распространяться одинаково как в эфирной материи, содержащейся в кристалле, так и в частицах, из которых он состоит. Мне казалось, что правильное расположение или размещение этих частиц могло способствовать образованию сфероидальных волн (для чего требовалось только, чтобы последовательное движение света распространялось немного быстрее в одном направлении, чем в другом), и я почти не сомневался в существовании в этом кристалле такого размещения равных и подобных частиц вследствие определенности и неизменности его формы и углов. Относительно этих частиц, их формы и расположения я предложу в конце этого трактата мои соображения и несколько подтверждающих их опытов¹. (...)

22. Допустив, таким образом, кроме сферических волн и подобные сфероидальные волны, я приступил к исследованию, могут ли они служить для объяснения явлений неправильного преломления и как с помощью этих явлений я мог бы определить форму и положение сфероидальных волн, в чем я достиг, наконец, желанного успеха. (...)

Комментарий

Переводы с латинского работ Х. Гюйгенса «О движении тел под влиянием удара» и «О центробежной силе» выполнены К. К. Баумгартом по первому посмертному изданию сочинений ученого, вышедшему в Лейдене в 1703 г. Переводы отрывков из этих работ воспроизводятся по изданию: Гюйгенс Х. Три мемуара по механике. М., 1951. Перевод с латинского «Трактата о свете» выполнен Н. Фредериксом. Отрывки воспроизводятся по изданию: Гюйгенс Х. Трактат о свете, в котором объяснены причины того, что с ним происходит при отражении и при преломлении, в частности, при странном преломлении исландского кристалла. М. — Л., 1935.

Гюйгенс пишет «corpus durum» — твердое тело. Прилагательное «durum» в отличие от «solidum» означает не только твердое, но и жесткое, так сказать, абсолютно твердое. Удар твердых тел представляет большие трудности для рассмотрения. Гюйгенс разбирает в сущности удары абсолютно упругих тел.

¹ Здесь Гюйгенс имеет в виду величину скорости, не учитывая ее знака. Это замечание надо принимать во внимание при многих формулировках Гюйгенса.

² В своих оценках Гюйгенс пользуется результатами работы О. Ремера.

³ Допустив в исландском шпате существование двух волн, обыкновенной и необыкновенной, Гюйгенс в следующих параграфах этой главы объясняет наблюдаемые им явления двойного лучепреломления. Но ему нужно здесь, кроме того, показать причины существования двух таких волн, и в этом отношении он опять встречает те же затруднения, что и при объяснении причин отражения и разницы между прозрачными и поглощающими телами.

Литература

- [1] Собрание сочинений Х. Гюйгенса: Oeuvres complètes de Christiaan Huygens. T. 1—22. La Haye, 1888—1950.
- [2] Веселовский И. Н. Христиан Гюйгенс. М., 1959.
- [3] Франкфурт У. И., Френк А. М. Христиан Гюйгенс. М., 1962.



И. НЬЮТОН

(1643—1727)

О началах механики. Об оптике

Творчество И. Ньютона по праву относится к вершинам научной мысли. В нем сочетались мастерство экспериментатора и смелость мысли теоретика. Важную роль сыграл Ньютон в формировании методологии научного исследования. С именем Ньютона связывают установление основных положений классической механики, ограниченность которой была осознана лишь в начале XX в. Ньютон сформировал целую научную программу, под влиянием которой физика развивалась в XVIII—XIX вв.

Исаак Ньютон родился 4 января 1643 г. в деревушке Вулсторп недалеко от Грантэма в семье небогатого фермера. Отец его умер еще до рождения сына и в детстве Исаак большую часть времени находился на попечении родственников. Он учился в школе Грантэма, а затем (1661) поступил в Тринити-колледж Кембриджского университета на правах сабсайзера — студента, в обязанности которого входило прислушивание членам колледжа (преподавателям).

В 1665 г. Ньютон получает степень бакалавра, а в 1668 г. — степень магистра и одновременно становится старшим членом колледжа. В 1669 г. учитель Ньютона И. Барроу передает ему Лукасовскую кафедру, и с этого времени Ньютон на протяжении многих лет читает в Кембриджском университете лекции по математике и оптике.

В 1688 г. Ньютона избирают членом английского парламента. Вследствие чего он два года был вынужден провести в Лондоне. Возвратившись в Кембридж, он не смог вернуться к научным занятиям из-за тяжелой болезни. После выздоровления Ньютон был назначен на должность хранителя Монетного двора. Он провел крайне необходимую для экономики Англии денежную реформу. В 1699 г. Ньютон становится директором Монетного двора и вскоре окончательно отказывается от кафедры в Кембридже. Еще два события характеризуют постепенный рост общественного положения Ньютона: в 1703 г. его избирают президентом

Лондонского Королевского общества, а в 1705 г. королева Анна возводит Ньютона в дворянство.

Последние годы жизни Ньютон провел в Лондоне. В этот период он издал и переиздал ряд работ, подготовленных еще в Кембридже; много времени занимали у Ньютона обязанности президента ЛКО. Сэр Исаак Ньютон умер 31 марта 1727 г.

Научные исследования Ньютон начал вести еще будучи студентом. Сохранились свидетельства о его интересе к изготовлению оптических приборов. Творческая деятельность Ньютона достигла пика очень рано — в 1665—1667 г. В это время в Англии свирепствовала страшная эпидемия чумы, спасаясь от которой многие горожане уезжали в деревню. Уехал из Кембриджа на родину и Ньютон. В Вулсторпе за неполные два года он разработал основы анализа бесконечно малых (в его терминологии — метод флюксий). В это же время ученый начал размышлять о всемирном тяготении. В Вулсторпе были начаты и оптические эксперименты, приведшие к доказательству объективности цвета как характеристики света. Однако, вернувшись в Кембридж, Ньютон не опубликовал сразу же полученные результаты. Он обнародовал их постепенно.

Известность как физик Ньютон получил после 1668 г., когда им была изготовлена первая модель телескопа-рефлектора. (Это изобретение послужило поводом для его избрания членом Лондонского Королевского общества.) В 1673 г. на заседании ЛКО был зачитан мемуар Ньютона «Новая теория света и цветов», в котором изложена теория, построенная на основе убедительных экспериментов по дисперсии света. Ньютон показал, что существуют монохроматические лучи различной цветности и что белый свет есть смесь этих лучей. В дальнейшем Ньютон развил свою теорию и поставил ряд новых оптических опытов. В частности, в экспериментах с так называемыми «кольцами Ньютона» было продемонстрировано свойство периодичности, присущее свету. Взгляды ученого на природу света были довольно сложными. Ньютон пытался соединить представление о свете как о потоке корпускул с элементами волновой теории, принять которую в целом он не мог, поскольку она не объясняла прямолинейность распространения света. Впоследствии, в XVIII в. теория Ньютона была упрощена, и его имя оказалось неразрывно связанным с корпускулярной теорией света. Отметим, что резкая полемика Ньютона с Гуком по вопросам оптики привела к тому, что итог своих исследований Ньютон подвел лишь в 1704 г., после смерти Гука, в сочинении «Оптика».

Наиболее значителен вклад Ньютона в развитие механики. Интересуясь проблемами механики еще с середины 60-х годов, Ньютон благодаря настойчивости Э. Галлея систематизировал свои результаты в этой области в фундаментальном труде «Математические начала натуральной философии» (1687). С. И. Вавилов дал такую обобщающую характеристику этого сочинения: «В ис-

тории естествознания не было события более крупного, чем появление «Начал» Ньютона... Ньютоново учение о пространстве, времени, массах и силах давало общую схему для решения любых конкретных задач механики, физики и астрономии. Величайший пример системы мира, разработанный Ньютоном, увенчанный открытием всемирного тяготения, увлекал науку на этот новый путь, на применение ньютоновской схемы ко всем разделам физики. Возникла «классическая физика» по образцу и подобию «Начал».

Следует отметить, что, хотя Ньютон разработал основы дифференциального и интегрального исчисления во многом под влиянием размышлений над проблемами динамики, в «Началах» он пользуется традиционными математическими методами, восходящими еще к Евклиду и Архимеду. Ньютон считал, что новое физическое содержание его труда будет восприниматься читателями легче, если методы решения задач останутся традиционными. Для современного читателя синтетические геометрико-алгебраические приемы доказательств Ньютона в определенной степени затрудняют чтение книги.

Значение «Начал» для дальнейшего прогресса науки состоит не только в конкретных результатах (формулировка законов движения, закона всемирного тяготения, объяснение законов Кеплера и т. д.), но и в том, что эти результаты продемонстрировали эффективность ньютоновского подхода к объяснению природных явлений, который ученый хотел распространить и на другие области физики. В предисловии к «Началам» Ньютон писал: «Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некими силами, с которыми частицы тел, вследствие причин покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга. Так как эти силы неизвестны, то до сих пор попытки философов объяснить явления природы оставались бесплодными». Так родилась ньютоновская программа изучения физических явлений, которую разрабатывали многие естествоиспытатели XVIII — первой половины XIX вв.

Огромное влияние оказал Ньютон и на развитие методологии научных исследований. Его «метод принципов», реализованный в «Началах» и «Оптике», состоит в следующем: на основе опыта формулируются наиболее общие закономерности — аксиомы (принципы) — и из них дедуктивным путем выводятся законы и положения, которые должны быть проверены на опыте. Согласие с опытом этих следствий служит гарантией справедливости основных положений теории. Этот путь построения физического знания оказался необычайно плодотворным. Свой метод Ньютон противопоставил господствующему тогда в естествознании стремлению во что бы то ни стало объяснить явления даже с помощью не обоснованных опытом гипотез, догадок и спекуля-

ций. Ньютон полагал, что на такой основе построить истинную физическую теорию нельзя. Если на данном этапе нет возможности объяснить причины, то следует ограничиться установлением из экспериментов некоторой закономерности. Отсюда его решительное кредо: «Гипотез не измышляю». «Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезою; гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии», — писал он в «Общем поучении» второго издания «Начал». Слова Ньютона нельзя принимать буквально: гипотеза — необходимый рабочий инструмент познания. Ньютон неоднократно в своем творчестве прибегал к гипотетическим моделям, строил предположения, которые затем часто отбрасывал. Но в отличие от гипотез ньютоновские принципы, являющиеся обобщением эксперимента, остались непоколебленными, и при дальнейшем развитии науки была лишь сужена область их применения. Сам Ньютон понимал, что все, созданное им, не есть окончательная истина, что познание мира бесконечно: «Не знаю, чем я могу казаться миру, но сам себе я кажусь только мальчиком, играющим на морском берегу, развлекающимся тем, что до поры до времени отыскиваю камешек более цветистый, чем обыкновенно, или красивую раковину, в то время как великий океан истины расстилается передо мной неисследованным».

Математические начала натуральной философии

Определения

I. Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее.

Воздуха двойной плотности в двойном объеме вчетверо больше, в тройном — вшестеро. То же относится к снегу или порошкам, когда они уплотняются от сжатия или таяния. Это же относится и ко всякого рода телам, которые в силу каких бы то ни было причин уплотняются. Однако при этом я не принимаю в расчет той среды, если таковая существует, которая свободно проникает в промежутки между частицами. Это же количество я подразумеваю в дальнейшем под названиями тело или масса. Определяется масса по весу тела, ибо она пропорциональна весу, что мною найдено опытами над маятниками, произведенными точнейшим образом, как о том сказано ниже.

II. Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе.

Количество движения целого есть сумма количеств движения отдельных частей его, значит, для массы, вдвое большей, при равных скоростях оно двойное, при двойной же скорости — четверное.

III. Врожденная сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Эта сила всегда пропорциональна массе, и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее.

От инерции материи происходит, что всякое тело лишь с трудом выводится из своего покоя или движения. Поэтому «врожденная сила» могла бы быть весьма вразумительно названа «силою инерции». Эта сила проявляется телом единственно лишь, когда другая сила, к нему приложенная, производит изменение в его состоянии. Проявление этой силы может быть рассматриваемо двояко: и как сопротивление, и как напор. Как сопротивление — поскольку тело противится действующей на него силе, стремясь сохранить свое состояние; как напор — поскольку то же тело, с трудом уступая силе сопротивляющегося ему препятствия, стремится изменить состояние этого препятствия. Сопротивление приписывается обыкновенно телам покоящимся, напор — телам движущимся. Но движение и покой при обычном их рассмотрении различаются лишь в отношении одного к другому, ибо не всегда находится в покое то, что таковым простому взгляду представляется.

IV. Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции. Происхождение приложенной силы может быть различное: от удара, от давления, от центростремительной силы². <...>

Поучение. В изложенном выше имелось в виду объяснить, в каком смысле употребляются в дальнейшем менее известные названия. Время, пространство, место и движение составляют понятия общезвестные. Однако необходимо заметить, что эти понятия обыкновенно относятся к тому, что постигается нашими чувствами. Отсюда происходят некоторые неправильные суждения, для устранения которых необходимо вышеприведенные понятия разделить на абсолютные и относительные, истинные и кажущиеся, математические и обыденные.

I. *Абсолютное, истинное, математическое время* само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью.

Относительное, кажущееся, или обыденное, время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то: час, день, месяц, год

II. *Абсолютное пространство* по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Относительное [пространство] есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное: так, например, протяжение пространств подземного воздуха или надземного, определяемых по их положению относительно Земли. По виду и величине абсолютное и относительное пространства одинаковы, но численно не всегда остаются одинаковыми. Так, например, если рассматривать Землю подвижной, то пространство нашего воздуха, которое по отношению к Земле остается всегда одним и тем же, будет составлять то одну часть пространства абсолютного, то другую, смотря по тому, куда воздух перешел, и, следовательно, абсолютное пространство беспрерывно меняется.

III. *Место* есть часть пространства, занимаемая телом и, по отношению к пространству бывает или абсолютным, или относительным. Я говорю часть пространства, а не положение тела и не объемлющая его поверхность. Для равнообъемных тел места равны, поверхности же от несходства формы тел могут быть и неравными. Положение, правильно выражаясь, не имеет величины, и оно само по себе не есть место, а принадлежащее месту свойство. Движение целого то же самое, что совокупность движений частей его, т. е. перемещение целого из его места то же самое, что совокупность перемещений его частей из их мест. Поэтому место целого то же самое, что совокупность мест его частей, и, следовательно, оно целиком внутри всего тела.

IV. *Абсолютное движение* есть перемещение тела из одного абсолютного его места в другое, *относительное* — из относительного в относительное же. Так, на корабле, идущем под парусами, относительное место тела есть та часть корабля, в которой тело находится, например та часть трюма, которая заполнена телом и которая, следовательно, движется вместе с кораблем. Относительный покой есть пребывание тела в той же самой области корабля или в той же самой части его трюма.

Истинный покой есть пребывание тела в той же самой части того неподвижного пространства, в котором движется корабль со всем в нем находящемся. Таким образом, если бы Земля на самом деле покоилась, то тело, которое по отношению к кораблю находится в покое, двигалось бы в действительности с той абсолютной скоростью, с какой корабль идет относительно Земли. Если же и сама Земля движется, то истинное абсолютное движение тела найдется по истинному движению Земли в неподвижном пространстве и по относительным движениям корабля по отношению к Земле и тела по отношению к кораблю. <...>

Закон I. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Брошенное тело продолжает удерживать свое движение, поскольку его не замедляет сопротивление воздуха и поскольку сила тяжести не побуждает это тело вниз. Волчок, коего части, вследствие взаимного сцепления, отвлекают друг друга от прямолинейного движения, не перестает вращаться (равномерно), поскольку это вращение не замедляется сопротивлением воздуха. Большие же массы планет и комет, встречая меньшее сопротивление в свободном пространстве, сохраняют свое как поступательное, так и вращательное движение в продолжение гораздо большего времени.

Закон II. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Если какая-нибудь сила производит некоторое количество движения, то двойная сила произведет двойное, тройная — тройное, будут ли они приложены разом все вместе или же последовательно и постепенно. Это количество движения, которое всегда происходит по тому же направлению, как и производящая его сила, если тело уже находилось в движении, при совпадении направлений прилагается к количеству движения тела, бывшему ранее, при противоположности — вычитается, при наклонности — прилагается наклонно и соединяется с бывшим ранее, сообразно величине и направлению каждого из них.

Закон III. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны. (...)

Следствие I. При силах совокупных тело описывает диагональ параллелограмма в то же самое время, как его стороны — при раздельных.

Если тело при действии в месте A [рис. 49] одной только силы M перенеслось бы в продолжение заданного промежутка времени равномерным движением из A в B и если бы при действии в том же месте одной только силы N оно перенеслось бы из A в C , то при действии обеих сил оно перенесется в то же самое время из A в D по диагонали параллелограмма $ABCD$.

Так как сила N действует по направлению прямой AC , параллельной BD , то, по второму закону, эта сила нисколько не изменит той скорости приближения тела к прямой BD , которая была произведена первой силой. Следовательно, тело в продолжение данного времени достигнет линии BD , была ли сила N приложена или нет. На основании такого же рассуждения к концу

того же промежутка времени тело должно находиться и где-либо на прямой CD , следовательно, оно должно быть на их пересечении D . Переходит же оно из A в D прямолинейно на основании закона I.

Следствие II. Отсюда явствует составление силы, направленной по AD , из каких-либо двух [сил] AB и BD , наклоненных друг к другу, и, наоборот, разложение любой силы, направленной по AD , на наклонные AB и BD . Как это сложение, так и разложение сил беспрестанно подтверждаются в учении о машинах. <...>

Следствие III. Количество движения, получаемое при сложении количеств движения, когда они совершаются в одну сторону, и при вычитании, когда они совершаются в стороны противоположные, не изменяется от взаимодействия тел между собой. <...>

Следствие IV. Центр тяжести системы двух или нескольких тел от действия тел друг на друга не изменит ни своего состояния покоя, ни движения; поэтому центр тяжести системы всех действующих друг на друга тел [при отсутствии внешних действий и препятствий] или находится в покое, или движется равномерно и прямолинейно. <...>

Следствие V. Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство, или движется равномерно и прямолинейно без вращения. <...>

Поучение. Пусть шары A и B [рис. 50] подвешены на равных и параллельных нитях AC , BD из точек C и D . Опишем из этих точек, как из центров, радиусами BD и AC полуокружности EAF и GBH . Отклонив тело A до точки R дуги EAF и убрав тело B , пускаем A качаться и замечаем ту точку V , до которой оно дойдет после одного полного размаха; тогда RV представляет уменьшение величины размаха от сопротивления воздуха. Пусть ST есть четвертая часть RV , так расположенная посередине этой дуги, чтобы RS и TV были между собой равны, т. е. чтобы было $RS = TV = \frac{3}{2}ST$, тогда ST представляет весьма близко влияние сопротивления воздуха при размахе от S до A . Поместим тело B на его место. Если тело A пустить из точки S , то можно без чувствительной погрешности принять, что его скорость при ударе в низшем его положении будет такая же, как если бы оно свободно падало в пустоте из точки T . Эту скорость можно представить хордой TA , ибо известно, что скорость маятника в низшей точке его дуги пропорциональна хорде дуги его падения. Пусть после отражения тело A достигает точки s и тело B — точки k . Убрав тело B , определяем положение такой точки v , из которой, если пустить тело A , после полного размаха оно приходит в r . Если принять $st = \frac{1}{4}rv$ и поместить точки s и t так, чтобы было $rs = tv$, то хорда tA представит ту скорость,



Рис. 49

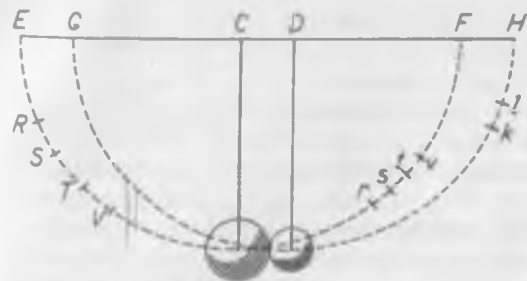


Рис. 50

водя все испытания таким способом, мы как бы производим их в пустоте. Умножив затем массу тела A (если можно так выразиться) на хорду TA , представляющую его скорость, получим его количество движения в точке A перед самым моментом удара. Затем, умножив на IA , получим его количество движения после отражения. Точно так же надо массу тела B умножить на хорду BI , чтобы получить его количество движения после отражения. Подобным образом находятся количества движения каждого из двух тел как перед ударом, так и после отражения в том случае, когда они одновременно пускаются из разных мест, после чего и можно сравнивать количества движения между собой и выводить последствия удара и отражения.

Производя таким образом испытания над маятником длиной 10 футов и над массами равными и неравными и пуская тела так, чтобы они встречались, пройдя большие промежутки, например 8, 12, 16 футов, я получал с ошибкой, меньшей 3 дюймов, в измерениях, что при прямом ударе между телами изменения их количеств движения были равны и направлены в противоположные стороны, откуда следует, что действие и противодействие между собой равны. Так, например, если тело A ударяло по покоящемуся телу B с количеством движения, равным девяти частям, и, потеряв семь, продолжало движение с двумя, то тело B отскакивало также с количеством движения, равным семи. Когда тела шли друг другу навстречу, например A с количеством движения, равным двенадцати, и B с количеством движения, равным шести, и если после удара A шло в обратную сторону с количеством движения, равным двум, то B шло в обратную сторону с количеством движения, равным восьми, т. е. оба тела, как показывает вычитание, изменяли свое количество движения на четырнадцать частей. В самом деле, если из количества движения A вычесть двенадцать, то останется нуль, по вычитании же еще двух получится количество движения, равное двум, направленное в обратную сторону, также при вычитании четырнадцати из количества движения тела B , равного шести, остается количество движения, равное восьми, направленное в обратную сторону.

То же самое происходит и при движении тел в одну сторону

которую имеет тело A после отражения, ибо I будет то истинное и исправленное место, до которого могло бы дойти тело A при отсутствии сопротивления воздуха.

Подобным же образом исправляется и место A и находится та точка I , до которой дошло бы тело B в пустоте. Произ-

Пусть, например, тело A идет более быстро и с количеством движения четырнадцать, B — медленнее и с количеством движения, равным пяти. Если после удара A продолжает идти с количеством движения пять, то B пойдет с четырнадцатью, получив девять частей от A .

Подобное соотношение имеет место и в остальных случаях: полное количество движения, рассчитываемое как сумма количеств движения, когда они направлены в одну сторону, и как разность, когда они направлены в стороны противоположные, никогда не меняется от удара при встрече тел.

Ошибки в один или два дюйма при измерениях следует приписать трудности произвести их достаточно точно. Была также трудность и в том, чтобы пустить оба тела так, чтобы они одновременно приходили в низшее положение, а также чтобы заметить места s и k , до которых тела поднимались после встречи. Неравномерное распределение плотности и неравномерность строения тел, происходящие от случайных причин, приводит также к погрешностям.

Чтобы опровергнуть возражение против выказанного выше правила, для доказательства которого эти опыты и производились, будто бы оно предполагает, что тела или абсолютно тверды, или вполне упруги, т. е. такие, каких в природе не встречается, добавлю, что описанные опыты удаются как с телами мягкими, так и с жесткими и совершенно не зависят от степени твердости их. Если это правило прилагать к телам не вполне твердым, то необходимо лишь уменьшить скорость отражения сообразно степени упругости тел. {...}

О движении тел

КНИГА I

Отдел III

О движении тел по эксцентричным коническим сечениям

Предложение XI. Задача VI. Тело обращается по эллипсу: требуется определить закон центростремительной силы, направленной к фокусу эллипса.

Пусть S [рис. 51] есть фокус эллипса. Проводим SP , пересекающую диаметр DK в точке E , а ординату Qu — в точке x , и дополняем параллелограмм $QxPR$. Тогда окажется, что EP равно большой полуоси AC эллипса, ибо если провести из другого фокуса H прямую HJ параллельно EC , то по равенству CS и CH будут равны ES и EJ ; следовательно,

$$PE = \frac{1}{2} (PS + PJ),$$

но так как HJ параллельно PR и углы JPR и HPZ равны, то $PJ = PH$, сумма же $PS + PH = 2AC$.

На SP опустим перпендикуляр QT и обозначим параметр эллипса через L так, что $L = 2 \frac{BC^2}{AC}$. Тогда

ной тысячной доли полной массы, могла бы быть с ясностью обнаружена этими опытами.

Конечно, не может быть сомнения, что природа тяжести на других планетах такова же, как и на Земле. В самом деле, вообразим, что земные тела подняты до орбиты Луны и пущены вместе с Луною, также лишенной всякого движения, падать на Землю. На основании уже доказанного несомненно, что в одинаковые времена они пройдут одинаковые с Луною пространства, ибо их массы так относятся к массе Луны, как их веса к весу ее. <...>

Предложение VII. Теорема VII. Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них.

Выше доказано, что все планеты тяготеют друг к другу, а также что тяготение к каждой из них в отдельности обратно пропорционально квадратам расстояний от места до центра этой планеты. Отсюда следует (по предл. LXXIX и его следствиям кн. I⁷), что тяготение ко всем планетам пропорционально количеству материи в них.

Кроме того, так как все части какой-либо планеты *A* тяготеют к какой-либо другой планете *B* и тяготение каждой части относится к тяготению целого, как масса этой части к массе целого, всякому же действию (по закону III движения) есть равное противодействие, то и обратно: планета *B* притягивается ко всем частям планеты *A*, и притяжение ее к какой-либо части относится к притяжению к целому, как масса этой части к массе целого.

Следствие 1. Следовательно, тяготение ко всей планете происходит и складывается из тяготений к отдельным ее частям. <...>

Следствие 2. Тяготение к отдельным равным частицам тел обратно пропорционально квадратам расстояний мест до частиц (по след. 3 предл. LXXIV кн. I)⁸.

Предложение VIII. Теорема VII. Если вещество двух шаров, тяготеющих друг к другу, в равных удалениях от их центров однородно, то притяжение каждого шара другим обратно пропорционально квадрату расстояния между центрами их.

После того как я нашел, что тяготение ко всей планете происходит и складывается из тяготений к частицам ее и для каждой из них обратно пропорционально квадрату расстояния до этой частицы, у меня возникло сомнение, будет ли эта обратная пропорциональность квадратам расстояний для всей силы притяжения, складывающейся из частных, выполняться в точности или лишь приближенно. Ибо могло бы быть, что пропорция, которая имеет место для больших расстояний, достаточно точна, близ же поверхности планеты, вследствие неравенства расстояний между частицами и различного их расположения, может оказаться заметно неверной. Однако впоследствии, по предложениям LXXV и LXXI кн. I⁹, я убедился в справедливости высказанного здесь предложения. <...>

Общее поучение. <...> До сих пор я изъяснял небесные явле-

ния и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я ни указывал причины самого тяготения. Эта сила происходит от некоторой причины, которая проникает до центра Солнца и планет без уменьшения своей способности и которая не пропорциональна поверхности частиц, на которые она действует (как это обыкновенно имеет место для механических причин), но пропорциональна количеству твердого вещества, причем ее действие распространяется повсюду на огромные расстояния, меняясь обратно пропорционально квадратам расстояний. Тяготение к Солнцу составляется из тяготения к отдельным частям его и при удалении от Солнца убывает в точности пропорционально квадратам расстояний даже до орбиты Сатурна, что следует из покоя афелиев планет, и даже до крайних афелиев комет, если только эти афелии находятся в покое. Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезой, гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии.

В такой философии предложения выводятся из явлений и обобщаются с помощью индукции. Так были изучены непроницаемость, подвижность и напор тел, законы движения и тяготения. Довольно того, что тяготение на самом деле существует, действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря. <...>

Оптика

КНИГА I

Часть I Предложения

Предложение I. Теорема I. *Лучи, отличающиеся по цвету, отличаются и по степеням преломляемости.*

Доказательство опытами. *Опыт I.* Я взял продолговатый кусок черной толстой бумаги с параллельными сторонами и разделил его на две равные половины линией, проведенной перпендикулярно обеим сторонам. Одну часть я покрасил красной краской, другую — синей. Бумага была очень черной, краски были интенсивными и наносились толстым слоем для того, чтобы явление могло быть более отчетливым. Эту бумагу я рассматривал сквозь призму из массивного стекла, две стороны которой, служившие для прохождения света, были плоскими и хорошо отполированными; они заключали угол около шестидесяти градусов: этот угол я называю преломляющим углом призмы. Рассматривая бумагу, я держал ее и призму перед окном таким образом, что стороны куска бумаги были параллельными призме; обе эти стороны, поперечная линия и призма были параллельны горизонту; свет, падавший из окна на бумагу, составлял с нею

этого замечания достаточно в отношении всех опытов. Однако из этих опытов не следует, что весь свет от синей половины преломляется больше, чем свет красной половины; оба они составлены из лучей различной преломляемости, так что в красной половине есть лучи не менее преломляемые, чем лучи синей половины, а в синей половине есть лучи не более преломляемые, чем некоторые лучи красной половины, но таких лучей в отношении ко всему свету очень мало; они уменьшают успех опыта, однако не в состоянии его совершенно расстроить. Если бы красная и синяя окраски были более блеклыми и слабыми, то расстояние изображений сделалось бы меньшим, чем полтора дюйма, если же окраска будет более интенсивной и полной, то это расстояние возрастает, как станет ясным в дальнейшем. Этих опытов достаточно для цветов естественных тел; для цветов, получаемых преломлением в призмах, предложение, о котором идет речь, станет ясным из опытов, излагаемых в следующем предложении.

Предложение II. Теорема II. *Солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости.*

Доказательство опытами. *Опыт 3.* Я поместил в очень темной комнате у круглого отверстия около трети дюйма шириной в ставне окна стеклянную призму, благодаря чему пучок солнечного света, входившего в это отверстие, мог преломляться вверх к противоположной стене комнаты и образовывал там цветное изображение солнца. Ось призмы [т. е. линия, проходящая через середину призмы от одного конца к другому параллельно ребру преломляющего угла] была в этом и следующих опытах перпендикулярна падающим лучам. Я медленно вращал призму вокруг этой оси и видел, что преломленный свет на стене или окрашенное изображение солнца сначала поднималось, затем начало опускаться. Между подъемом и спуском, когда изображение казалось остановившимся, я прекратил вращение призмы и закрепил ее в этом положении так, чтобы она не могла более двигаться, ибо в этом положении по обе стороны преломляющего угла, т. е. при входе лучей внутрь призмы и при выходе из нее, преломления света были равны между собой. Так же и в других опытах, когда я хотел, чтобы преломления по обе стороны призмы были равными, я отмечал место, где изображение солнца, образованное преломленным светом, останавливалось между двумя противоположными движениями при смене поступательного движения на попятное; когда изображение падало на это место, я закреплял призму¹⁰. Именно в этом положении, как наиболее подходящем, следует понимать расположенными призмы и в следующих опытах, если только не описывается другое положение. Поместив призму в это положение, я заставил преломленный свет падать перпендикулярно на лист белой бумаги на противоположной стене комнаты и наблюдал фигуру и размеры солнечного изображения, образованного светом на бумаге. Это изображение было удлиненным, но не

овальным, и замыкалось двумя прямолинейными и параллельными сторонами и двумя полукруглыми концами. По бокам оно было ограничено очень отчетливо, на концах же — неясно и неопределенно: свет ослаблялся и исчезал там постепенно. Ширина этого изображения была около двух дюймов с одной восьмой, включая полутень, и соответствовала диаметру солнца, ибо изображение находилось на расстоянии восемнадцати половиной футов от призмы; на этом расстоянии указанная ширина, уменьшенная на диаметр отверстия в ставне окна, т. е. на четверть дюйма, соответствует на призме углу около половины градуса, являющемуся кажущимся диаметром солнца. Но длина изображения была около десяти с четвертью дюймов, ширина же прямолинейных сторон — около восьми дюймов, преломляющий угол призмы, благодаря которому получилась столь значительная длина изображения, был 64° . С меньшим углом длина изображения была меньше, ширина же оставалась той же самой. Если призма повертывалась вокруг своей оси таким образом, что лучи выходили из второй преломляющей поверхности призмы более отлого, то изображение становилось на один, два или более дюймов длиннее; если призма повертывалась в противоположном направлении, так что лучи падали более отлого на первую преломляющую поверхность, то изображение укорачивалось на один или два дюйма. Вот почему, производя этот опыт, я стремился, насколько мог, ставить призму согласно вышеуказанному правилу точно в такое положение, чтобы преломление лучей при их выходе из призмы равнялось преломлениям при падении на призму. В этой призме было несколько жил, пробегавших внутри стекла от одного конца до другого; эти жилы неправильно рассеивали некоторую часть солнечного света, но не имели заметного влияния на удлинение окрашенного спектра, ибо я производил тот же опыт с другими призмами с таким же успехом. В частности, с призмой, по-видимому, не имевшей таких жил, с преломляющим углом в $62\frac{1}{2}$ градуса я нашел длину изображения $9\frac{3}{4}$ или 10 дюймов на расстоянии $18\frac{1}{2}$ фута от призмы; ширина отверстия в оконной ставне при этом была $\frac{1}{4}$ дюйма, как и раньше. Я повторял опыт четыре или пять раз, ибо нетрудно ошибиться при установке призмы в надлежащее положение, и всегда находил длину изображения такой, как она приведена выше. С другой призмой из более прозрачного стекла и лучше отполированной, свободной, по-видимому, от жил и с преломляющим углом в $63\frac{1}{2}$ градуса, длина изображения на том же самом расстоянии в $18\frac{1}{2}$ футов была также около 10 или $10\frac{1}{8}$ дюймов. За этими пределами на $\frac{1}{4}$ или $\frac{1}{3}$ дюйма на обоих концах спектра свет облаков казался несколько окрашенным в красный и фиолетовый цвет, но столь слабо, что я заподозрил, что эта окраска полностью или большей частью вызывается лучами спектра, неправильно рассеивающимися благодаря некоторой неоднородности вещества и полировке стекла; поэтому я не включил эту окраску в пределы спек-

ра. С другой стороны, различные величины отверстия в оконной ставне, различные толщины того места призмы, где через нее проходят лучи, и различные наклоны призмы к горизонту не изменяют заметно длины изображения. Не влияет также различие вещества призмы, ибо в сосуде, сделанном из полированных стеклянных пластинок, склеенных вместе в форме призмы, и наполненного водой, получается такой же результат опыта в отношении величины преломления¹¹. Далее, следует заметить, что лучи идут от призмы к изображению по прямым линиям и поэтому на их длинном пути от призмы они наклонены друг к другу соответственно длине изображения, т. е. более чем на два с половиной градуса. Однако, согласно законам оптики в общепринятом понимании, лучи не могут столь наклониться один к другому; пусть EG [рис. 53] представляет ставню окна, F — отверстие в ней, через которое пучок солнечного света пропускается в затемненную комнату, ABC — треугольная воображаемая плоскость, по которой, надо представить себе, призма пересекается поперек серединой света. Или, если угодно, пусть ABC представляет самую призму, направленную прямо к глазу наблюдателя ее ближайшей вершиной, и пусть XU — солнце, MN — бумага, на которую отбрасывается солнечное изображение спектра, PT — изображение, стороны которого v и w прямолинейны и параллельны, концы же P и T полукруглые. $UKHP$ и $XLIT$ — два луча; первый из них идет от нижней части солнца к верхней части изображения и преломляется в призме в K и H ; второй идет от верхней части солнца к нижней части изображения и преломляется у L и I . Преломления на обеих гранях призмы равны одно другому, т. е. преломление у K равно преломлению у I , и преломление у L равно преломлению у H , так что преломления падающих лучей у K и L , взятые вместе, равны преломлениям выходящих лучей при K и H , взятым вместе; складывая равное с равным, получаем, что преломления при K и H , взятые вместе, равны преломлениям при I и L , взятым вместе, и, следовательно, два луча, одинаково преломленные, имеют тот же наклон один по отношению к другому после преломления, как и до него, т. е. наклон в половину градуса соответственно диаметру солнца, ибо так были наклонены лучи друг к другу до преломления. Таким образом, по правилам общепринятой оптики длина изображения PT должна соответствовать углу в половину градуса у призмы и, следовательно, должна равняться ширине uw ; поэтому изображение должно быть круглым. Так было бы, если бы два луча $XLIT$ и $UKHP$ и все остальные, дающие изображения Pw и Tv , одинаково преломлялись. Из опыта найдено, что изображение получается не круглое, но удлиненное, с длиной, почти в пять раз большей ширины; поэтому лучи, идущие к верхнему концу P изображения, претерпевают наибольшее преломление и должны больше преломляться, чем те лучи, которые идут к нижнему концу T , если только неравенство преломления не случайно.

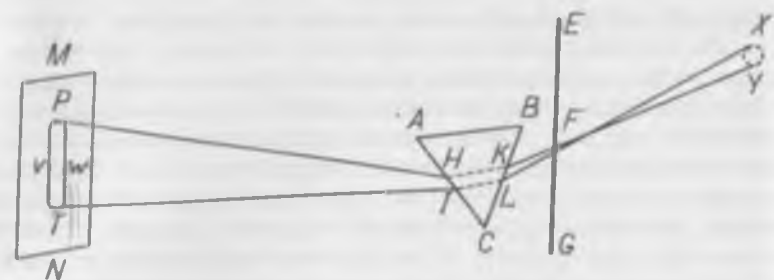


Рис. 53

Это изображение спектра PT было окрашено красным в наименее преломленном конце T , фиолетовым — в наиболее преломленном конце P и желтым, зеленым и синим — в промежуточном пространстве. Это согласуется с первым положением, что свет, различающийся по цвету, различается и в отношении преломляемости. Длину изображения в предыдущих опытах я измерял от крайнего и наиболее слабого и крайнего синего на другом конце, исключая только небольшую полутьму, ширина которой едва ли превосходила четверть дюйма, как было сказано выше. <...>

Опыт 5. Рассудив, что если в третьем опыте изображение солнца получается удлинённой формы вследствие расширения каждого луча или же благодаря какому-либо другому случайному неравенству преломлений, то такое же удлинённое изображение, но растянутое в ширину, должно получаться при втором преломлении, производимом в сторону, благодаря подобному же расширению лучей или другому случайному неравенству преломлений; я попробовал, каков будет результат такого второго преломления. Для этой цели я расположил все предметы так же, как и в третьем опыте, и затем поставил вторую призму непосредственно после первой в поперечном положении к ней, так чтобы она снова могла преломлять пучок солнечного света, приходящего к ней через первую призму. В первой призме пучок преломлялся кверху, а во второй — в сторону. Я нашел, что преломление во второй призме не увеличивает ширину изображения, но что его верхняя часть, претерпевающая в первой призме большее преломление и кажущаяся фиолетовой и синей, преломляется и во второй призме больше, чем нижняя часть, являющаяся красной и желтой, причем это происходит без какого-либо увеличения ширины изображения.

Пояснение. Пусть S [рис. 54] — солнце, F — отверстие в окне; ABC — первая призма; DH — вторая призма, Y — круглое изображение солнца, образуемое непосредственно пучком света, когда призмы убраны; PT — удлинённое изображение солнца, образуемое тем же пучком при прохождении только через первую призму, когда вторая призма убрана; pt — изображение, получаемое при перекрестных преломлениях обеих призм вместе

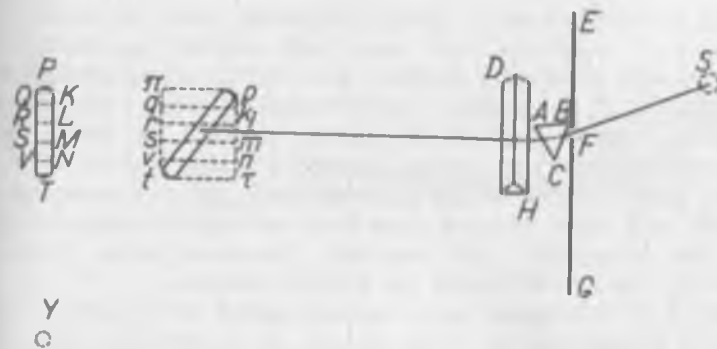


Рис. 54

Если лучи, направленные к различным точкам круглого изображения Y , расширяются и разбиваются преломлением первой призмы так, что уже не идут по определенной линии к определенной точке, но каждый луч расщепляется, рассеивается и превращается из линейного луча в поверхность лучей, расходящуюся от точки преломления и лежащую в плоскости углов падения и преломления, то лучи будут приходить в этих плоскостях к соответствующему числу линий, простирающихся от одного конца изображения PT до другого, и изображение поэтому станет удлинённым. Эти лучи и их различные части, стремящиеся к различным точкам изображения PT , должны снова расширяться и рассеяться в сторону при перекрестном преломлении во второй призме и должны составить квадратное изображение pt . Для лучшего понимания этого разделим изображение PT на пять равных частей: PQK , $KQRL$, $LRSM$, $MSVN$, NVT . Та же самая неправильность, благодаря которой круглый пучок света Y растягивается, преломляясь в первой призме в длинное изображение PT , заставит свет PKQ , занимающий пространство той же длины и ширины, как Y , при преломлении во второй призме расширяться в длинное изображение pqr , свет $KQRL$ — в длинное изображение $kqrl$, а свет $LRSM$, $MSVN$, NVT — в соответственные длинные изображения $lrsm$, $msvn$, nvt . Все эти длинные изображения составят квадратное изображение pt . Это должно произойти, если каждый луч расширяется преломлением и рассеивается в треугольную поверхность лучей, расходящихся из точки преломления, ибо второе преломление рассеет лучи в одну сторону так же, как первое рассеивает в другую, — оно увеличит ширину изображения настолько же, насколько первое преломление увеличивает длину. То же самое должно произойти, если некоторые лучи случайно преломляются больше, чем другие. На самом деле происходит иначе. Изображение PT не становилось шире, преломляясь во второй призме, но делалось только наклонным, как это представлено в pt , его верхний конец P переносился преломлением на большее расстоя-

ние, чем нижний конец T . Таким образом, свет, шедший к верхнему концу P изображения, был [при равных падениях] более преломленным во второй призме, чем свет, направленный к нижнему концу T , т. е. синий и фиолетовый больше, чем красный и желтый, и поэтому более преломляем. Тот же свет, преломляясь в первой призме, переносился дальше от места Y , к которому он был направлен до преломления, и, следовательно, как в первой, так и во второй призме испытывал большее преломление, чем остальной свет, являясь, таким образом, более преломляемым еще до падения на первую призму. (...)

Опыт 6. В середине двух тонких досок я проделал круглые отверстия диаметром в треть дюйма, а в оконной ставне было сделано значительно более широкое отверстие для того, чтобы впускать в мою затемненную комнату широкий пучок солнечного света. Я поместил за ставней призму для того, чтобы пучок преломлялся к противоположной стене. Непосредственно за призмой я закрепил одну из досок таким образом, чтобы середина преломленного света могла проходить через отверстия в доске, остальная же часть задерживалась доской. Затем на расстоянии около двенадцати футов от первой доски я закрепил другую доску так, что середина преломленного света, проходящая через отверстие в первой доске и падающая на противоположную стену, могла проходить через отверстие во второй доске, остальная же часть, задержанная доской, могла отбрасывать на ней окрашенный спектр солнца. Непосредственно за этой доской я поместил другую призму для преломления света, проходящего через отверстие. Затем я быстро вернулся к первой призме и, медленно вращая ее в ту и в другую сторону вокруг ее оси, заставил изображение, падающее на вторую доску, двигаться вверх и вниз по доске, так что все его части могли последовательно проходить через отверстие в этой доске и падать на призму за нею. В то же время я отмечал на противоположной стене положения, до которых доходил свет после преломления во второй призме. По разностям этих положений я нашел, что свет, наиболее преломившийся в первой призме, шел к синему концу изображения и во второй призме снова больше преломлялся, чем свет, шедший к красному концу того же изображения, что доказывает как первое, так и второе предположение. Это получалось как в том случае, когда оси двух призм были параллельны, так и тогда, когда они были наклонены одна к другой и к горизонту под любым углом.

Пояснение. Пусть F [рис. 55] — широкое отверстие в ставне окна, через которое солнце освещает первую призму ABC , и пусть преломленный свет падает на середину доски DE , средняя же часть света — на отверстие G , сделанное в середине этой доски. Пусть эта пропущенная часть света снова падает на середину второй доски de и образует здесь такое же удлиненное изображение солнца, как было описано в третьем опыте. Медленно вращая призму ABC в ту и другую сторону вокруг



Рис. 55

ее оси, можно передвигать это изображение вверх и вниз по доске de . Таким способом все его части от одного конца до другого можно заставить последовательно проходить через отверстие g , сделанное в середине этой доски. В то же время другая призма abc помещается вблизи за отверстием g для второго преломления пропущенного света. Установив таким образом предметы, я отмечал места M и N на противоположной стене, на которые падает преломленный свет, и нашел, что если обе доски и вторая призма оставались неподвижными, то эти места постоянно изменялись при вращении первой призмы вокруг ее оси. Когда через отверстие g пропусклась нижняя часть света, падающего на вторую доску de , то свет приходил к нижнему положению M на стене. Когда пропусклась верхняя часть света через то же отверстие g , то она доходила до более высокого места N на стене. При пропускании промежуточной части света через отверстие свет падал в некоторое место на стене между M и N . При неизменном положении отверстий в досках падение лучей на вторую призму оставалось тем же самым во всех случаях. И, однако, при таком одинаковом падении одни лучи преломлялись больше, другие меньше. Больше во второй призме преломлялись те лучи, которые больше всего отклонялись от своего пути при большем преломлении и в первой призме, и в силу этого постоянства большей преломляемости они по праву могут быть названы более преломляемыми¹². (...)

Другие наблюдали, что прозрачные вещества, такие, как стекло, вода, воздух и пр., если их сделать очень тонкими выдуванием в пузыри или изготовляя иным способом в виде пластинок, обнаруживают различные цвета соответственно их различной тонкости, хотя при больших толщинах они кажутся очень яркими и бесцветными. В предыдущей книге я воздержался гово-

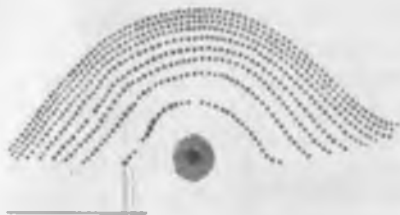


Рис. 56

рить об этих цветах, ибо они казались более трудными для рассмотрения и не были необходимыми для установления свойств света, разбиравшихся там. Но ввиду того что они могут привести к дальнейшим открытиям для дополнения теории света, в частности в связи со строением частиц естественных

тел, от которых зависят цвета и прозрачность последних, я поместил здесь сведения и об этих цветах. Для краткости и ясности изложения я прежде всего описал главные из моих наблюдений, затем рассмотрел их и воспользовался ими. Наблюдения таковы.

Наблюдение 1. Прижимая тесно две призмы одну к другой так, что их стороны [которые случайно были несколько выпуклыми] могли в некоторых местах соприкасаться, я нашел, что место соприкосновения становилось совершенно прозрачным, как будто бы там был непрерывный кусок стекла. Ибо, когда свет падал на воздух, заключенный между стеклами в других местах, настолько отлого, что полностью отражался, то в местах соприкосновения свет казался полностью проходящим настолько, что при рассмотрении сверху эти места были похожи на черные или темные пятна благодаря тому, что отражался только ничтожный или неощутимый свет в отличие от других мест. Если смотреть через эти пятна, то они кажутся как бы дырами в тонком слое воздуха, образовавшемся между двумя прижатыми стеклами. Предметы, находящиеся за стеклами, через это отверстие можно видеть отчетливо, хотя они совершенно не видны через остальные части стекол, где была прослойка воздуха. Хотя стекла были несколько выпуклыми, однако прозрачные пятна имели значительную ширину, что происходило, по-видимому, главным образом потому, что частицы стекол смещались внутрь благодаря взаимному давлению. Ибо при очень сильном сдавливании пятна становились значительно шире, чем раньше.

Наблюдение 2. Когда слой воздуха при вращении призм около их общей оси становился столь мало наклонным к падающим лучам, что некоторые из них начинали пропускаться, то на слое появлялось много тонких цветных дуг, имевших вначале форму конхоиды [рис. 56]. При дальнейшем движении призм эти дуги увеличивались и загибались все больше и больше вокруг прозрачных пятен, пока, наконец, они не завершались в круги или кольца, окружая пятна и сжимаясь после этого постепенно все больше и больше.

При первом появлении эти дуги были фиолетового и синего цвета и между ними находились белые дуги кругов, которые при дальнейшем движении призм становились несколько окрашенными по их внутренним лимбам в красный и желтый цвет.

ко внешним же лимбам примыкал синий. Следовательно, порядок этих цветов от центрального темного пятна был в это время такой: белый, синий, фиолетовый, черный, красный, оранжевый, желтый, белый, синий, фиолетовый и т. д. Однако желтый и красный были значительно слабее, чем синий и фиолетовый.

При дальнейшем движении призм вокруг их оси эти цвета сжимались все больше и больше, стягиваясь к белизне с каждой стороны, пока, наконец, они совершенно в ней не исчезали. Тогда в этих частях круги казались черными и белыми, без всякой другой примешанной окраски. Но при дальнейшем движении призм цвета снова появлялись из белизны: фиолетовый и синий — на внутреннем лимбе, красный и желтый — на внешнем лимбе. Теперь порядок цветов от центрального пятна был белый, желтый, красный, черный, фиолетовый, синий, белый, желтый, красный и т. д., т. е. противоположный прежнему. <...>

Наблюдение 4. Для более тонкого наблюдения порядка цветов, возникающих из белых кругов по мере того, как лучи делаются все менее и менее наклонными к воздушной пластинке, я взял два объективных стекла: одно плосковыпуклое для телескопа в четырнадцать футов и другое — широкое двояковыпуклое от телескопа около пятидесяти футов; наложив на последнее стекло первое плоской его стороной вниз, я слегка сжимал их вместе для того, чтобы заставить цвета последовательно возникать в середине кругов, и постепенно поднимал верхнее стекло над нижним для того, чтобы цвета последовательно снова исчезали на том же месте. Окраска, появлявшаяся последней при сжатии стекол в середине других цветов, при первом своем появлении была похожа на круг почти однородного цвета от окружности к центру; при дальнейшем сжатии стекол этот круг становился шире, пока в его центре не появлялся новый цвет и круг не делался кольцом, окружающим этот новый цвет. Дальнейшее сжатие увеличивает диаметр этого кольца, ширина же его орбиты или периметра убывает до тех пор, пока в центре не появится новый цвет. И так же возникают последовательно третий, четвертый, пятый и другие следующие новые цвета и становятся кольцами, окружающими внутренние цвета, из которых последним было черное пятно. И, наоборот, при подъеме верхнего стекла над нижним диаметр колец убывает, ширина же их орбит возрастает до тех пор, пока их цвета не дойдут последовательно до центра; при этом они имеют значительную ширину и я мог легче различить и разобрать их вид, чем раньше. Таким способом я наблюдал их последовательность и количество, как о том следует ниже.

За прозрачным центральным пятном, появившимся при соприкосновении стекол, следовали синий, белый, желтый и красный. Синий был в столь малом количестве, что я не мог различить его в кругах, полученных при помощи призм, не мог в них я хорошо разобрать и фиолетовый, однако желтый и красный были очень

обильными и, казалось, простирались на столько же, как и белый, и в четыре или пять раз больше синего. Следующие круги в порядке цветов, непосредственно окружавшие предыдущие, были фиолетовый, синий, зеленый, желтый и красный; все они были обильны и ярки, за исключением зеленого, который находился в малом количестве и казался более слабым и размытым, чем другие цвета. Из остальных четырех фиолетовый распространялся меньше всех и синий меньше, чем желтый или красный. Третья окружность или порядок был таков: пурпуровый, синий, зеленый, желтый и красный, причем пурпуровый был красноватее, чем фиолетовый в предыдущей окружности, и зеленый был значительно отчетливее, являясь столь же живым и обильным, как и другие цвета, за исключением желтого; однако красный стал немного бледнее, очень сильно склоняясь к пурпуровому. После этого следовала четвертая окружность — зеленая и красная. Зеленый был очень обильным и живым, склоняясь с одной стороны к синему и с другой к желтому. Но в этой четвертой окружности не было ни фиолетового, ни синего, ни желтого, красный же был очень несовершенным и грязным. Последующие цвета становятся все более и более несовершенными и размытыми, пока после трех или четырех смен не переходят в совершенную белизну. <...>

Наблюдение 5. Для определения промежутка между стеклами, или толщины воздуха, лежащего между ними, при помощи которого производится каждый цвет, я измерил диаметры первых шести колец в наиболее ярких частях их орбит и нашел, что их квадраты находятся в арифметической прогрессии нечетных чисел: 1, 3, 5, 7, 9, 11. И так как одно из этих стекол было плоским, другое — сферическим, то промежутки между ними при этих кольцах должны быть в той же прогрессии. Я измерил также диаметры слабых или темных колец между наиболее блестящими цветами и нашел, что их квадраты располагаются в арифметическую прогрессию четных чисел: 2, 4, 6, 8, 10, 12. Производить эти измерения — дело тонкое и трудное; я повторял их несколько раз в различных частях стекол, чтобы по согласию убедиться в них. Тот же метод я применял, делая определения и в некоторых других из следующих наблюдений. <...>

Наблюдение 9. Смотря через два соприкасающихся объективных стекла, я нашел, что промежуточный воздух обнаруживает цветные кольца столь же хорошо и в проходящем свете, как в отраженном. Центральное пятно было теперь белым, и от него порядок цветов был такой: желтовато-красный, черный, фиолетовый, синий, белый, желтый, красный, фиолетовый, синий, зеленый, желтый, красный и т. д. Но эти цвета были очень слабыми и размытыми, если только свет не пропускаться через стекла очень отлого, ибо таким способом они становились очень живыми. Только первый желтовато-красный, подобно синему в четвертом наблюдении, был столь незначительным и слабым, что едва различался. Сравнивая окрашенные кольца, получае

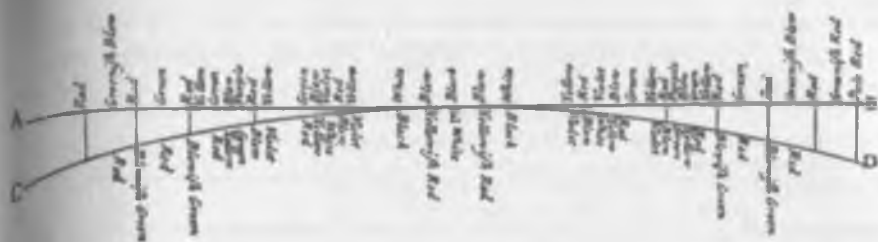


Рис. 57

мые при отражении, с кольцами при пропускании света, я нашел, что белый был противоположным черному, красный — синему, желтый — фиолетовому и зеленый — смеси красного и фиолетового, т. е. те части стекла были черными при рассмотрении насквозь, которые казались белыми при наблюдении сверху, и обратно: там, где в одном случае появился синий цвет, в другом был красный; и точно так же в отношении других цветов [рис. 57], где AB , CD — поверхности стекол, соприкасающихся в E , черные же линии между ними суть их расстояния в арифметической прогрессии; цвета, написанные наверху, видны в отраженном свете, написанные внизу — в свете проходящем.

Наблюдение 10. При небольшом смачивании объективных стекол по их ребрам вода медленно проникала между ними, и при этом круги становились меньше, а цвета — более слабыми; по мере того как вода проникала в одну половину, в той половине, в которую вода приходила раньше, цвета казались отделившимися от другой половины и сжимались на меньшем пространстве. Измеряя, я нашел отношения их диаметров к диаметрам подобных же кругов, образованных воздухом, около семи к восьми, и, следовательно, промежутки между стеклами при соответственных кругах, вызванных двумя средами — водой и воздухом, относятся приблизительно как три к четырем. Может быть, таково общее правило, что в том случае, когда между стеклами зажата иная среда, более или менее плотная, чем вода, то промежутки при кольцах, появляющихся при этом, будут относиться к промежуткам в случае воздушного слоя, как синусы, измеряющие преломление, происходящее при переходе из этой среды в воздух. {...}

Наблюдение 12. Эти наблюдения производились на открытом воздухе. Далее, однако, для исследования действий окрашенного света, падающего на стекла, я затемнил комнату, рассматривая стекла при помощи отражения цветов призмы, отбрасываемых на лист белой бумаги, причем мой глаз помещался так, что я мог видеть окрашенную бумагу при помощи отражения в стеклах, как в зеркале. Благодаря этому кольца стали отчетливы и наблюдались в значительно большем числе,

чем на открытом воздухе. Иногда я видел их более двадцати. В то время как на открытом воздухе не мог различить свыше восьми или девяти. (...)

Комментарий

Перевод с латинского «Математических начал натуральной философии» И. Ньютона выполнен А. Н. Крыловым. (Первое издание: *Newton I. Philosophia naturalis principia mathematica*. Londoni, 1687.)

Отрывки воспроизводятся по изданию: Собрание трудов академика А. Н. Крылова. Т. VII. М. — Л. 1936.

Перевод «Оптики» И. Ньютона с третьего английского (прижизненного) издания выполнен С. И. Вавиловым (*Newton I. Optics: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. London, 1721). Отрывки воспроизводятся по изданию: Ньютон И. Оптика. М., 1954.

¹ С одной стороны, очевидно, что здесь Ньютон говорит о важнейшем свойстве тел — инертности, и, следовательно, это определение отражает реальность. С другой стороны, в этом месте Ньютон приписывает всем телам «врожденную» силу инерции, существующую независимо от системы отсчета. Такой взгляд в дальнейшем не был принят физиками. Это свидетельствует о сложности процесса формирования основных понятий механики. В следующих определениях (V—VIII) Ньютон дает классификацию сил, которая не прижилась в физике и представляет лишь исторический интерес.

² Здесь Ньютон ссылается на математическую лемму, утверждающую, что «предельное отношение (т. е. отношение при стремлении величин к нулю) дуги, хорды и касательной друг к другу равно единице».

³ Речь идет об одной из теорем, касающихся центростремительной силы.

⁴ В оригинале заглавие звучит как «*Regulae philosophandi*», т. е. «правила философствования».

Указанное предложение звучит так: «Массы маятников, у которых расстояния центра качения до центра подвеса одинаковы, относятся между собою, как произведение весов маятников на квадраты времен их размахов в пустоте».

Указанное предложение сформулировано Ньютоном так: «В системе многих тел A, B, C, D и т. д. если какое-либо тело A притягивает все прочие с ускорительными силами, обратно пропорциональными квадратам расстояний до этого притягивающего тела, если также и второе тело B притягивает все прочие тела A, C, D и т. д. с силами, обратно пропорциональными квадратам расстояний до этого притягивающего тела, то абсолютные силы притягивающих тел A и B будут относиться друг к другу, как массы соответствующих тел, коим эти силы принадлежат».

- ⁸ Указанное предположение гласит, что если на частицу, помещенную вне шара, действуют силы, обратно пропорциональные квадратам расстояний до его точек, то данная частица притягивается к шару с силой, обратно пропорциональной квадрату ее расстояния до центра шара.
- ⁹ В предложении XXV речь идет о взаимодействии двух шаров, частицы которых взаимодействуют по закону обратных квадратов, а в предложении XXI — о притяжении частицы к сфере.
- ¹⁰ Этот метод установки призмы на угол наименьшего отклонения сохранился и в современной спектроскопии.
- ¹¹ Не обнаружив зависимости длины спектра от вещества, Ньютон делает ошибочный вывод о постоянстве дисперсии для всех веществ. Это привело его к заключению о невозможности избавиться от хроматической абберации в линзах. Ошибочность этого утверждения была доказана Л. Эйлером, а в 1757 г. был построен ахроматический объектив.
- ¹² Шестой опыт Ньютон считал решающим (*experimentum crucis*) и во время дискуссий вокруг его теории (1672—1675) предлагал оппонентам обратить на него особое внимание.

Литература

- [1] Основные издания трудов И. Ньютона:
 а) Isaac Newton's *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Vols. 1—2. Cambridge, 1972.
 б) *Optica*... Londoni, 1706.
 в) *The mathematical papers of Isaac Newton*. Ed. by D. T. Whiteside. Vols. 1—7. Cambridge, 1967—1976.
 г) *The correspondence of Isaac Newton*. Ed. by H. W. Turnbull. Vols. 1—7. Cambridge, 1959—1977.
- [2] Brewster D. *Memoirs of life, writings and discoveries of Sir Isaac Newton*. Vols. 1—2. Edinburgh, 1855—1856.
- [3] Westfall R. *Never at rest: A biography of Isaac Newton*. Cambridge, 1982.
- [4] *Methodological heritage of Newton*. Ed. by R. E. Butts, J. W. Davis.
- [5] Вавилов С. И. Исаак Ньютон. М., 1989.
- [6] Кобзарев И. Ю. Ньютон и его время. М., 1978.
- [7] Погребысская Е. И. Оптика Ньютона. М., 1981.



Д. Бернулли

1700—1782

О течении жидкостей

Механика жидкостей представляет собой один из наиболее тесно связанных с практикой разделов механики. Вопросы гидростатики интересовали еще ученых античности, а гидравлика как часть инженерии стала развиваться задолго до того, как было дано объяснение основным закономерностям, характеризующим движение и равновесие жидкостей. В XVII в. интерес к проблемам механики жидкости обострился в связи с ростом масштабов ирригационных работ и использования энергии движущейся воды.

В XVII в. задачами гидравлики занимались С. Стевин и Г. Галилей, Э. Торричелли и Б. Паскаль, Э. Мариотт и И. Ньютон. Однако в это время было создано лишь учение о равновесии жидкостей. Эффекты, возникающие в движущейся жидкости, и описывающие их законы были установлены в основном в XVIII столетии. Ученым, заложившим основы гидродинамики и давшим имя этому разделу механики, был швейцарский ученый Д. Бернулли.

Даниил Бернулли родился 8 февраля 1700 г. в Гронингене (Нидерланды). Он был средним из трех сыновей Иоганна Бернулли I, принадлежавшего к семейству, из которого вышло немало выдающихся ученых (сам И. Бернулли занимал в Гронингене кафедру математики). Вскоре семья И. Бернулли переезжает в Базель, где Даниил сначала заканчивает гимназию, а затем изучает философию и логику в местном университете. В 16 лет он уже получил степень магистра философии. В это же время Даниил под руководством старшего брата Николая учился математике. Однако на этом образование талантливой юноши не закончилось — в 1718—1720 гг. он изучает медицину в Базеле, Гейдельберге и Страсбурге. В 1721 г. он получает степень лиценциата медицины. Когда попытки Бернулли занять кафедру анатомии или ботаники в Базеле кончатся неудачей, он едет в Италию для продолжения медицинского образования. Там же, в Венеции, он публикует первую серьезную научную работу — книгу «Математические упражнения». Эта книга получила известность, и именно благодаря ей Даниил вместе с братом Николаем пригласили во вновь созданную Петербургскую Академию наук.

В Петербурге Д. Бернулли стал профессором физиологии, но его научная деятельность в период работы в России (1725—1733) выходила далеко за рамки этой дисциплины. Так, он много занимался проблемами механики (ему принадлежат разработка метода сложения и разложения скоростей, анализ проблемы сохранения «живых сил» и др.). Однако особенно много во время работы в Петербургской Академии Бернулли занимался проблемами гидродинамики. Им было написано несколько работ, составивших основу будущей книги «Гидродинамика», а также подготовлен ее план.

В 1733 г. после безвременной кончины брата Николая Даниил Бернулли вернулся в Базель. Сначала он получил кафедру анатомии и ботаники, затем физиологии и, наконец, физики. Преподавать в университете Бернулли продолжал до 1776 г. Его лекции по физике сопровождались интересными демонстрациями и привлекали многочисленных слушателей. Уже переехав в Базель, Бернулли издал свое основное произведение «Гидродинамика, или записки о силах и движениях жидкостей» (1738).

В базельский период жизни ученый занимался и многими другими проблемами механики и математики. Бернулли принадлежат важные исследования колебаний струн и воздуха, при анализе которых он применил тригонометрические ряды, впоследствии названные рядами Фурье. Значителен вклад Бернулли в теорию бесконечных рядов, изучение которых он начал еще в Петербурге. Большую известность получили работы Бернулли по теории вероятности, к которой он впервые применил исчисление бесконечно малых. О значимости исследований Бернулли свидетельствует тот факт, что они 10 раз удостоивались премий Парижской Академии наук за победы в конкурсах по наиболее актуальным проблемам науки. Кроме Петербургской АН Бернулли был членом Берлинской, Парижской, Болонской академий, а также Лондонского Королевского общества. Ученый умер 17 марта 1782 г.

Обладая талантом блестящего теоретика, Бернулли на протяжении всей жизни стремился решать практически важные задачи. Интерес к гидродинамике проявился уже в первой книге Бернулли — «Математических упражнениях». Однако в ту пору он еще не вышел за рамки традиционного подхода, при котором не проводилось четкого различия между задачами гидростатики и гидродинамики. Идеи метода рассмотрения проблем гидродинамики возникли у Бернулли в первые годы его деятельности в Петербурге. Правда, при представлении сообщений по этому вопросу в Академии Бернулли столкнулся с резкой критикой со стороны академиков Я. Германа и Г.-Б. Бюльфингера. Однако победителем в споре вышел все же Бернулли, хотя возможно, что дискуссия с Германом и Бюльфингером способствовала уточнению его позиций.

Гидродинамика Бернулли основывается на применении представления о «бесконечно малых частицах жидкости» (т. е. физи-

чески бесконечно малых величинах) и методов математического анализа к решению физических задач. Рассмотрение Бернулли базируется не на непосредственном интегрировании уравнений движения жидкости (они еще не были известны), а на соображениях, которые на современном языке называются энергетическими. Так, он широко применяет принцип живых сил и понятие, сходное с современным понятием «потенциальная энергия». Кроме того, одним из важных инструментов при решении задач является у Бернулли соотношение, отражающее неразрывность струи.

Книга Бернулли удивительно богата по содержанию. В ней кроме обсуждения многочисленных задач гидростатики и гидродинамики можно найти основы кинетической теории газов, дальнейшее развитие которой относится уже к XIX в. Следует иметь в виду, что вначале чтение «Гидродинамики» может вызвать некоторые затруднения, поскольку Бернулли пользуется непривычными для современного читателя обозначениями и системой единиц, фактически обращаясь с физическими величинами как с числами, не имеющими размерности. Тем не менее физическая суть подхода к решению задач излагается Бернулли очень ясно, и это оправдывает те усилия, которых требует чтение его книги.

Гидродинамика

**Часть двенадцатая, которая излагает
статику движущихся жидкостей,
названную мною гидравлико-статикой**

§ 1. Среди тех, кто предложил меры давления жидкостей, находящихся внутри сосудов, не многие переступили через обычные правила гидростатики, которые мы доказали во второй части. Однако имеется много другого, что относится к собственно так называемой гидростатике, например, когда к действию тяжести присоединяется центробежная сила или сила инерции, что мы рассмотрели в предыдущей части, а подобного рода мертвые силы можно придумать и сочетать на бесчисленное множество ладов. Но это не является тем, что мне представляется наиболее желательным, ибо для этого дела нетрудно дать общие правила. Мне представляется более существенной статика жидкостей, движущихся поступательно внутри сосудов, например вод, текущих по трубам к фонтанам; ведь она имеет многообразное применение, но никем не была исследована. Если кое-кто и упоминает о ней, то дает совершенно неправильное ее толкование, ибо те, которые говорили о давлении вод, протекающих через водопроводы, и о крепости последних, необходимой для того, чтобы выдерживать это давление, преподали совершенно те же законы, что и для жидкостей, не уносимых каким-либо движением.

§ 2. В этой гидравлико-статике особенным является то, что нельзя определить давления вод раньше, чем будет правильно выяснено движение. Последнее и послужило причиной того, что это учение так долго оставалось неизвестным, ибо до сих пор авторы очень мало интересовались исследованием движения вод, а скорости они почти повсюду определяли лишь на основании высоты воды. Но хотя часто движение столь быстро приближается к этой скорости, что ускорения совершенно не могут быть восприняты чувствами, и кажется, будто все движение возникает мгновенно, тем не менее представляется интересным правильно изучить эти ускорения, ибо иначе зачастую бывает невозможно определить давления текущих вод. Поэтому я решил, что представляется очень важным исследовать со всей тщательностью эти изменения с самого начала движения и до заданного момента, хотя бы они были мгновенными, и подкрепить это опытами, что я и сделал в различных местах настоящего трактата и в особенности в третьей части. <...>

§ 4. <...> Этот вопрос должен быть рассмотрен с помощью особого метода, когда воды текут по трубам, и это-то учение я главным образом подразумеваю под названием гидравлико-статики. В данном случае может быть определено не столько давление на основании скорости, сколько, если сделано малое отверстие в стенках трубы, наоборот, скорость на основании давления. Этой именно гидравлико-статикой, применение которой является весьма обширным, я и решил преимущественно заняться в настоящей части.

Задача

§ 5. Пусть имеется весьма обширный сосуд $ACEB$ [рис. 58], который должен постоянно поддерживаться полным воды и снабжен цилиндрической горизонтальной трубой ED , и пусть в конце трубы имеется отверстие o , выбрасывающее воду с равномерной скоростью. Требуется определить давление воды на стенки трубы ED .

Решение. Пусть высота поверхности воды AB над отверстием o равна a . Тогда скорость воды, вытекающей в o , если исключить первые моменты вытекания, следует признать равномерной и равной $\sqrt{a}$, так как мы принимаем, что сосуд поддерживается постоянно полным. А если допустить, что отношение сечения трубы и ее отверстия равно $\frac{n}{1}$, то скорость воды в трубе будет равна $\frac{\sqrt{a}}{n}$. Но если бы дно FD полностью отсутствовало, то предельная скорость воды в этой же трубе была бы равна $\sqrt{a}$, что больше, чем $\frac{\sqrt{a}}{n}$. Таким образом, вода в трубе стремится к большему движению, но ее упор встречает сопротивление со стороны дна FD . Этот упор и противодействие ему сжимает воду, каковое сжатие выдерживается стенками трубы, и,

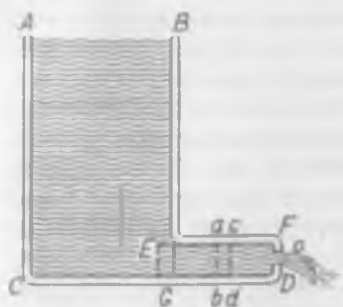


Рис. 58

стало быть, последние испытывают на себе подобное же давление. Таким образом, ясно, что давление стенок пропорционально ускорению или приращению скорости, которую приобрела бы вода, если бы мгновенно исчезла всякая помеха для движения так что она выбрасывалась бы прямо в воздух.

Итак, теперь дело свелось к тому, чтобы, отрезав трубу ED в cd в какой-либо момент времени при продолжающемся протекании воды через

о, определить, какое ускорение может вследствие этого получить капелька $abcd$. Такое именно давление будет испытывать со стороны протекающей воды частица ac , взятая на стенках трубы. Для этой цели надлежит рассмотреть сосуд $ABEcdC$ и для него найти ускорение весьма близкой к вытеканию частицы воды,

если она будет иметь скорость $\frac{va}{n}$. Это мы и сделали в очень

общем виде в § 3 части пятой. Но так как в настоящем частном случае вычисление является очень коротким, то мы здесь заново произведем вычисление движения в укороченном сосуде $ABEcdC$.

Рассматриваем скорость как переменную. Пусть скорость воды в трубе Ed равна v ; сечение трубы, как и раньше, равно n , длина Ec равна c . Обозначим длину бесконечно малой и весьма близкой к вытеканию водной частицы ac через dx . В E будет находиться равная капелька, которая будет готова вступить в трубу в тот самый момент времени, когда другая капелька $acdh$ выбрасывается. Но в то время как капелька, в E , масса которой равна ndx , вступает в трубу, она приобретает скорость v , а также живую силу nv^2dx , каковая живая сила полностью возникла вновь, ибо вследствие бесконечно большого размера сосуда AE капелька E , не вступившая еще в трубу, не обладала никаким движением. К указанной живой силе nv^2dx следует прибавить приращение живой силы, получаемое водой в Eb , пока капелька ad вытекает, а именно $2ncv dv$. Эта сумма соответствует действительному снижению капельки ndx с высоты BE , т. е. a . Таким образом, мы имеем

$$nv^2 dx + 2ncv dv = n a dx,$$

или

$$\frac{v dv}{dx} = \frac{a - v^2}{2c}.$$

Но при всяком движении приращение скорости dv пропорционально давлению, умноженному на малое время, которое в данном случае равно $\frac{dx}{v}$. Таким образом, в нашем случае давл

ление, испытываемое каплей ad , пропорционально $\frac{v dv}{dx}$, т. е. величине $\frac{a-v^2}{2c}$.²

А в тот момент времени, когда труба разрезается, $v = \frac{\sqrt{a}}{n}$, или $v^2 = \frac{a}{n^2}$; стало быть, это значение надлежит поставить в выражение $\frac{a-v^2}{2c}$, которое, таким образом, превращается в следующее выражение: $\frac{n^2-1}{2n^2c} a$. Последнее же представляет собой величину, которой пропорционально давление воды на частицу трубы ac , каким бы сечением ни обладала труба и каким бы отверстием ни было просверлено ее дно. Итак, если давление воды будет установлено в одном случае, то вместе с тем оно станет известно и во всех остальных случаях. Этот случай мы имеем именно тогда, когда отверстие бесконечно мало или когда n бесконечно велико по сравнению с единицей³; ведь само по себе ясно, что в этом случае вода применяет все свое давление, которое соответствует высоте a , каковое давление мы обозначим через a . Но когда n бесконечно велико, то единица по сравнению с числом n^2 исчезает, а величина, которой пропорционально давление, оказывается равной $\frac{a}{2c}$. Таким образом, если мы желаем вообще узнать, каким будет давление, когда n является каким угодно числом, то следует установить такую аналогию. Если величине $\frac{a}{2c}$ соответствует давление a , то каким будет давление для величины $\frac{n^2-1}{2n^2c} a$? Этим путем устанавливается, что искомое давление равно $\frac{n^2-1}{n^2} a$, что и требовалось определить. (...)

Следствие 2

§ 7. Если где-нибудь в трубе просверлить очень малое отверстие, т. е. очень малое по сравнению с отверстием o , то вода будет выливаться с такой скоростью, с какой она могла бы подниматься на высоту $\frac{n^2 a - a}{n^2}$, если только посторонние помехи не создают никакого препятствия. А именно высота подъема на рис. 59, т. е. ln , будет равна $\frac{n^2 a - a}{n^2}$. А если имеется вертикальная или хотя бы как угодно наклоненная трубочка gm , сообщающаяся с горизонтальной трубой, но, однако, чтобы край вставленной трубочки не выдавался внутри полости горизонтальной трубки, дабы протекающая вода не насккивала на этот край, то вертикальная высота воды во вставленной трубке будет точно

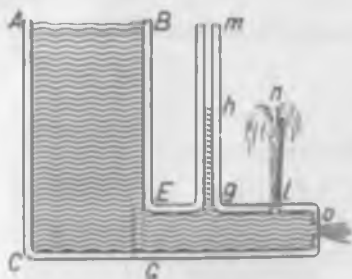


Рис. 59

так же равна $\frac{n^2 a - a}{n^2}$; в этом пос.

леднем случае нет надобности в том, чтобы трубочка была очень узкой⁴. (...)

Задача

§ 10. Определить давление воды, протекающей с любой равномерной скоростью⁵ по трубе, имеющей какую угодно форму и наклон.

Решение. Пусть имеется труба ACD [рис. 60], через отверстие o которой протекают, допустим, воды с постоянной скоростью и притом с такой, которая соответствует вертикальной высоте oS . Проведем прямую SN и представим себе бесконечно широкий сосуд $NMQP$, наполненный водой до NP , из которого труба постоянно и равномерно засасывает свои воды. Я выбрал такие условия, чтобы имелась налицо однообразная причина или побуждающая сила, которая гонит вперед воды с заданной скоростью, т. е. поддерживает одинаковое течение вод. Без этого допущения наша задача была бы неопределенной, ибо в одной и той же трубке к какому-либо моменту времени одна и та же скорость может быть создана на бесчисленное множество ладов, поэтому для того, чтобы можно было измерить причину, толкающую вперед воду, следует представить себе однообразие в движении вод.

Пусть теперь требуется определить давление в CF (или в cf). Для этой цели мы снова предположим, что труба разрезана в CE (или в ce) с тем, чтобы определить в перпендикулярном трубе сечении, какое ускорение или замедление получит капля $CEGF$ (или $cegf$) после первого момента разрыва. Поэтому нам следует определить вообще мгновенное движение через укороченный сосуд $NMAECQP$ (или $NMAceQP$). Следовательно, пусть скорость бесконечно малой капельки $CEGF$ (или $cegf$) в самой точке укорочения равна v , ее масса dx . Тогда живая сила воды, движущейся в укороченном сосуде, будет пропорциональна количеству v^2 ; поэтому мы положим ее равной αv^2 , понимая под буквой α какую-нибудь постоянную величину, которая зависит от размеров разорванной трубы; однако точного определения ее здесь не требуется. Заметим, что живая сила воды в воображаемом сосуде $NMQP$ не принимается в расчет в силу его бесконечно большого размера; однако если бы он даже не обладал бесконечно большим размером, то от этого все-таки не получилось бы никакого изменения в вычислении. Итак, мы видим, что приращение живой силы воды, движущейся в укороченном сосуде, равно $2\alpha v dv$. Если к последнему прибавить живую силу, одновременно порожденную в выброшенной капельке, то получается $2\alpha v dv + v^2 dx$, что представляет собой полное приращение живой

силы, соответствующее дей-
ствительному снижению капельки dx
на высоту точки C (или c), каковую
мы обозначим через a . Поэтому
указанное выше полное приращение
живой силы надлежит приравнять
к adx , так что получится

$$2avdv + v^2 dx = adx,$$

или

$$\frac{v dv}{dx} = \frac{a - v^2}{2a}$$

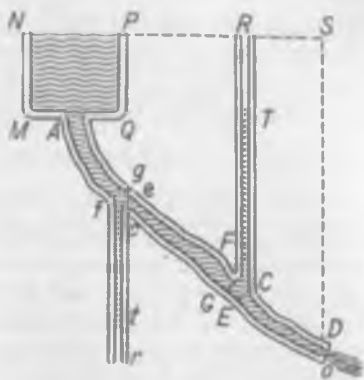


Рис. 60

Если остальное сделать так, как в § 5, и если допустить, что скорость v является такой, какая соответствует высоте b , то окажется, что давление воды в CF (или в cf) столь же велико, как в воде, стоящей на высоте $a - b$. При этом можно отметить, что если не имеется никаких посторонних помех для движения и если вытекающая из o струя не подвергается сжатию, то высота b находится к высоте oS в двойном отношении отверстия к сечению CE (или ce)⁶.

Следствие

§ 11. Когда b больше a , то величина $a - b$ оказывается отрицательной и, таким образом, давление превращается во всасывание, т. е. стенки трубы испытывают давление внутрь. А тогда следует рассматривать это дело таким образом, как если бы вместо столбца воды CT , который располагается наверху и находится в равновесии с текущей водой, существовал подвешенный водяной столб cl , стремлению которого упасть противодействовало бы притяжение текущей воды. Так, например, если сечение ce трубы равно отверстию o , тогда $b = oS$, если совершенно не принимать во внимание случайных помех для движения. Отсюда, если из трубы вниз будет идти трубочка cr , а последняя будет заполнена водой от своего начала и до точки l , расположенной на одном уровне с отверстием o , то вода cl будет оставаться подвешенной без движения. Но если точка l будет расположена ниже o , то вода будет спускаться по трубочке cr и постоянно вытекать в r , однако скорость воды, вытекающей в r , вопреки тому, что мог бы легко подумать всякий, незнакомый еще с настоящей теорией, не будет такой, какая соответствует высоте NP над r , хотя бы и были устранены все помехи, а скорее эта скорость будет соответствовать, если только трубочка очень узка по сравнению с трубой, высоте lr . Если точка l будет расположена выше точки o , то вода сама собой поднимется, а после того как вся она войдет в трубу, через трубочку будет втягиваться воздух и в скором времени водяная струя, вытекающая в o , помутнеет вследствие

примешавшегося воздуха и потеряет свою прозрачность и плотность. Таким образом, ясно, в каких случаях давление будет положительным и в каких — отрицательным, а именно: давление в трубе бывает тем большим, чем она шире и чем ниже она расположена. Действительно, в теории высота $b = \frac{1}{\rho} \cdot \rho S$, если $\frac{1}{\rho}$ обозначает отношение между сечением отверстия и тем сечением трубы, для которого необходимо определить давление. Но если помехи значительно уменьшают движение, то при определении давлений представляется более подходящим установить на опыте, какова в действительности скорость воды, и вместо b подставить высоту, соответствующую этой скорости. Равным образом давление будет определено более точно, если вместо a подставить не высоту водной поверхности NP над местом вытекания, а высоту той скорости, с которой воды в действительности вытекают из той же трубы в месте разреза. Однако эти поправки не всегда имеют место. <...>

Комментарий

Перевод с латинского «Гидродинамики» выполнен В. С. Гохманом.

Отрывки воспроизводятся по изданию: Бернулли Д. Гидродинамика или записки о силах и движениях жидкостей. Л., 1959.

Первое издание: Bernoulli D. Hydrodynamica, sive de viribus et notibus fluidorum commentarii. Argentorati 1738.

Напомним, что «живой силой» называлась величина, равная произведению массы тела на квадрат его скорости mv^2 (т. е. удвоенная кинетическая энергия тела).

С помощью этой формулы Бернулли впервые в истории науки о движении жидкости установил разницу между гидростатическим и гидродинамическим давлениями.

Здесь Бернулли использует прием, называемый в наши дни принципом соответствия: он определяет коэффициент в формуле, переходя в пределе от динамической задачи к статической.

Здесь Бернулли формулирует принцип действия манометра для измерения давления движущейся жидкости.

Как видно из решения задачи, здесь речь идет не о «равномерности» (т. е. постоянстве) скорости в трубе в целом, а лишь о независимости скорости течения жидкости в каждом сечении трубы от времени, т. е. Бернулли рассматривает установившееся течение.

Таким образом Бернулли получает знаменитый закон, описывающий течение идеальной жидкости. Действительно, из сравнения этой задачи с результатами § 5 ясно, что искомое давление пропор-

ционально отношению $(a^2 - v^2)/(2\alpha)$. Учитывая, что $a = H - z$, где H — высота уровня NP над отверстием O , а z — его же высота над сечением EC , и что $v = \sqrt{H/p}$, где p — площадь сечения EC (площадь сечения отверстия O , как и раньше, принимается за единицу), получаем $p \sim \frac{H-z-H/p^2}{2\alpha}$.

Повторяя рассуждения, подобные приведенным в § 5, получаем, что при $v \rightarrow 0$ давление равно $(H - z)/(2\alpha) = A$ или равно высоте столба воды A . Тогда выражение для давления переписывается в виде $p \sim A - \frac{H\alpha}{p^2(H-z)}$. Переходя к обозначениям $A = H - z$ (см. § 5) и не выписывая несущественные константы, получаем выражение для закона Бернулли, близкое к современному: $P + z + v^2 = H = \text{const}$.

Необходимость непривычных для современного читателя преобразований (с кажущимся нарушением размерности) связана с системой единиц, применяемой Бернулли.

Литература

- [1] В настоящее время в Швейцарии издается собрание сочинений Д. Бернулли: *Die Werke von Daniel Bernoulli*. Basel.
- [2] Григорьян А. Т., Ковалев Б. Д. Даниил Бернулли. М., 1981.
- [3] Rouse H., Ince S. *History of Hydraulics*. Iowa, 1957.
- [4] Минифоровский В. А. Великие математики Бернулли. М., 1984.



Л. Эйлер

1707—1783

Об изложении механики

Выход в свет книги И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» ознаменовал начало принципиально нового этапа в развитии не только механики, но и физики в целом. Значение этого труда состоит прежде всего в выработке общих принципов, с помощью которых могут решаться конкретные механические задачи. Однако, хотя в работе Ньютона были рассмотрены многие важные проблемы, «Начала» не могли вместить все задачи, стоявшие перед механикой конца XVII — начала XVIII в. Кроме того, метод решения конкретных задач, использованный Ньютоном, не был столь общим, как сформулированные им принципы. Поэтому ученые XVIII в. сосредоточили свои усилия на разработке частных, но актуальных проблем механики (поставщиком многих таких проблем была астрономия), в ходе которой создавались достаточно общие математические методы. Заслуга изложения механики на основе систематического использования дифференциального и интегрального исчисления принадлежит Л. Эйлеру, одному из крупнейших математиков всех времен.

Леонард Эйлер родился 15 апреля 1707 г. в Базеле в семье сельского пастора. Получив неплохое домашнее образование, Эйлер поступил в старшие классы гимназии и в то же время начал посещать лекции по математике в университете. Талант юного математика был замечен И. Бернулли, который начал заниматься с ним индивидуально.

В семнадцать лет Эйлер уже получил степень магистра искусств. В 1725 г. братья Николай и Даниил Бернулли, сыновья учителя Эйлера, были приглашены во вновь учрежденную Петербургскую Академию наук. Они предложили Эйлеру последовать за ними. Поскольку кафедра математики была уже занята, Эйлер собирался занять кафедру физиологии. Однако он все же стал сначала адъюнктом, а затем и профессором (1731) по математике.

В Петербурге (1727—1741) Эйлер проводил исследования в различных областях математики и механики. За это время он подготовил к печати около 80 трудов по вариационному исчислению, обыкновенным дифференциальным уравнениям, степенным рядам, дифференциальной геометрии, теории чисел. Эйлер зани-

мадся также гидродинамикой и небесной механикой. В 1736 г. появилось в свет его сочинение «Механика», в котором было дано систематическое изложение динамики точки с помощью математического анализа. Новаторство Эйлера проявилось и в том, что он первым начал рассматривать скорость как отношение пройденного пути ко времени (до него считалось невозможным ввести подобные величины).

В 1741 г. Эйлер принял предложение прусского короля Фридриха II, переехал в Берлин и возглавил физико-математическое отделение Академии наук. И в Берлине Эйлер продолжал удивительную по разнообразию исследовательскую деятельность. Его работы печатались как в Берлине, так и в Петербурге. Он участвовал в конкурсах Парижской Академии наук (всею он стал победителем двенадцати таких конкурсов). Эйлер занимался проблемами астрономии (теории Луны), динамикой твердого тела, задачами прикладной механики. В берлинский период Эйлер подготовил ряд фундаментальных трудов по дифференциальному и интегральному исчислению. Талант Эйлера был универсальным. Он с равным успехом занимался как вопросами абстрактной математики, так и конкретными проблемами, имеющими практическое значение. Так, в 1749 г. ученый опубликовал подготовленную по заказу Петербургской Академии наук монографию «Морская наука», сыгравшую важную роль в развитии этой отрасли знаний. Он исследовал также вопросы баллистики, важные для военного дела.

В 1736 г. Эйлер вместе с семьей вернулся в Россию. Еще в 1738 г. вследствие переутомления у ученого отказал правый глаз. В возрасте 59 лет Эйлер окончательно ослеп. Это, однако, мало сказалось на продуктивности его исследований. За 17 лет его повторного пребывания в России он подготовил около 400 научных работ, в том числе ряд монографий, в частности «Письма к одной немецкой принцессе», где нашли отражение его основные физические воззрения.

Научное наследие Эйлера огромно. Предполагается, что издаваемое с 1909 г. в Швейцарии полное собрание сочинений Эйлера будет содержать 72 тома. Сохранившаяся научная переписка ученого составляет свыше 3000 писем. Эйлер оказал огромное влияние на развитие науки XVIII в. Он придерживался передовых взглядов по многим спорным вопросам физики того времени. Авторитет Эйлера в науке был непререкаем — он состоял членом практически всех ведущих научных академий и обществ. Эйлер умер 18 сентября 1783 г.

Ниже приводится предисловие к «Механике» Эйлера, в котором ученый поясняет цель, которую он ставил при подготовке книги.

То, что в хрестоматию не включены отрывки, содержащие рассмотрение конкретных задач механики, объясняется близостью современного подхода к изложению этих задач в курсах общей физики к подходу Эйлера.

Термин «механика» задолго до нашего времени получил двойное значение, и даже теперь этим именем называются две науки, совершенно различные между собой как по своим принципам, так и по предмету своего исследования. Название «механика» обычно прилагается как к той науке, которая трактует о равновесии сил и их взаимном сравнении, так и к той, в которой исследуются сама природа движения, его происхождение и изменение. Хотя и в этой последней дисциплине главным образом рассматриваются также силы, так как ими производится и изменяется движение, однако метод трактовки этого вопроса сильно отличается от первой науки. Поэтому во избежание всякого недоразумения лучше будет ту науку, в которой дело идет о равновесии сил и их сравнении, называть статикой, другой же — науке о движении — придать имя механики; ведь в таком смысле эти термины повсюду употреблялись еще и раньше.

Кроме того, между этими дисциплинами лежит огромное различие во времени. Если статику стали разрабатывать еще до Архимеда, то первые основы механики положены только Галилеем, его исследованиями о падении тяжелых тел.

В последнее время, после открытия анализа бесконечно малых, обе эти науки настолько обогатились, что все то, что раньше за столь долгий промежуток времени было добыто с таким трудом, можно сказать, почти исчезло сравнительно с этим новым материалом. Однако все эти столь многочисленные открытия, которыми эти науки к нашему времени так сильно обогатились и так далеко продвинулись вперед, рассеяны в столь многочисленных журналах и отдельных работах, что для человека, занимающегося этими вопросами, является делом крайне трудным все это найти и пересмотреть. Кроме того, что создает особенные затруднения, некоторые из них предложены без всякого анализа и доказательств, другие подкреплены доказательствами, чрезмерно запутанными и составленными по образцу древних, иные, наконец, выведены из чуждых и менее естественных принципов, так что понять и объяснить их можно только ценой величайшего труда и огромной потери времени.

Что касается статики, то почти полную и во всех отношениях прекрасную работу издал на французском языке Вариньон в двух солидных томах¹. Хотя эта работа названа «Механика», однако она вся занята определением равновесия сил, приложенных к разного рода телам; в ней почти ничего нет, что касалось бы движения и той науки, которую здесь мы обозначили именем «механика». Точно так же известный ученый Вольф в своих «На-

чалах наук»², особенно в новейшем их издании, дал много блестящих страниц, касающихся как статике, так и механики; но он соединил их вместе и не сделал никакого различия между этими двумя науками. Намеченные границы и самый характер произведения, по-видимому, не позволили ему разграничить эти науки между собой и, с другой стороны, достаточно полно изложить каждую из них. Я не знаю, вышла ли в свет какая-либо другая работа, кроме «Форономии» Германа³, в которой это учение о движении было бы разобрано совершенно отдельно и обогащено столь многими блестящими вновь открытыми положениями. Герман и сам внес в эту науку много нового; вместе с тем он добавил и собрал здесь все то, что за это время было открыто стараниями других ученых. Но так как он хотел охватить в этом не очень большом труде кроме механики еще и другие смежные науки, а именно статику и гидростатику вместе с гидравликой, то ему оставалось очень мало места для изложения механики; вследствие этого все то, что касается этой науки, он принужден был изложить в краткой и отрывистой форме. Кроме того, что особенно мешает читателю, все это он провел по обычаю древних при помощи синтетических геометрических доказательств и не применил анализ, благодаря которому только и можно достигнуть полного понимания этих вещей. Приблизительно так же написана работа И. Ньютона «Математические начала натуральной философии», благодаря которой наука о движении получила наибольшее развитие.

Однако если анализ где-либо и необходим, так это особенно относится к механике. Хотя читатель и убеждается в истине выставленных предложений, но он не получает достаточно ясного и точного их понимания, так что если чуть-чуть изменить те же самые вопросы, он едва ли будет в состоянии разрешить их самостоятельно, если не прибегнет сам к анализу и те же предложения не разрешит аналитическим методом. Это как раз случилось со мной, когда я начал знакомиться с «Началами» Ньютона и «Форономией» Германа. Хотя мне казалось, что я достаточно ясно понял решение многих задач, однако задач, чуть отступающих от них, я уже решить не мог. И вот тогда-то я попытался, насколько умел, выделить анализ из этого синтетического метода и те же предложения для собственной пользы проработать аналитически; благодаря этому я значительно лучше понял суть вопроса.

Затем таким же образом я исследовал и другие работы, относящиеся к этой науке, разбросанные по многим местам, и лично для себя я изложил их планомерным и однообразным методом и привел их в удобный порядок. При этих занятиях я не только встретился с целым рядом вопросов, ранее совершенно незатронутых, которые я удачно разрешил, но я нашел много новых методов, благодаря которым не только механика, но и сам анализ, по-видимому, в значительной степени обогатился. Таким образом и возникло это сочинение о движении, в котором я изло-

жил аналитическим методом и в удобном порядке как то, что я нашел у других в их работах о движении тел, так и то, что я получил в результате своих размышлений.

В основу разделения этого труда я положил как различие тел, которые движутся, так и их состояние — свободное или несвободное. Сам характер тел дал мне это разделение, так что сначала я стал исследовать движение тел бесконечно малых и как бы точек, а затем я перешел к телам конечной величины, и при этом или к твердым, или к гибким, или состоящим из частей, которые совершенно расходятся друг от друга.

Подобно тому как в геометрии, в которой излагается измерение тел, изложение обыкновенно начинается с точки, точно так же и движение тел конечной величины не может быть объяснено, пока не будет тщательно исследовано движение точек, из которых, как мы принимаем, составлены тела. Ведь нельзя наблюдать и определить движения тела, имеющего конечную величину, не определив сначала, какое движение имеет каждая его маленькая частичка или точка. Вследствие этого изложение вопроса о движении точек есть основа и главная часть всей механики, на которой основываются все остальные части. Для исследования вопроса о движении точек я предназначил эти два первых тома; в первом я рассмотрел свободные точки, во втором — несвободные. Но то, что я изложил в этих книгах, во многих случаях часто идет дальше, чем исследование об одних точках, и из него зачастую можно определить движение конечных тел, разумеется, не всякое, а то, благодаря которому отдельные части движутся совместно. Ведь из того положения, что брошенная в пустоте точка описывает параболу, можно также сделать вывод, что всякое конечное тело, если оно будет брошено, должно двигаться по параболе; однако отсюда еще не следует закона о движении отдельных частей, и этот последний вопрос будет специально разобран в следующих книгах, в которых определяется движение конечных тел. Равным образом то, что Ньютон доказал относительно движения тел, побуждаемых центростремительными силами, имеет значение только для точек, а между тем он правильно применил эти предложения также и к движению планет.

Итак, в этом первом томе я подвергаю исследованию свободные точки и наблюдаю, какое изменение движения вызывают в них любые движущие их силы. Свободным же, с моей точки зрения, тело является тогда, если ему ничто не мешает, чтобы оно двигалось с той скоростью и в том направлении, которое оно должно иметь как вследствие присущего ему движения, так и вследствие движущих его сил. Так, говорят, что планеты и тела на земле, падающие или брошенные вверх, движутся свободно, поскольку при этом движении они следуют как врожденной силе, так и действию движущих сил. Напротив, тело, падающее по наклонной плоскости, или качающийся маятник движутся несвободно, так как находящаяся внизу плоскость или нить маятника

прикрепленная другим концом, препятствуют телу падать прямо, как этого требует сила тяжести.

В первой главе я излагаю основные свойства движения и то, что обычно говорят о скорости, о пути и о времени. Затем я указываю всеобщие законы природы, которым следует свободное тело, не подверженное действию сил. Тело подобного рода, раз оно находится в состоянии покоя, должно вечно пребывать в покое. Если же оно имело движение, оно вечно должно двигаться с той же скоростью по прямому направлению. Оба эти закона наиболее удобно можно представить под именем закона сохранения состояния. Отсюда вытекает, что сохранение состояния является существенным свойством всех тел и что все тела, пока они остаются таковыми, имеют стремление или способность навсегда сохранять свое состояние, а это есть не что иное, как сила инерции. Правда, не очень удачно причине этого сохранения дано имя силы, так как она неоднородна с другими собственно так называемыми силами, каковы, например, сила тяжести, и с ними не может сравниваться. В эту ошибку обычно попадали многие, и прежде всего метафизики, обманутые двусмысленностью этого слова. Так как всякое тело по своей природе пребывает в том же состоянии или покоя или движения, то если тело не следует этому закону, но движется или неравномерно, или по кривой, это нужно приписать действию внешних сил. Такого рода внешними силами являются силы, о равновесии и сравнении которых трактуется в статике и которые, воздействуя на тело, изменяют его состояние, или приводят его в движение, ускоряя, или замедляя, или же, наконец, меняя его направление.

Во второй главе я исследую, какого рода действие должна проявлять каждая сила по отношению к свободной точке, находится ли эта точка в покое или движется. Отсюда выводятся истинные принципы механики, которыми должно объяснить все, что касается изменения движения. Так как до сих пор они были подкреплены слишком слабыми доказательствами, я доказал их так, чтобы для всякого было ясно, что они не только достоверны, но с полной необходимостью являются истинными.

Изложив принципы, на основании которых можно понять, как, с одной стороны, сохраняется движение, с другой — как оно возникает или изменяется под влиянием сил, я перехожу к определению и исследованию самого движения тел, как-либо приведенных в движение при помощи сил. И прежде всего, конечно, я рассматриваю прямолинейное движение как самое легкое для определения. Оно возникает, если под действием одной только силы свободная точка или бывшая в состоянии покоя приводится в движение, или находящаяся уже в движении ускоряется или замедляется в направлении действующей силы. Этому исследованию я посвятил третью и четвертую главы. В первой из них я исследую прямолинейное движение в пустом пространстве, во второй — то же прямолинейное движение в так или иначе сопротивляющейся среде. Хотя сопротивление можно свести к соб-

венно так называемым силам, в этом сочинении мне показалось, полезным изложить учение о перемене движения отдельно от сопротивления как по примеру других, которые писали по этому вопросу, так и вследствие существенной разницы, которая имеется между абсолютными силами и сопротивлением. Ведь абсолютная или собственно так называемая сила имеет определенное, от движения тела не зависящее направление и сверх того одинаково воздействует как на тело, находящееся в движении, так и на тело, находящееся в покое; наоборот, направление сопротивления всегда совпадает с направлением самого движущегося тела и его величина зависит от скорости тела. Хотя в природе не встречается другого сопротивления, кроме того, которое пропорционально квадрату скорости, я подверг обсуждению еще некоторые другие виды сопротивлений как для того, чтобы дать решение большего количества задач, касающихся движения в сопротивляющейся среде, так и главным образом для того, чтобы предложить много прекрасных примеров вычисления.

Наконец, в двух последних главах я рассмотрел криволинейные движения тел, которые возникают, когда направление движущих сил не совпадает с направлением брошенного тела. В этом случае тело постоянно отвлекается от прямого пути и принуждено двигаться по кривой. В пятой главе я изложил подобного рода криволинейное движение в пустоте, в шестой я рассмотрел его же в сопротивляющейся среде. Главные задачи, которые даны в этих главах, заключаются в том, чтобы определить кривую, по которой может двигаться любое брошенное тело, подверженное действию каких угодно сил, и вместе с тем дать скорость тела в отдельных точках этой кривой, при этом как в пустоте, так и в сопротивляющейся среде.

Из этих основных предложений возникли тогда и другие, где или по данной кривой, описанной телом, или по тому или иному данному виду движения требуется найти как движущие силы, так и сопротивление. И в этом случае я прежде всего стремился к тому, чтобы охватить все относящиеся сюда задачи, разобранные Ньютоном и другими авторами, и дать настоящие решения на основе аналитического метода. На этом заканчивается первый том, который, равно как и второй, я составил так, чтобы человек, имеющий достаточный опыт в анализе конечных и бесконечных, мог с поразительной легкостью все это понять и все это произведение прочесть без чьей бы то ни было помощи.

точки/Под. ред. В. П. Егоршина. М.—Л., 1938.
Название на языке оригинала: *Mechanica sive motus scientia analytica exposita*.

¹ Речь идет о сочинении «Новая механика или статика», изданном в Париже в 1725 г..

² Эйлер имеет в виду сочинение «Начала всех математических наук», впервые изданное в 1710 г.

³ Речь идет о сочинении «Форономия, или о силах и движениях твердых и жидких тел», опубликованном в 1716 г.

⁴ Под этим термином Эйлер, как и Ньютон, подразумевал инерцию тела.

Литература

- [1] В настоящее время осуществляется совместное советско-швейцарское издание собрания сочинений Л. Эйлера:
Leonardy Euleri opera omnia.
- [2] Fueter R. Leonard Euler. Basel, 1948.
- [3] Котан В. В. Леонард Эйлер. М., 1961.
- [4] Леонард Эйлер. Сб. ст. М., 1958.



М. В. Ломоносов

1711—1765

О природе теплоты

Идея о том, что теплота обусловлена движением мельчайших частиц, высказывалась еще античными философами. В XVII в. подобной точки зрения на природу теплоты придерживались почти все крупные физики, в том числе Декарт, Бойль, Гук, Ньютон. Однако дальнейшее развитие теплоты как самостоятельного раздела физической науки на рубеже XVII—XVIII вв. привело к почти повсеместному признанию существования «теплорода» — особой невесомой жидкости, ответственной за тепловые явления. Предпринятая Д. Бернулли попытка математически обосновать молекулярно-кинетические воззрения не получила поддержки со стороны западноевропейских ученых. Таково было положение дел, когда в 40-х годах XVIII в. М. В. Ломоносов приступил к исследованию «причин теплоты и холода».

Михаил Васильевич Ломоносов родился 19 ноября 1711 г. в семье крестьянина-помора в деревушке Мешанинской недалеко от Архангельска. Ломоносов с детства стремился к знаниям, но лишь в девятнадцать лет ему удалось начать систематическую учебу. Он изучал латынь и средневековую схоластику в первых русских высших учебных заведениях: Московской славяно-греко-латинской академии и Киевской духовной семинарии, а затем стал студентом университета при образованной в 1725 г. по приказу Петра I Петербургской Академии наук. Как одного из лучших студентов университета его посылают за границу для совершенствования образования в области металлургии. Пятилетнее пребывание за границей позволило Ломоносову основательно пополнить свои знания в точных науках и ознакомиться с научной деятельностью немецких университетов. Возвратившись в Россию с большими планами, он сразу же натолкнулся в Академии на враждебное отношение некоторых иностранцев. С этими «неприятелями наук российских» он боролся всю свою жизнь. В 1745 г. Ломоносов становится профессором химии. С этого времени начинается его активная научная и общественная деятельность.

Диапазон научных интересов Ломоносова был исключительно широк, его без преувеличения можно назвать энциклопедистом.

Он внес значительный вклад в развитие химии и химической технологии, географии, минералогии, геологии, астрономии. При этом Ломоносов был замечательным поэтом, одним из основателей современной системы русского стихосложения, художником, историком, экономистом, философом и просветителем.

Весьма плодотворна была деятельность М. В. Ломоносова и в области физики. Вдохновившись опытами Франклина, Ломоносов совместно с академиком Г. В. Рихманом начинает экспериментально изучать атмосферное электричество. На заре развития науки об электричестве ученый старается создать единую эфирную теорию электрических и световых явлений. Он выдвигает гипотезу о связи электрических и оптических явлений, намечая следующий опыт: «Будет ли луч света иначе преломляться в наэлектризованных стекле и воде?». Это замечание Ломоносова можно рассматривать как предвосхищение эффекта двойного лучепреломления в веществе, помещенном в электрическое поле, которое было открыто в 1875 г. Дж. Керром.

Не поддаваясь авторитету Ньютона, Ломоносов настойчиво пропагандировал волновую теорию света Гюйгенса. Стремясь к механическому объяснению распространения света, он построил оригинальную, хотя и фантастическую, теорию образования цветов.

Следует отметить заслуги Ломоносова в развитии астрономии и астрономической оптики. Он усовершенствовал телескоп Ньютона, предложил конструкцию оригинальной «ночезрительной трубы», позволявшей рассматривать объекты при недостаточном освещении. Ломоносову удалось открыть атмосферу Венеры во время наблюдения прохождения Венеры по диску Солнца 26 мая 1761 г.

Однако центральное место в творчестве Ломоносова-физика занимают его работы в области атомистики и кинетической теории теплоты. Наиболее завершенный вид его взгляды по этим вопросам получают в работах «Размышления о причине теплоты и холода», «Опыт теории упругости воздуха» и «Прибавления к размышлениям об упругости воздуха». История их такова. Возвратясь из зарубежной командировки (1741), молодой ученый составляет план своих будущих физико-химических исследований, среди которых первой значится тема «О теплоте и холоде». 7 декабря 1744 г. Ломоносов представил для обсуждения на конференции Академии диссертацию «О причинах теплоты и холода», которая вскоре (январь 1745 г.) и была прочитана на заседании Академии, однако ее печатание было задержано. Противник Ломоносова, советник канцелярии Академии Шумахер, мечтая отстранить его от профессорской должности, отослал в Берлин ряд естественно-научных работ Ломоносова, включая и эту диссертацию, на отзыв Л. Эйлеру. Ответ от Эйлера был получен 21 ноября 1747 г. Вопреки ожиданиям Шумахера немецкий ученый дал высокую оценку работам Ломоносова, в том числе и «Размышлениям о причине теплоты и холода»:

«Все сии сочинения, — писал Л. Эйлер, — не токмо хороши, но и превосходны, ибо он изъясняет физические и химические материи, самые нужные и трудные, кои совсем неизвестны и невозможны были к истолкованию самым остроумным ученым людям, с таким основательством, что я совсем уверен в точности его доказательств. При сем случае я должен отдать справедливость господину Ломоносову, что он одарован самым счастливым остроумием для объяснения явлений физических и химических».

Отзыв Эйлера оказался своевременным и способствовал укреплению авторитета Ломоносова в Академии. Все труды по физике и химии, представленные ученым в Канцелярию, были «признаны достойными» и включены в первый том «Новых Комментариев». Перед сдачей в набор в июле 1749 г. Ломоносов внес в «Размышления о причинах теплоты и холода» ряд дополнений, еще решительней подчеркнув свои атомистические взгляды. В обстановке почти всеобщего признания флогистонной теории теплоты Ломоносов смело и уверенно показывает, что теплота «заключается во внутреннем движении частичек материи». На основании своей теории теплоты он предсказывает существование нижней границы температур, при которой прекращается «внутреннее движение невидимых частиц». Умер М. В. Ломоносов 15 апреля 1765 г.

Размышления о причине теплоты и холода

§ 1. Очень хорошо известно, что теплота * возбуждается движением: от взаимного трения руки согреваются, дерево загорается пламенем; при ударе кремня об огниво появляются искры; железо накаливается от проковывания частыми и сильными ударами, а если их прекратить, то теплота уменьшается и произведенный огонь в конце концов гаснет. Далее, восприняв теплоту, тела или превращаются в нечувствительные частицы¹ и рассеиваются по воздуху, или распадаются в пепел, или в них настолько уменьшается сила сцепления, что они плавятся. Наконец, зарождение тел, жизнь, произрастание, брожение, гниение ускоряются теплотою, замедляются холодом. Из всего этого совершенно очевидно, что *достаточное основание теплоты заключается в движении*. А так как движение не может происходить без материи, то необходимо, чтобы *достаточное основание теплоты заключалось в движении какой-то материи*. {...}

§ 3. Так как тела могут двигаться двояким движением — *общим*, при котором все тело непрерывно меняет свое место при покоящихся друг относительно друга частях, и *внутренним*, которое есть перемена места нечувствительных частиц материи, так как при самом быстром общем движении часто не наблюдается

* Под этим именем мы понимаем и более напряженную ее силу, обычно называемую огнем.

теплоты, а при отсутствии такового движения наблюдается большая теплота, то очевидно, *теплота состоит во внутреннем движении материи.* (...)

§ 6. Внутреннее движение мы представляем себе происходящим трояким образом: 1) нечувствительные частицы непрерывно изменяют место или 2) вращаются, оставаясь на месте, или, наконец, 3) непрерывно колеблются взад и вперед на нечувствительном пространстве в нечувствительные промежутки времени. Первые мы назовем *поступательным*, второе — *вращательным*, третье — *колебательным* внутренним движением. Теперь следует рассмотреть, которое же из этих движений производит теплоту. Чтобы это выяснить, мы примем за основу следующие положения. 1) *То внутреннее движение не есть причина теплоты, отсутствие которого будет доказано в горячих телах.* 2) *Не является причиной теплоты и то внутреннее движение, которое имеет у тела менее горячего, чем другое тело, лишенное этого движения.* (...)

§ 8. Наоборот, частицы твердых тел, особенно более твердых неорганических, оказываются соединенными такой тесной связью, что энергично сопротивляются внешней силе, стремящейся их разъединить. Вследствие этого им невозможно самопроизвольно, разрушив связь сцепления, отойти друг от друга и двигаться внутренним поступательным движением. Поэтому даже самые незначительные знаки, вырезанные на них, сохраняются веками и уничтожаются лишь от постоянного употребления, или от действия воздуха, или от перехода самого тела в жидкое состояние. В этом отношении хорошим доказательством служит пример золота, которое, будучи нанесено на поверхность серебряных изделий, долгое время остается на ней и стирается только от частого пользования. Наоборот, оно мгновенно оставляет поверхность и распространяется по всей массе серебра, как только серебряная позолоченная вещь плавится на огне. Все это ясно показывает, что частицы твердых тел, особенно более твердых и неорганических, не имеют поступательного движения.

§ 9. Установив это, рассмотрим, во-первых, какой-нибудь серебряный сосуд или другой предмет из этого металла, покрытый золотом и снабженный самыми мелкими вырезанными знаками, нагретый до такой степени тепла, при которой кипит вода. Мы увидим золото на поверхности незатронутым и знаки нимало не изменившимися; самая твердость сосуда остается прежней, и этим совершенно исключена возможность отделения нечувствительных частиц. Отсюда совершенно очевидно, что тело может быть сильно нагрето без внутреннего поступательного движения. Во-вторых, сравним какой-нибудь очень твердый камень, например алмаз, нагретый до температуры плавления свинца (что мастера часто делают, собираясь его шлифовать, без всякого вреда или изменения драгоценного камня), с довольно холодной водою, растворяющей соль и тем самым еще более охлаждающей, или со ртутью, разъедающей серебро. Первый

мы найдем очень горячим без внутреннего поступательного движения, а вода и ртуть, обладающие таким движением, называют очень малую степень теплоты. Это самым наглядным образом свидетельствует, что весьма часто тела, обладающие внутренним поступательным движением, нагреты гораздо меньше, чем те, которые не обладают таковым движением. Отсюда в силу положений, приведенных в § 6, следует, что *внутреннее поступательное движение связанной материи не есть причина теплоты*.

§ 10. Из определения внутреннего колебательного движения (§ 6) ясно видно, что при таком движении частицы тел не могут быть в сцеплении друг с другом. Хотя расстояния, на которых совершаются их крайне малые колебания, весьма незначительны, однако невозможно, чтобы при этом частицы не лишались взаимного касания и по большей части не оказывались вне его. Для ощутимого сцепления частиц тела требуется непрерывное взаимное соприкосновение их; следовательно, частицы тела не могут находиться в ощутимом сцеплении, если они сотрясаются внутренним колебательным движением. Но так как большинство тел при нагревании до огненного каления сохраняет очень сильное сцепление частей, то очевидно, что *теплота тел не происходит от внутреннего колебательного движения связанной материи* (§ 6).

§ 11. Итак, после того как мы отвергли поступательное и колебательное внутренние движения, с необходимостью следует, что *теплота состоит во внутреннем вращательном движении* (§ 6) *связанной материи* (§ 4) — ведь необходимо приписать ее некоторому-нибудь из трех движений.

§ 12. Здесь можно, однако, задать вопрос: могут ли частицы твердых тел, находясь в непрерывном и совершенном сцеплении, вращаться одна около другой? Чтобы ответить на него, достаточно вспомнить, что два куска мрамора, сложенные полированными поверхностями, легко движутся по отношению друг к другу и этому нисколько не препятствует взаимное сильное сцепление; также стеклянные чечевицы при шлифовке столь плотно пристают к быстро вращающимся формам, что не могут быть сдвинуты по линии, перпендикулярной плоскости касания, без порчи их. Приняв это во внимание, мы можем ясно представить себе, что мельчайшие частицы тел могут вращаться одна вокруг другой, несмотря на сцепление, тем легче, чем в меньшем отношении находятся их плоскости соприкосновения ко всей поверхности. Что касается жидкостей, то вполне очевидно, что их частицы, которые в большинстве движутся внутренним поступательным движением, вследствие отсутствия сопротивления, производимого сцеплением, могут иметь и вращательное движение, сохраняя первое.

§ 13. Из этой нашей теории выводятся такие следствия.

1. Для нашего теплотворного движения самой подходящей является шарообразная форма корпускул материи, так как такие

частицы могут взаимно касаться только в одной точке и не производят по отношению друг к другу почти никакого трения.

2. Так как каждое движение, будучи величиной, может увеличиваться и уменьшаться, то надо то же предполагать и для теплотворного движения. Но чем больше это движение, тем значительнее будет его действие. Отсюда при увеличении теплотворного движения, т. е. при более быстром вращении частиц связанной материи, теплота должна увеличиваться, а при более медленном — уменьшаться.

3. Частицы горячих тел вращаются быстрее, более холодных — медленнее.

4. Горячие тела должны охлаждаться при соприкосновении с холодными, так как оно замедляет теплотворное движение частиц; наоборот, холодные тела должны нагреваться вследствие ускорения движения при соприкосновении. Итак, когда рука ощущает теплоту в каком-либо теле, то частицы связанной материи руки приводятся в более быстрое вращательное движение, а при ощущении холода их вращательное движение замедляется.

§ 14. Нет более надежного способа доказательства, чем способ математиков, которые подтверждают выведенные а priori положения примерами и проверкой а posteriori. Поэтому мы, чтобы развить далее нашу теорию, по примеру математиков объясним важнейшие явления, наблюдаемые для огня и теплоты, и тем подтвердим полную правильность выдвинутого в § 11 положения.

§ 15. *Явление 1.* При взаимном трении твердых тел одно из них движется по другому и скребет его [рис. 61]; отсюда следует, что частицы, расположенные на поверхностях трения, ударяются друг о друга. Итак, пусть тело AB движется по телу CD из B в A . Частица ab частью своей поверхности b ударяет в часть c поверхности частицы cd , так что частица ab возбуждает движение частицы cd , и, наоборот, частица cd силою своего соприкосновения возбуждает к обратному движению частицу ab . Так как и та и другая входят в состав твердого тела, то они не могут оставить своего места и двигаться поступательно, но движение тела AB не прекращается. Следовательно, частица cd будет двигаться вокруг своего центра в том направлении, в каком ее толкает частица ab , а частица ab — около своего центра в том направлении, в котором ее задерживает частица cd , т. е. обе будут двигаться вращательно. Когда, таким образом, придут во вращательное движение отдельные частицы, которые расположены в плоскости трения, то вследствие распространения трения придут во вращательное движение и остальные частицы.

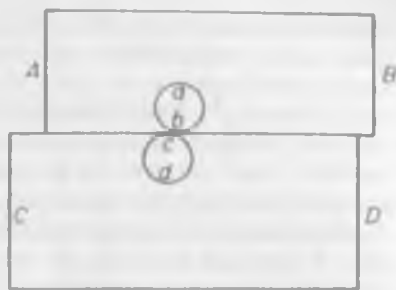


рис. 61

составляющие тела AB и CD . Отсюда ясно, каким образом твердые тела нагреваются от взаимного трения. Далее, происходят такие следствия.

Явление 2. Чем сильнее при трении сжимаются поверхности тел AB и CD и чем скорее они движутся друг возле друга, тем сильнее возбуждаются к вращательному движению частицы ab и cd и тем быстрее разогреваются тела.

Явление 3. Так как частицы жидких тел очень слабо сцеплены друг с другом и очень легко уходят со своего места, то частицы ab и cd , если они находятся на поверхности жидких тел, уступая место друг другу, не могут воспринять то вращательное движение, которое получают частицы, входящие в состав твердого тела. Вследствие всего этого жидкие тела не только не нагреваются заметным образом от трения, возникающего между массами взбалтываемой жидкости, но не нагреваются заметным образом и твердые тела, если поверхность их смочена жидкостью. (...)

§ 26. Здесь представляется уместным указать и причину расширения тел, которые обыкновенно увеличиваются и уменьшаются соответственно их теплоте. Но так как расширение происходит не непосредственно от теплоты, но от упругости воздуха, включенного в поры тела, то мы оставляем рассмотрение этого явления до другого раза. Далее, нельзя назвать такую большую скорость движения, чтобы мысленно нельзя было представить себе другую, еще большую. Это по справедливости относится, конечно, и к теплотворному движению; поэтому невозможна высшая и последняя степень теплоты как движения. Наоборот, то же самое движение может настолько уменьшиться, что тело достигает, наконец, состояния совершенного покоя и никакое дальнейшее уменьшение движения невозможно. Следовательно, по необходимости должна существовать наибольшая и последняя степень холода, которая должна состоять в полном прекращении вращательного движения частиц.

§ 27. Итак, хотя высшая степень холода возможна, однако нет недостатка в данных, говорящих о том, что таковая на земном водном шаре нигде не существует. Действительно, все, что нам кажется холодным, лишь менее тепло, чем наши органы чувств. Так, самая холодная вода еще тепла, так как лед, в который вода превращается на более сильном морозе, холоднее ее, т. е. менее тепел. Если плавящийся воск действительно горяч, то почему воде, которая кажется нам очень холодной, на самом деле не быть теплой — она ведь не что иное, как расплавленный лед. Не следует, однако, считать замерзание тел признаком наибольшего холода: ведь металлы, затвердевшие тотчас после плавления, представляют собою своего рода лед, но они настолько горячи, что зажигают приближенные к ним горячие тела. Впрочем, существуют жидкие тела, которые не замерзают ни при какой известной степени холода. Так как их жидкое состояние обусловлено теплотворным движением (§ 24), то ясно, что эти жидкие тела всегда в какой-то степени обладают теплотою. Далее, тела

обыкновенно имеют степень теплоты, присущую среде, в которой они находятся значительное время. А так как воздух, всегда и везде наблюдаемый, жидок, т. е. (в силу показанного) тепел, то все тела, окруженные земной атмосферой, хотя бы и казались чувствам холодными, теплы; и поэтому высшей степени холода на нашем земноводном шаре не существует.

§ 28. Таким образом, мы доказали а priori и подтвердили а posteriori, что причиною теплоты является внутреннее вращательное движение связанной материи. Теперь переходим к рассмотрению мнений, которые большинство современных ученых высказывают относительно теплоты. В наше время причина теплоты приписывается особой материи, которую большинство называет теплотворной, другие — эфиром, а некоторые — элементарным огнем. Говорят, что тем большее количество ее находится в теле, чем большая степень теплоты в нем наблюдается, так что в соответствии со степенью теплоты данного тела количество теплотворной материи в нем увеличивается или уменьшается. И хотя иногда принимают, что теплота тела увеличивается силою движения этой вошедшей в нее материи, но чаще всего считают истинной причиной увеличения или уменьшения теплоты простой приход или уход разных ее количеств. Это мнение в умах многих пустило такие глубокие корни и настолько укрепились, что повсюду приходится читать в физических сочинениях о внедрении в поры тел названной выше теплотворной материи, как бы привлекаемой каким-то приворотным зельем; или, наоборот, о бурном выходе ее из пор, как бы объятая ужасом. Поэтому мы считаем нашей обязанностью подвергнуть эту гипотезу проверке. Прежде всего надо осветить источники, из которых проистекало это мнение. Важнейшие из них четыре, которые следовало бы скорее обратить на истолкование других явлений природы.

§ 29. После того как ученые начали более внимательно изучать явления, связанные с нагреванием тел, они легко заметили, что при увеличении теплоты растет и объем каждого тела. И так как они точно знали, что к телам не прибавилось ничего, кроме теплоты, а в умах еще крепко держалось представление древних об элементарном огне, то они не поколебались заключить, что при накаливании в поры тел входит какая-то материя, свойственная огню, и расширяет их, а при выходе ее тела охлаждаются и сжимаются. Охотно согласились бы мы с ними, если бы было так же легко, как предполагать это, показать, что именно теплотворная материя загоняется во внезапно нагревающиеся тела. Каким образом, спрашивается, в самую холодную зиму, когда все охвачено лютым морозом, или в самой холодной морской глубине*, где, согласно этой гипотезе, теплотворной материи почти совершенно нет, порох, зажженный малейшей внезапно зародившейся искрою, вспыхивает вдруг огромным пламенем? Откуда и в силу какой удивительной способности материя эта

мгновенно стягивается в одно место? Но пусть она слетается столь стремительно, по какой бы то ни были причине, из самых отдаленных мест и, зажигая, расширяет порох. Но ведь в этом случае необходимо, или чтобы другие тела, окружающие порох, раньше его нагрелись от прилетевшего огня и расширились, или чтобы этот летучий огонь ничего, кроме пороха, не мог зажигать и расширять, т. е. должен был бы позабыть свою природу. Первое, очевидно, противоречит опыту, а второе — здравому смыслу. <...>

§ 34. На основании изложенного мы утверждаем, что нельзя приписывать теплоту тел сгущению какой-то тонкой, специально для того предназначенной материи, но что теплота состоит во внутреннем вращательном движении связанной материи нагретого тела. При этом мы не только говорим, что такое движение и теплота свойственны и той тончайшей материи эфира, которой заполнены все пространства, не содержащие чувствительных тел, но и утверждаем, что материя эфира может сообщать полученное от Солнца теплотворное движение нашей Земле и остальным телам мира и их нагревать, являясь той средой, при помощи которой тела, отдаленные друг от друга, сообщают теплоту без посредничества чего-либо осязательного. <...>

Комментарий

Перевод с латинского диссертации М. В. Ломоносова «Размышления о причине теплоты и холода» выполнен Б. Н. Меншуткиным. Первая публикация диссертации: *Novi Commentarii Academiae scientiarum imperialis Petropolitanae*. Т. 1, 1750, р. 206—229. Отрывки из диссертации воспроизводятся по изданию: Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 2. Труды по физике и химии. 1747—1752 гг. М. — Л., 1951.

¹ Так Ломоносов называет молекулы.

Литература

- [1] Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. В 11 т. М. — Л., 1950—1983.
- [2] Вавилов С. И. Михаил Васильевич Ломоносов. М., 1961.
- [3] Елисева А. А., Литвинский И. Б. М. В. Ломоносов. Первый русский физик. М., 1961.
- [4] Кузнецов Б. Г. Творческий путь Ломоносова. М., 1961.



Б. Франклин

1706—1790

О статическом электричестве

В течение длительного времени исследования в области электричества оставались как бы на втором плане по отношению к работам по магнетизму. Это объясняется, во-первых, большой практической значимостью такого устройства, как магнитный компас, а во-вторых, простотой демонстрации действия намагниченных тел и относительной сложностью воспроизведения электростатических эффектов. Большую роль для прогресса науки об электричестве сыграло изобретение во второй половине XVII в. электростатической машины (О. Герике). Однако систематические исследования в этой области начались лишь в XVIII в. В первой половине XVIII в. был обнаружен ряд важнейших фактов и явлений: электропроводность (С. Грей), существование двух видов электричества (Ш. Дюфа), возможность накапливать заряд с помощью конденсатора — лейденской банки (Э. Клейст, П. Мушенбрек) и др. Особое значение имели исследования американского естествоиспытателя Б. Франклина.

Бенджамин Франклин родился 17 января 1706 г. в Бостоне в многодетной семье владельца сальной мастерской, покинувшего Англию в надежде поправить материальное положение в Америке.

Трудовая жизнь Франклина началась очень рано — с десяти лет. Сначала он работает в мастерской отца, а затем в типографии старшего брата, где мальчик получает не только возможность освоить профессию наборщика, но и доступ к книгам. Его статьи, помещенные без подписи в газете брата, неожиданно привлекают внимание публики. Юноша принимает решение начать самостоятельную жизнь и тайно от родителей покидает город. Скитания приводят его в Филадельфию, с которой оказывается связана вся дальнейшая жизнь Франклина.

В 1727 г. он организует юношеский просветительный клуб, на базе которого было создано Филадельфийское философское общество — первое научно-исследовательское учреждение в Америке. С именем Франклина связано создание первой в Америке публичной библиотеки. Постепенно Франклин становится одним из наиболее активных политических деятелей Америки. Выполняя сложные дипломатические поручения, он много сделал для победы бывшей английской колонии в борьбе за независимость. Умер Франклин 17 апреля 1790 г.

Научная судьба Франклина весьма необычна. Он не был ученым ни по образованию, ни по роду деятельности. Собственно физическим исследованиям он посвятил всего семь лет жизни (примерно 1747—1754 гг.).

Причиной обращения Франклина к исследованиям по электричеству послужил случай. В 1743 г. Франклин присутствовал на демонстрации физических опытов с электричеством неким А. Спенсером, гастролировавшим в то время по городам английских колоний в Америке. Опыты так заинтересовали Франклина, что он купил все приборы Спенсера и вместе со своими друзьями по Филадельфийскому философскому обществу приступил к исследованиям. Следует отметить, что до встречи со Спенсером Франклин ничего не знал об электричестве.

Узнав, что в Филадельфии группа молодых людей увлеклась электрическими опытами, английский ботаник и купец, член Лондонского Королевского общества П. Коллинсон прислал Франклину специальную стеклянную трубку, дававшую при трении ее большой заряд. Между Франклином, Коллинсоном и другими членами Королевского общества завязалась переписка, сыгравшая исключительно важную роль в творческой судьбе ученого. В письмах Франклин описал все свои труды и теоретические рассуждения, составившие затем его труд «Опыты и наблюдения над электричеством».

Уже в первых письмах Коллинсону Франклин сообщил об оригинальных наблюдениях, в частности об обнаружении «способности заостренных предметов извлекать и испускать электрический огонь». Очень скоро у начинающего исследователя формируется качественная теория электрических явлений, получившая название «унитарной». Согласно этой теории, «положительное» и «отрицательное» электричество (эти термины вводит сам Франклин) объясняется на основании существования одной электрической материи — «электрического огня». Избыток ее в теле приводит к положительной электризации, недостаток — к отрицательной. Чуть позже Франклин устанавливает закон сохранения электрического заряда, дает на основании своей теории объяснение принципа действия лейденской банки.

В июне 1752 г. Франклин осуществил опыт с воздушным змеем, послужившим прямым доказательством электрической природы молний. Этот опыт произвел сенсацию и стимулировал развитие электрических исследований.

Идея о молниеотводе появилась у Франклина вместе с гипотезой об электрическом происхождении молнии еще в 1748 г. В работе «Взгляды и предположения касательно свойств и действий электрической субстанции, вытекающие из опытов и наблюдений, проведенных в Филадельфии в 1749 г.» он описал возможную конструкцию молниеотвода: «... не могут ли сведения об этой силе заостренных предметов принести пользу человечеству в деле спасения домов, храмов, кораблей и т. п. от удара молний, побудив нас устанавливать на самых высоких местах

этих зданий вертикальные железные прутки, заостренные, как иглы, и позолоченные для защиты от ржавления, а от их основания опускать вниз проволоку снаружи здания до земли или вдоль одного из винтов корабля по борту до воды? Не отведут ли острия электрический огонь из тучи тихо, быть может, еще до того, как она приблизится на ударное расстояние, и тем самым не спасут ли они нас от самого внезапного и ужасного зла!». В этих словах отражается характерная черта всего творчества Франклина — стремление к извлечению практической пользы из научных идей.

Опыты и наблюдения над электричеством

Письмо II

*Бен. Франклина, Филадельфия, члену Королевского общества
Питеру Коллинсону, Лондон*

11 июля 1747 г.

Сэр,

В своем последнем письме я уведомлял Вас о том, что при занятиях электрическими опытами мы наблюдали ряд представляющих нам новыми явлений, о которых я обещал Вам написать, хотя, как я предвижу, они могут быть не новыми для Вас, поскольку электрическими опытами по Вашу сторону океана уже занимается множество людей, и кое-кому из них, вероятно, удалось сделать те же самые наблюдения.

Первое из них заключается в замечательной способности заостренных предметов *извлекать* и *испускать* электрический огонь.

Например, поместите чугунный шар диаметром в три-четыре дюйма на горлышке чистой сухой стеклянной бутылки. Подвесьте на тонкой шелковой нити, прикрепленной к потолку, прямо над горлышком бутылки, небольшой пробковый шарик, величиной с горошину; длина нитки должна быть такой, чтобы пробковый шарик соприкасался с чугунным шаром сбоку. Наэлектризуйте шар, и пробковая горошина отлетит приблизительно на четыре-пять дюймов в зависимости от количества электричества... Если в этом положении приблизить к шару острие длинного тонкого кинжала на расстояние шести-восьми дюймов, то отталкивание мгновенно прекратится и пробковая горошина возвратится к шару. Чтобы добиться такого же действия при помощи тупого предмета, Вам придется подвести его к шару на расстояние до одного дюйма, пока не проскочит искра. Для доказательства того, что электрический огонь *извлекается* острием, выньте нож из деревянной ручки и, закрепив его в палочке сургуча, подведи-

те к шару на такое же расстояние, как и раньше, или даже почти вплотную, и прежнего действия Вы уже не обнаружите — но достаточно провести пальцем по сургучу и коснуться лезвия, как горошина моментально устремится к шару...

Если Вы станете подводить острие к шару в темноте, то увидите, иногда при расстоянии между ними в один фут или даже больше, как острие начинает светиться подобно светлячку. Чем менее заострен предмет, тем ближе потребуются подвести его, чтобы увидеть свет, и как только свечение становится заметным, Вы сможете извлечь электрический огонь и уничтожить отталкивание. Если подвешенную пробковую горошину отвести в сторону электрической трубкой и затем быстро поднести к ней острие, хотя бы и на значительное расстояние, то горошина до поразительности скоро устремится обратно к трубке... деревянное острие окажет почти такое же действие, как и железное, если только дерево не будет очень сухим, потому что совершенно сухое дерево, как и сургуч, не проводит электричества.

Чтобы убедиться в том, что острия способны не только извлекать, но и испускать электрический огонь*, положите длинную острую иглу на шар, и тогда Вы не сумеете наэлектризовать его настолько, чтобы он оттолкнул пробковую горошину, либо прикрепите иглу к концу подвешенного ружейного ствола или железного прутка с таким расчетом, чтобы она выдавалась вперед наподобие крохотного штыка**. До тех пор, пока игла остается на своем месте, наэлектризовать ружейный ствол или прутки посредством подведения трубки с другого конца, чтобы получить искру, не удастся, потому что электрический огонь будет непрерывно и тихо стекать с конца иглы. В темноте Вы сможете наблюдать картину наподобие уже упоминавшейся выше.

Отталкивание между пробковой горошиной и шаром уничтожается еще и в следующих случаях: 1) если шар посыпать мелким песком (отталкивание в этом случае уничтожается постепенно); 2) если подуть на шар; 3) если его окутать дымом горячей лучины***; 4) если осветить шар свечой даже с расстояния

* Об этой способности заостренных тел испускать электрический огонь впервые сообщил мне мой изобретательный друг г-н Томас Гопкинсон (ныне покойный), добродетель и честность которого во всех делах, будь то общественные или житейские, делают навечно память о нем дорогой всем, знавшим его и умевшим ценить его.

** Этот опыт, поставленный в надежде извлечь с острия, как со своеобразного фокуса, более сильную искру, принадлежит г-ну Гопкинсону. К его удивлению, он не получил никакой или почти никакой искры.

*** Мы полагаем, что всякая частичка песка, влаги или дыма, будучи сначала притянута, а затем оттолкнута, уносит с собой дольку электрического огня, которая, однако, сохраняется в этих частичках, пока они не передадут ее куда-нибудь еще. Эта долька в действительности никогда не уничтожается... Точно так же, когда воду льют на обычный огонь, мы не считаем, что тем самым этот элемент уничтожается или исчезает; он лишь распыляется, так как всякая частица воды уносит с собой в виде пара свою долю огня, которую она притянула и присоединила к себе.

и один фут (отталкивание в этом случае пропадает мгновенно)... Свет раскаленного древесного угля и нагретого до красного каления железа оказывает такое же действие, но только на меньшем расстоянии. Дым от кусочка сухой смолы, брошенного на раскаленное железо, не уничтожает отталкивания. Он притягивается и шаром и пробковой горошиной, создавая вокруг них красивые образования правильной формы, напоминающие рисунки из «Теории происхождения Земли» Бернета и Уистона. N. В. Этот опыт следует проводить в чулане с совершенно неподвижным воздухом, в противном случае он может не удался.

Яркий солнечный свет, длительное время направляемый при помощи зеркала одновременно на пробку и на шар, совсем не влияет на отталкивание. Эта разница между действием света огня и солнца представляет собой еще одно явление, кажущееся нам новым и необычным*.

Некоторое время мы держались взгляда, что электрический огонь натиранием не создается, а только собирается, будучи на самом деле элементом, рассеянным среди другой субстанции и притягиваемым ею, в частности водой и металлами. Нам даже удалось обнаружить и показать на опыте его приток к электрической сфере и отток от нее при помощи маленьких легких вертушек, по форме напоминающих колеса ветряной мельницы. Их лопасти были сделаны из плотной бумаги и насажены под углом на ось из тонкой проволоки, вокруг которой они свободно вращались. Подобные вертушки с таким же успехом могут иметь форму колес водяной мельницы. Об устройстве и применении таких вертушек, а также о различных наблюдавшихся при этом явлениях можно было бы, если бы я располагал временем, написать целый лист**. На невозможность наэлектризовать самого себя (даже если стоишь на подставке из воска) путем натирания трубки или извлечь из нее электрический огонь, приблизив ее к человеку или предмету, стоящему на полу, и т. д. мы обратили внимание еще за несколько месяцев до получения остроумной книги г-на Уотсона «Следствие». Как раз о некоторых подобных вещах я и собирался написать Вам... Теперь же мне остается только указать на некоторые особенности, о которых ничего не говорится в этой книге, да дать еще свои пояснения к ним, хотя, пожалуй, вполне можно было бы обойтись и без них.

* Эта разница в воздействии вызывается, вероятно, не различной природой света, а скорее тем, что частицы, отделяющиеся от свечи, сначала притягиваются, а затем отталкиваются и уносят с собой электрическую субстанцию, а также и то, что с разрежением воздуха между светящимся углем или нагретым до красного каления железом и наэлектризованным шаром электрическая жидкость протекает легче.

** Об этих опытах с вертушками мне сообщил мой уважаемый и изобретательный друг г-н Филипп Синг. Позже мы обнаружили, что движение этих вертушек объясняется не притоком или оттоком электрической жидкости, а разными обстоятельствами, связанными с притяжением и отталкиванием (1750).

1. Человек, стоящий на подставке из воска и натирающий электрическую трубку, равно как и другой человек, тоже на подставке из воска, извлекающий огонь (при условии, что они стоят, не соприкасаясь друг с другом), должны быть оба наэлектризованы по отношению к человеку, стоящему на полу. Таким образом, последний почувствует искру при прикосновении к любому из них своим пальцем.

2. Но если люди, стоящие на воске, будут соприкасаться друг с другом при возбуждении трубки, то никто из них не будет наэлектризован.

3. Если же они дотронутся друг до друга после возбуждения трубки и извлечения огня, как об этом говорилось выше, то между ними проскочит более сильная искра, чем между любым из них и человеком, стоящим на полу.

4. После такой сильной искры ни один из этих двух людей уже не будет наэлектризован.

Эти явления мы пытаемся объяснить следующим образом. Предположим, как это уже говорилось, что электрический огонь является распространенным элементом и что все три упоминавшихся выше лица имели равные его доли до начала всяких манипуляций с трубкой. Человек *A*, стоящий на восковой подставке и натирающий трубку, передает находящийся в нем самый электрический огонь стеклу. Сообщению этого человека с окружающими предметами препятствует воск, в связи с чем запасы электрического огня в его теле не могут быть пополнены незамедлительно. Человек *B* (тоже стоящий на подставке из воска), проводя пальцем вдоль трубки, приобретает огонь, полученный стеклом от *A*, а поскольку его сообщение с окружающими предметами также предотвращено, оно сохраняет полученное им дополнительное количество электричества... По отношению к человеку *C*, стоящему на полу, оба они кажутся наэлектризованными, ибо он, обладая только средним количеством электрического огня, извлечет искру при приближении к *B*, у которого имеется избыток, и испустит искру в направлении к человеку *A*, который испытывает недостаток электрического огня. Если *A* и *B* приблизятся друг к другу, то искра получится сильнее, потому что разница между ними больше. После такого соприкосновения искра между любым из них и *C* уже проскочить не может, потому что количество электрического огня во всех трех из них свелось к исходному. Если они соприкасаются при электризации, равновесие при этом не нарушается, так как происходит только циркуляция огня. Отсюда мы вынуждены были ввести некоторые новые термины. Мы говорим, что *B* (или любой предмет в таких же условиях) *наэлектризован положительно*, а *A* — *отрицательно*, или, предпочтительнее, *B* *наэлектризован плюс*, а *A* — *минус*. И мы каждодневно в наших опытах электризуем предметы *плюс* или *минус*, как это нам бывает нужно. Чтобы электризовать *плюс* или *минус*, требуется знать лишь только то, что части трубки или шара, которые

натираются, притягивают в момент трения электрический огонь и, значит, забирают его из предмета, которым производится натирание. Эти же самые части, как только прекратится их натирание, стремятся отдать полученный ими огонь любому предмету с меньшим его количеством. Следовательно, вы сможете осуществить его кругообращение, как это показал г-н Уотсон. Вы в состоянии также накапливать его на любом предмете или выводить его из такого предмета, соединив последний с предметом, которым осуществляется натирание, или с приемником при условии отсутствия сообщения с окружающими предметами. Нам думается, что изобретательный джентльмен впал в заблуждение, представив себе (в своей книге «Следствие»), что электрический огонь притек по проволоке с потолка к ружейному стволу, отсюда к шару и таким образом наэлектризовал машину и человека, вращающего колесо, и т. д. Мы же полагаем, что он был *отведен*, а не поступил посредством проволоки, и что машина, человек и т. д. были наэлектризованы *отрицательно*, т. е. содержали в себе меньше электрического огня, чем окружающие предметы.

Поскольку корабль вот-вот должен отплыть, я не успею написать Вам столь обстоятельный отчет об американском электричестве, как мне хотелось бы. Упомяну лишь еще о немногих подробностях. Мы считаем, что банку¹ лучше наполнять не водой, а свинцовой дробью. Тогда ее проще нагревать и сохранять нагретой и сухой во влажном воздухе... При помощи провода банки мы зажигаем спирт... Мы зажигаем только что погашенные свечи, пропуская искру между проводом и нагарником... Мы воспроизводим молнию, перемещая провод в темноте над фарфором с золочеными цветами или прикасаясь им к позолоте рамы зеркала... Мы электризуем человека двадцать с лишним раз подряд прикосновением пальца к проводу. Это делается следующим образом. Он стоит на подставке из воска. Дайте ему в руки наэлектризованную банку. Прикоснитесь пальцем к проводу, а затем к его руке или лицу — всякий раз проскакивает искра*.

Мы в громадной степени увеличиваем силу электрического поцелуя следующим образом. Пусть *A* и *B* стоят на воске, или *A* — на воске, а *B* — на полу. Дайте в руки одному из них наэлектризованную банку, а другой пусть возьмется за провод, и тогда возникает небольшая искра. Но если они сблизятся губами, то почувствуют удар и испугаются. То же самое случается, когда другой джентльмен *C* или леди *D*, также стоящие на воске, возьмутся за руки с *A* и *B* и подадут друг другу руки

* Когда из провода извлекается искра, количество электричества в банке уменьшается. После этого наружная часть банки извлечет какую-то его долю из человека с банкой в руках и оставит его в отрицательном состоянии. Теперь, если кто-нибудь дотронется до руки или лица этого человека, последнему возвращается равное количество электричества за счет дотрагивающегося.

для рукопожатия. Мы подвешиваем на тонкой шелковой нити игрушечного паучка, сделанного из маленького кусочка обожженной пробки, с ножками из льняных нитей и прикрепленными к туловищу одной или двумя свинцовыми дробинками для утяжеления. К столу, над которым подвешен паучок, в вертикальном положении на одной высоте с проводом банки прикрепляется проволока на расстоянии четырех или пяти дюймов от паучка. Затем мы его оживляем, поднося к нему с противоположной стороны на то же расстояние, что и вертикальная проволока, наэлектризованную банку. Он тотчас же подлетит к проводу банки, подогнет ноги при соприкосновении, оттолкнется и помчится к проволоке на столе, а затем снова к проводу, весьма забавно шевеля ножками и создавая для непосвященных полную видимость живого паучка. В сухую погоду он производит такие движения до часа или больше... Мы электризуем в темноте книгу с двойной линией позолоты вокруг обложек, покоящуюся на подставке из воска, и затем дотрагиваемся до позолоты пальцем. Всякий раз на всей позолоте, но не на коже, словно молния, вспыхивает огонь. Подобной вспышки не возникает, если палец приложить не к позолоте, а к коже. Свои трубки мы натираем оленьей кожей, следя за тем, чтобы это всегда делалось одной и той же стороной и чтобы, во избежание загрязнений, никогда не братья за них руками. Тогда трубки действуют безотказно и легко, не требуя особых усилий с нашей стороны, особенно если их хранить в хорошо подогнанных, плотно закрывающихся картонных футлярах с фланелевой подкладкой*. Об этом я упоминаю только потому, что в европейских книгах по электричеству сплошь да рядом о натирании трубок говорится как об утомительной процедуре. Наши шары закреплены на сквозных железных осях. С одного конца оси имеется небольшая ручка, посредством которой вы поворачиваете шар, как обычный точильный камень. Это, по нашему разумению, очень удобно, так как тогда машина занимает совсем мало места, легко переносится с места на место и может храниться когда в ней нет надобности, в плотно закрывающемся футляре**. Правда, шар вращается не так быстро, как в случае применения большого колеса, но скорость, как нам кажется, играет малую роль, поскольку несколько оборотов шара заряжают банку в достаточной степени.

Остаюсь и проч.

Б. Франклин

* Наши трубки толщиной в обхват руки сделаны из зеленого стекла и имеют длину от 27 до 30 дюймов.

** Эта простая и легкая в изготовлении машина является изобретением Г. Синга.

Перевод с английского сочинения Б. Франклина выполнен В. А. Алексеевым. Отрывок воспроизводится по изданию: Франклин В. Опыты и наблюдения над электричеством. М., 1956.

Франклин имеет в виду лейденскую банку, которую иногда называли также бутылкой.

- [1] Сочинения Б. Франклина:
 - a) Benjamin Franklin's Experiments. Ed. by I. B. Cohen. Cambridge (Mass.), 1941.
 - б) The Works of Benjamin Franklin. Vol. 1—10. Boston, 1840.
- [2] Cohen I. B. Franklin and Newton. Philadelphia, 1956.
- [3] Иванов Р. Ф. Франклин. М., 1972.
- [4] Радовский М. И. Вениамин Франклин. М. — Л., 1965.



П. Бугер
1698—1758



И. Ламберт
1728—1777

О фотометрии

На фоне богатого событиями семнадцатого столетия восемнадцатый век в истории оптики представляется периодом спокойного развития, почти застоя. После выдвижения в конце XVII в. двух основных теорий света — волновой и корпускулярной — наступил этап их сравнительного анализа, осмысления того, насколько каждая из них соответствует данным опыта. Хотя в XVIII в. большинство ученых придерживалось корпускулярных представлений о свете, все же время от времени появлялись работы, в которых отмечались трудности, возникающие при попытках их использования для объяснения оптических явлений. Однако существенного прогресса в вопросе о природе света в этот период достигнуто не было. И все же нельзя сказать, что XVIII в. не оставил следа в развитии оптики. Именно в это время были заложены основы одного из разделов науки о свете — фотометрии. Заслуга разработки принципов фотометрии принадлежит двум ученым: французу П. Бугеру и немцу И. Ламберту. Хотя их основные работы, относящиеся к этой области, появились одновременно (1760), раньше к исследованиям по фотометрии приступил П. Бугер.

Пьер Бугер родился в Бретани в 1698 г. в семье профессора гидрографии. Мальчик был вундеркиндом — уже в четырнадцать лет, после смерти отца, он занял его кафедру. Очень скоро Бугер завоевал репутацию ведущего специалиста в области морских наук. К 1735 г., когда он стал действительным членом Парижской Академии наук, на его счету было уже три премии Академии, полученные за победы в международных конкурсах, темы которых относились к кораблестроению, навигации и астрономии.

В 1735 г. вместе с другим академиком Ш. Кондамином Бугер возглавил экспедицию в Перу, целью которой было измерение дуги меридиана вблизи экватора (эти измерения должны были стать решающим аргументом в многолетнем споре о форме Земли). В экспедиции, несмотря на тяжелейшие условия, Бугер не только проводил геофизические измерения, но и ставил раз-

нообразные физические эксперименты: изучал расширение твердых тел и астрономическую рефракцию, проводил барометрические измерения и т. д. На родину Бугер вернулся лишь в 1744 г., полностью выполнив задание Академии.

Во второй половине 40-х — начале 50-х годов Бугер много занимался вопросами кораблестроения и кораблевождения и опубликовал на эту тему несколько книг. В последние годы жизни Бугер работал над сочинением, благодаря которому его имя вошло в историю оптики, — «Оптическим трактатом по градации света». Однако эта книга увидела свет уже после смерти ученого, последовавшей 15 августа 1758 г.

Проблемой измерений «количества света» Бугер заинтересовался еще в молодости, в 1721 г., в связи с постановкой геофизической задачи, для решения которой требовалось знание относительного «количества» солнечного света, падающего на поверхность Земли на различных широтах. В 1725 г. Бугер провел соответствующее измерение для света от полной Луны, причем эталоном служил свет свечи. В 1729 г. была издана первая работа Бугера по фотометрии, в которой он предложил конструкцию фотометра, основанную на способности человеческого глаза с высокой точностью сравнивать освещенность двух поверхностей. В своих рассуждениях, обосновывающих конструкцию этого прибора, Бугер воспользовался идеей Кеплера о том, что интенсивность света при удалении от источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Тогда же Бугер открыл закон экспоненциального убывания интенсивности света в прозрачных телах.

Спустя четверть века Бугер вернулся к проблематике, связанной с фотометрией. Его «Оптический трактат» содержит более пространное изложение теории и описание фотометров нескольких типов. В этой обобщающей работе Бугер попытался рассмотреть и случаи наклонного падения лучей, однако заслуга систематической разработки этих вопросов принадлежит уже Ламберту.

Иоганн Генрих Ламберт родился 26(?) августа 1728 г. в Мюльхаузене (Эльзас) в многодетной семье портного. В двенадцать лет мальчик был вынужден оставить школу, чтобы помогать отцу; однако он продолжал учиться самостоятельно. Усилия юного Ламберта не пропали даром. В пятнадцать лет он становится переписчиком, а через два года — секретарем издателя в Базеле.

В Базеле Ламберту предоставляется возможность пополнить свое образование, и он усиленно занимается математикой, астрономией, проявляет интерес к проблемам теории познания. С 1748 по 1758 г. Ламберт служит домашним учителем в семье аристократа в Куре. В этот период начинается его научная деятельность. Первая опубликованная работа Ламберта была посвящена тепловым измерениям. Вместе со своим учеником

Ламберт совершает путешествие по Европе, во время которого знакомится с известными учеными (Т. Майером, П. Мушенбромом, Ж. Даламбером и др.).

После прекращения преподавательской деятельности Ламберт некоторое время ведет астрономические наблюдения в Швейцарии, затем переезжает в Мюнхен для организации Баварской Академии наук, участвует в геодезических съемках для установления границы между Швейцарией и Италией. В это же время Ламберт получает приглашение в Петербургскую Академию наук, но предпочитает Прусскую Академию, членом которой становится в 1765 г. За двадцать лет деятельности в Прусской Академии ученый подготовил более 150 работ, относящихся к различным отраслям знаний. Ламберт умер 25 сентября 1777 г.

Ламберт много занимался философией. Хотя он явно находился под влиянием идей Г.-В. Лейбница, Х. Вольфа, Н. Мальбранша и Дж. Локка, некоторые историки философии усматривают в его работах предвосхищение идей Канта. Сам автор «Критики чистого разума» считал Ламберта серьезным философом. В его философских работах большое внимание уделялось логике. Следуя идее Г.-В. Лейбница, Ламберт пытался построить нечто подобное алгебре логики. Ему принадлежит термин «семиотика» для обозначения универсального языка символов, вошедший в современную науку.

В астрономии известны исследования Ламберта по теории орбит комет, особенностей движения Сатурна и Юпитера. Он занимался проблемами космологии и выдвинул идею об иерархическом строении Вселенной, ввел понятие о двойных звездах (Многие идеи Ламберта были впоследствии подтверждены наблюдениями В. Гершеля.) Основное сочинение Ламберта по космологии (1761) было переведено на английский, французский и русский языки. Ламберт основал астрономический журнал и много внимания уделял организации международного сотрудничества астрономов.

Ламберт внес вклад в развитие математики. Он работал над теорией параллельных и теорией конических сечений. В 1766 г. Ламберт доказал иррациональность числа π . Он же ввел тригонометрические функции синус и косинус, изучал гиперболические функции. Ламберту принадлежит заслуга разработки математических основ построения географических карт.

В области физики Ламберт работал над проблемами изменения влажности (предложил конструкцию гигрометра) и пирометрии. Он проводил опыты над тепловым излучением и показал, что «тепловые лучи» распространяются прямолинейно и их интенсивность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Его сочинения «Гигрометрия» (1774) и «Пирометрия» (1779) пользовались широкой известностью в XVIII в.

Для творчества Ламберта характерен поиск наиболее точных понятий для описания физических явлений, причем таких, кото-

рые допускали бы введение меры и, следовательно, могли быть использованы для построения математической модели. Эта особенность просматривается и в знаменитом сочинении Ламберта «Фотометрия, или об измерениях и сравнениях света, цветов и теней» (1760). Это сочинение в значительной степени обусловлено астрономическими интересами Ламберта. Он надеялся определить удаленность звезд по сравнению их яркости. Не зная о работе Бугера, Ламберт повторил некоторые его результаты и в то же время внес много нового в учение о «градации света». Ему принадлежат многие термины (фотометрия, альbedo и др.), понятие «ламбертов источник» прочно вошло в физику. В целом Ламберт дал более строгое (математизированное) изложение фотометрии.

Здесь воспроизводятся отрывки из сочинения П. Бугера, в которых излагается его подход к общей проблеме сравнения яркостей и освещенностей, а также вывод «закона Бугера», описывающего поглощение света в прозрачных средах. Приведенные ниже фрагменты из «Фотометрии» Ламберта дают представление о его подходе к построению физической теории, о соотношении между теорией и экспериментом.

П. Бугер

Оптический трактат о градации света

КНИГА I

Различные способы измерения света и некоторые приложения этих способов

Глава 3

Способ получить от одного светильника или от одной свечи пучки света, которые надлежит сравнивать в различных опытах

В изысканиях, коими мы занимаемся, часто бывает необходимо определить, какое количество света отражает тело, поверхность которого полирована, например зеркало, сравнительно со светом, который на него падает, или отметить, какова точная степень пропускания прозрачного тела определенной протяженности. Можно было бы попытаться выбрать для решения этих задач две свечи точно одинаковой толщины или две совершенно одинаковые лампы. Следовало бы заставить свет от одной из них отражаться или проходить сквозь прозрачные тела и сравнивать его затем со светом другой свечи; однако очень легко придать опыту форму, сулящую ему гораздо больший успех.

Положим для начала, что речь идет об отражении. Поместив вертикально в *B* [рис. 62] зеркало или отражающую поверх-

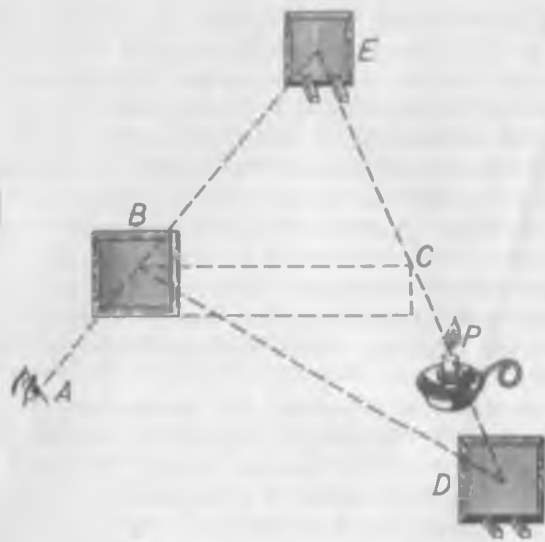


Рис. 62

ность, мысленно продолжают их плоскость до C и, взяв две дощечки совершенно одинакового цвета, или, иначе говоря, одинаковой белизны, помещают их перед зеркалом и позади его на равных расстояниях, располагают эти дощечки в точности параллельно друг другу или придают им одинаковый наклон относительно соединяющей их линии ED ; они будут освещены лампой или свечой P , помещенной на той же прямой линии ED . Затем ищут точку A , из которой дощечка D видна вследствие отражения в зеркале, и притом таким образом, чтобы другая дощечка E , помещенная немного выше своего настоящего места или немного сбоку от него, была видна одновременно. Следует, чтобы обе дощечки, видимые одна вследствие отражения, а другая непосредственно, казались образующими единую поверхность или соприкасающимися. Кроме того, необходимо сделать их кажущуюся белизну или оттенки их света совершенно одинаковыми, передвигая свечу P вдоль прямой ED в том или другом направлении. После этого остается лишь измерить расстояния EP и DP , и квадраты этих расстояний укажут отношение, в котором отражение от зеркала уменьшает силу света¹.

Очевидно, что если бы зеркало отражало без всякого изменения все лучи, которые оно получает, то для того, чтобы дощечки казались освещенными одинаково, свечу P надлежало бы поместить в точности посередине промежутка между дощечками, в точке C , поскольку все прочие условия для них одни и те же. Но так как отражение приводит всегда к большой потере силы света, то эту потерю можно возместить лишь значительно приблизив свечу P к дощечке D , видимой вследствие отражения. Эта дощечка будет, следовательно, освещена сильнее, нежели

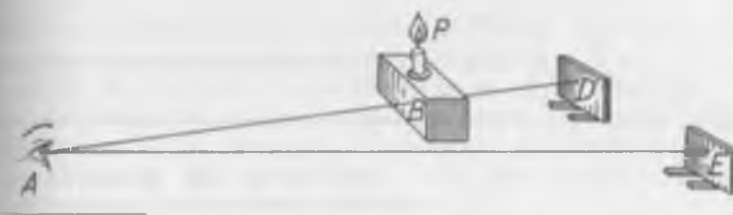


Рис. 63

другая, в том же отношении, в каком квадрат PE больше квадрата PD . Это же отношение должно таким образом выражать ослабление света при отражении от зеркала, поскольку большая близость свечи к дощечке D служит тому, чтобы восстановить равновесие тона, нарушенное при отражении.

Излишне было бы напоминать о том, как важно, чтобы глаз находился всегда в тени. Однако мы не преминем упомянуть о том, что и зеркало должно быть затенено и не должно освещаться никаким иным светом, кроме того, который приходит к нему от дощечки D . В противном случае свет, падающий на его поверхность, присоединяется отчасти к свету от дощечки. Повторяя опыт, не худо помянуть дощечки местами, дабы устранить опасение относительно неравенства их цветов, между которыми может существовать некоторое различие. Наконец, если желательно делать наблюдения с лучами света, образующими слишком малые углы с поверхностью зеркала, то опыт придется вести совершенно иначе, ибо в этом случае следовало бы располагать обе дощечки D и E слишком близко друг от друга и, не говоря уже о том, что между ними было бы трудно поместить свечу, измерение обоих расстояний повлекло бы за собой слишком большие погрешности. (...)

Определить, насколько ослабляется свет, проходя через прозрачное тело. Почти тем же способом можно определить ослабление, претерпеваемое светом, проходящим через прозрачное тело. На прозрачное тело B , имеющее форму прямоугольного параллелепипеда, поместили сверху свечу P , одновременно освещающую почти перпендикулярно обе дощечки D и E [рис. 63]. Эти дощечки рассматривают одновременно: первую — через прозрачное тело, а вторую — непосредственно. Эта последняя кажется освещенной ярче, нежели первая, если только ее не отнести на большее расстояние от свечи. Несколькими небольшими перемещениями добиваются того, чтобы оба цвета казались одинаково яркими или чтобы оба предмета казались имеющими одинаковую степень белизны, после чего определяют квадраты обоих расстояний до свечи. Если одно расстояние в два или три раза больше другого, то дощечка D будет освещена в четыре или в девять раз сильнее, чем другая. Это покажет, что прозрачное тело ослабляет в четыре или в девять раз свет, который через него проходит.

Изыскания о прозрачности и непрозрачности тел

Глава 1

О том, что свет, проходя однородные и одинаково толстые слои прозрачного тела, не уменьшается согласно членам арифметической прогрессии

Первое суждение, которое можно высказать об этом предмете, заключается в том, что если представить себе прозрачное тело, разделенным на слои одинаковой толщины, то все эти слои будут задерживать одинаковые количества лучей, и это приведет к тому, что свет, претерпевая при прохождении через каждый слой в точности одинаковое уменьшение, будет убывать в арифметической прогрессии, подобно тому, как уменьшаются ординаты треугольника.

Чтобы установить истинность или ложность этого суждения, которого придерживался парижский капуцин Франсуа Мари, уже упоминавшийся в первой книге, а также некоторые другие авторы, заблуждения которых менее простительны, я заставлял проходить свет силою в 32 свечи перпендикулярно через два куска стекла, и он становился при этом в два раза более слабым, ибо он казался мне равным свету, испускаемому 16 свечами. Если бы последующее прибавление двух кусков стекла такой же толщины вызывало бы такое же ослабление, то очевидно, что были бы задержаны все лучи; нечего уже и говорить о том, что восемь или девять кусков стекла образовали бы совершенно непроницаемую для света толщу. Однако, добавляя к двум первым кускам два другие, я отнюдь не получил абсолютно непрозрачного тела. Свет остался еще весьма ярким. Даже когда я заставлял его проходить через десять кусков, он оставался не слабее, нежели свет одной свечи.

Глава 2

О том, что при возрастании толщин на равные величины свет уменьшается подобно членам геометрической прогрессии

Однако очевидно, что читатели, поразмыслив, поймут, без сомнения, что для того, чтобы вторая толща задерживала в точности то же число лучей, что и первая, необходимо, чтобы в нее входило в точности то же число лучей, что и в первую. Однако, поскольку второй толщ достигают, быть может, лишь треть или четверть общего числа лучей, ибо остальные лучи уже задержаны, то очевидно, что этот слой должен задерживать также в три или четыре раза менее лучей, нежели первый слой. Таким образом, равные слои должны поглощать не равные

а лишь пропорциональные количества лучей. Другими словами, если некоторая толща поглощает половину света, то другая, следующая за первой и тождественная ей, поглощает не всю остальную половину, а лишь половину этой половины, оставляя, следовательно, лишь четверть. Поскольку все другие слои поглощают подобные же части, ясно, что свет будет уменьшаться всегда в геометрической прогрессии.

Ясно также, что сказанное нами должно быть справедливо вне зависимости от того, каким образом свет распространяется через прозрачные тела. Действительно, предположим, что лучи могут проходить лишь сквозь поры и что этих пор столь много, что твердые части составляют лишь одну сотую кажущегося внешнего объема тела. Если представить себе это тело, разделенным на почти бесконечное число слоев, толщина которых равна диаметру этих маленьких твердых частей, то первый слой поглотит лишь сотую часть лучей, и если их было бы 100 000, то второго слоя достигнут 99 000 лучей. Поскольку во втором слое будет снова в сто раз более пор, нежели твердых частей, ибо тело однородно, то ясно, что после прохождения лучей через второй слой их число снова претерпит уменьшение на одну сотую и окажется равным 98 010. Все другие слои окажут подобное же действие; всякий раз они будут уменьшать свет на одну сотую часть. Таким образом, всегда будет в точности соблюдаться геометрическая прогрессия. Иначе, если маленькие твердые тела, из которых состоят тела, в некоторых случаях сами служат для передачи света, то мы не придем ни к чему новому, ибо эти зерна материи, передающие свет, могут рассматриваться как поры, и мы вполне можем принимать во внимание лишь зерна другого рода, которые отклоняют или ослабляют свет; а так как в каждом слое находится всегда одинаковое количество этих последних, то очевидно, что они будут всегда ослаблять свет на одну и ту же пропорциональную часть. (...)

И. Ламберт

Фотометрия, или об измерениях и сравнениях света, цветов и теней

ЧАСТЬ I

Прямой свет. Его различные
проявления и интенсивность.
Яркость и освещенность

Глава I
Категории и принципы фотометрии

46. (...) Было установлено три известных положения.

1. Две (или более) свечи светят сильнее, чем одна.
2. Объект освещен ярче, если он находится ближе к источнику света.
3. Свет освещает плоскость слабее, если он падает на нее наклонно. (...)

53. Подобным образом оптики также установили третий закон², который относится к углу падения³. Легко видеть, что число лучей меньше, когда на ту же самую поверхность они падают под большим углом. Вследствие этого они в большей степени удалены друг от друга, и лист неизбежно должен быть освещен слабее. А то, что освещенность уменьшается в таком же отношении, что и синус угла падения, доказывается следующим образом. Между параллельными прямыми CA , DB на плоскость AB могут падать параллельные лучи под углом $CAF = DBF$ [рис. 64]. Предположим, что те же лучи перехватываются плоскостью AE , которая расположена перпендикулярно направлению лучей. Тогда AE перехватывает такое же число лучей, какое раньше [получала] большая по площади часть плоскости AB . Лучи, следовательно, должны быть расположены в пределах AE плотнее, нежели в AB . Так как плотность ведет себя как число лучей, деленное на соответствующую площадь, то одно и то же число лучей следует в первом случае делить на AB , а во втором — на AE , и плотность [лучей] на AB находится к плотности на AE в отношении, обратном отношению длин этих отрезков, или непосредственно в отношении AE к AB . Если теперь положить AB равным единице, то AE будет синусом угла падения. Поэтому нормальная освещенность относится к наклонной как единица к синусу угла падения. Оно, следовательно, уменьшается с синусом угла падения.

54. Таковы доказательства для этих трех законов, посредством которых в каждом конкретном случае определяются изменение освещенности и сила освещенности, в том виде, как их можно найти во всех книгах по оптике. Однако, строго говоря, ни один из них нельзя сам по себе проверить опытным путем.

поскольку, как мы видели выше, при этом требуется визуальное наблюдение, которое, за исключением случая равенства освещенностей, не следует считать надежным. Пусть тот же лист освещен светом свечи. Далее, пусть имеется второй лист, на который посылают лучи две свечи. Последний, как известно, освещен гораздо ярче. Однако

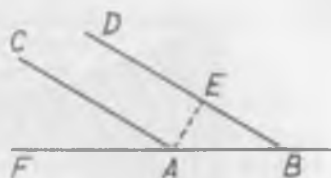


Рис. 64

является ли эта освещенность вдвое большей, можно судить на основе проведенных выше рассуждений, хотя нельзя с определенностью решить непосредственным наблюдением. Подобным же образом лист, удаленный от пламени свечи, будет выглядеть более темным, нежели другой, находящийся ближе; однако визуально нельзя определить соотношение между освещенностями в двух случаях. Так же наклонно падающий свет будет восприниматься несколько более темным, но визуально ослабление света не может быть измерено. На чем же основывается тогда надежность этого утверждения, если оно должно быть получено *a posteriori*?

55. На самом деле существует метод, позволяющий сравнить любой из этих законов с другими посредством опыта и предоставить доказательство того, что если один из них считать истинным, то и другие также должны быть истинными. Таким образом, эти законы как бы соединены общей связью, вследствие чего они взаимно подтверждаются или опровергаются. Тем не менее, хотя все они и следуют из в высшей степени естественного воззрения на свет, все же, поскольку ошибочные заключения в физике вполне возможны и часто встречаются, те, кто требует высшей строгости в научных доказательствах, предостерегают от [порочного] логического круга, который, по их мнению, возникает в данном случае.

56. Однако, согласно моему взгляду на область физики, истинная строгость в таких физических доказательствах или вообще не встречается, или встречается крайне редко. Поэтому достоверность достигает своей наивысшей степени в том случае, когда закон так согласуется с отдельными явлениями, что явно не противоречит ни одному из них, и соответствует им тем лучше, чем шире берется сфера опыта. То, что три указанные закона обладают этим свойством, в данной работе по фотометрии оказалось подтверждено таким способом, который не оставляет никаких сомнений.

57. Однако, чтобы здесь не было заметно отсутствия доказательства этого утверждения, мы хотели бы тотчас увидеть, как эти законы взаимно подтверждаются на опыте.

58. *Опыт 1.* Пусть на плоскости ABC в точке A находятся две свечи равной яркости, а на CD расположена белая ровная поверхность или лист бумаги так, чтобы лучи из A падали на часть поверхности $BGFD$ перпендикулярно.

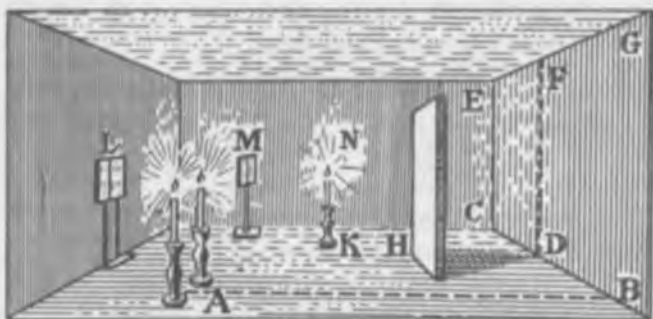


Рис. 65

В H стоит другая, менее широкая плоскость, так что тень, отбрасываемая обеими свечами, находящимися в A , покрывает дальнюю часть $DFEC$ [первой] плоскости. С другой стороны, в K находится еще одна свеча, такая же яркая, как и две первые, так что отбрасываемая плоскостью H тень покрывает лишь ближнюю сторону $DFGB$ [первой] плоскости. В этом случае ближняя часть плоскости $BGFD$ освещена двумя свечами, дальняя, напротив, лишь одной. При строгом выполнении этих условий свечу K приближают или удаляют от плоскости BE до тех пор, пока обе части DG и DE не приобретут равную яркость. Затем определяется расстояние от свечей до плоскости BC . Тогда AB относится к KC как $\sqrt{2}$ к 1, или, другими словами, было найдено, что квадрат расстояния AB относится к квадрату расстояния KC как 2 к 1, или, в более общей форме, как число свечей в A к их числу в K . Затем можно повторить опыт так же, но с большим количеством свечей. Он будет тем более точен, чем ближе друг к другу по яркости и величине будут отдельные свечи.

59. Опыт 2. Описанный выше опыт можно также осуществить с одной свечой, но с использованием плоского зеркала. Свеча находится в K и плоскость H приближают к ней до тех пор, пока тень от плоскости не покроет всю плоскость BE . Затем в L позади свечи помещают два (или более) зеркала так, чтобы они отражали свет на часть плоскости $BGFD$. Зеркала должны быть при этом равноудалены от свечи и стоять очень близко друг к другу. Теперь берут другое зеркало и помещают его ближе к свече, а именно так, чтобы ее свет падал на часть плоскости $DFEC$ и освещал ее так же ярко, как освещена двумя зеркалами часть $BGFD$. Из катоптрики, однако, известно, что освещенность ведет себя так, как если бы свеча стояла там, где в данном опыте видно ее отражение, которое находится за зеркалом на том же расстоянии от него, что и свеча. Следует взять расстояние от зеркала до плоскости BE и добавить к нему расстояние от зеркала до свечи. Тогда оказывается, что квадрат суммы расстояний $LG + LN$ относится к квадрату суммы рас-

стояний $ME + MN$ как число зеркал в L к числу зеркал в M , если в обоих местах находится несколько зеркал.

60. (...) Из опытов вытекает в первую очередь то, что если освещенность должна остаться той же самой, то квадраты расстояний до свечей должны относиться как число этих свечей. Следовательно, обусловленная отдельной свечой освещенность тем меньше, чем больше это число и, следовательно, чем больше квадрат расстояния. Таким образом, освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

61. Для этого утверждения также должно быть приведено аналитическое доказательство. Пусть n — число свечей в A , I — определяемая ими освещенность, которую мы положим постоянной. В соответствии с допущениями обусловленная отдельной свечой освещенность равна $\frac{I}{n}$. Мы примем ее равной c , так

что $c = \frac{I}{n}$. Согласно опыту, однако, n равно квадрату расстояния; обозначим его d , тогда $n = d^2$. Из-за $c = \frac{I}{n}$ имеем $c =$

$= \frac{I}{d^2}$ или из-за $I = \text{const}$ также $c \sim 1 : d^2$. Доказательство проводится так же, если привлекается второй опыт и на место свечей поставлены их изображения, сформированные зеркалами.

62. Опыт 3. На прямой AB стоит белая плоскость. В C находится одна или несколько свечей, свечи находятся и в D , однако в большем количестве, нежели в C . Далее, пусть на EF установлена плоская ширма, которая закрывает точку B от свечей C , а также точку A от свечей в D . Тогда посредством опыта определяется такое расположение свечей, при котором они равноудалены от освещаемых точек A и B и с равной силой освещают плоскость. Если затем измерить углы CAB и DBG , то окажется, что их синусы так относятся друг к другу, как число свечей в D к числу свечей в C . Посредством этого опыта доказываемся, что первый и третий законы зависят друг от друга и взаимно подтверждаются.

63. Опыт 4. В C снова находится одна свеча; другая, равной яркости и величины, так установлена на прямой BD , например в H , что плоскости в A и B освещены с равной яркостью. Тогда синусы углов падения находятся в отношении, обратном отношению квадратов расстояния от свечей до точек A и B . (...) Легко видеть, что оба этих опыта, могут быть также осуществлены с помощью зеркал.

64. Имеется еще несколько существенно иных опытов, нежели описанные, с помощью которых можно взаимно подтвердить эти законы. Следует, однако, отложить описание этих опытов до тех пор, пока принципы, на которых они основаны, не проявятся в следствиях [из законов]. Между тем мы нуждаемся в описанных опытах, чтобы определить, как различные освещенности можно сравнивать друг с другом. Таким образом, мы предвари-

тельно получили вспомогательное средство для того, чтобы в дальнейшем сравнивать различные степени освещенности.

65. Из сказанного следует, что имеются различные способы не только как изменить произвольную освещенность, чтобы она была равна данной освещенности, но и узнать, в каком отношении и насколько она увеличилась или уменьшилась. Тогда, если можно изменять расстояние от источника света до листа либо до освещенной плоскости или регулировать их положение в этом случае также можно добиться освещенности, равной данной. И переменная освещенность всегда изменяется прямо пропорционально синусу угла падения и обратно пропорционально квадрату расстояния.

66. Пусть, например, освещенность листа, обусловленную Луной, необходимо сравнить с освещенностью этого же листа пламенем свечи. Легко видеть, что этого можно достичь различными способами. Всегда необходимо подставить лист лучам Луны, так же как и лучам свечи, в то время как преграда устанавливается так, что освещенная Луной часть [поверхности] не будет освещаться лучами свечи, и наоборот. Придерживаясь этого правила, расстояние до свечи можно увеличивать или уменьшать до тех пор, пока обе стороны листа не будут казаться одинаково освещенными. Подобным же образом, используя несколько свечей, можно сравнить созданную ими освещенность листа с освещенностью, обусловленной Луной или другим источником света. Необходимо отметить, что посредством таких опытов не находится соотношение между яркостями самих источников света, и яркость освещенного листа нельзя сравнить с яркостью светящегося тела. Первое может быть легко достигнуто, если принять во внимание как угол падения, так и кажущиеся размеры. <...>

Комментарий

Перевод трактата Бугера с французского выполнен Н. А. Толстым и П. П. Феофиновым. Отрывки воспроизводятся по изданию: Бугер П. Оптический трактат о градации света. Л., 1950. Название трактата на языке оригинала: *Traité d'Optique sur la gradation de la lumière*, Paris, 1760.

Перевод с немецкого отрывков из сочинения И. Ламберта выполнен Б. В. Булюбашем и С. Р. Филоновичем по изданию: *Lambert J.-H. Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. Bd. 1. Leipzig, 1892.

Впервые сочинение Ламберта было опубликовано на латинском языке в Аугсбурге в 1760 г.

Выше Бугер вслед за И. Кеплером принимает, что освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до освещенной поверхности. Следует отметить, что здесь Бугер, не отмечая это особо, принимает, что сила

света 1 свечи одинакова как в направлении к экрану E , так и к экрану D , и указывает, что эти экраны должны быть одинаково наклонены по отношению к линии ED , т. е. угол падения света на них одинаков.

В качестве первого закона Ламберт формулирует утверждение об обратной пропорциональности освещенности квадрату расстояния до светящейся точки. Второй закон утверждает, что при прочих равных условиях освещенность пропорциональна числу источников (у Ламберта — свечей).

³ Здесь и далее следует иметь в виду, что углом падения α Ламберт называет угол между падающим лучом и касательной к поверхности, т. е. в современной терминологии — угол скольжения. Согласно общепринятой в наши дни терминологии, угол падения i — это угол между лучом и нормалью к поверхности, т. е. $\alpha = \pi/2 - i$.

Литература

(Собрание сочинений П. Бугера не издавалось)

- [1] Lamontagne R. La vie et l'oeuvre de Pierre Bouguer. Montreal et Paris, 1964.
- [2] Lambert J. H. Gesammelte philosophische Werke. Bd. 1. Hildesheim, 1967.
- [3] Lambert J. H. Opera mathematica. Bd. 1—2. Zurich, 1946—1948.
- [4] Steck M. Bibliographia Lambertiana. Hildesheim, 1970.



Дж. Блэк

1728—1799

Об особенностях тепловых явлений

Важнейшим этапом в развитии учения о тепловых явлениях было установление различия между понятиями «количество тепла (теплоты)» и «температура». Путаница в использовании этих понятий мешала как правильному описанию тепловых процессов, так и уяснению достоинств и недостатков выдвигавшихся теорий теплоты. Первым, кто отчетливо сформулировал мысль о необходимости различать две характеристики тепловых явлений: экстенсивную (теплоту) и интенсивную (температуру), был английский ученый Дж. Блэк.

Джозеф Блэк родился 16 апреля 1728 г. во французском городе Бордо, где его отец, шотландец по происхождению, вел винную торговлю. Начальное образование Блэк получил дома, а затем был направлен в среднюю школу в Белфаст. По настоянию отца Блэк поступил на медицинский факультет университета Глазго, однако там под влиянием лекций В. Каллена увлекся химией. Из Глазго Блэк перешел в Эдинбургский университет, славившийся преподаванием медицины и химии; в 1754 г. он получил степень доктора медицины.

Научные исследования Блэк начал вести еще в Глазго, когда выполнял обязанности ассистента Каллена. В 1756 г. он опубликовал единственную большую работу, посвященную свойствам углекислого газа. Тогда же параллельно с медицинской практикой Блэк начал читать лекции в Глазго, заняв место переехавшего в Эдинбург Каллена. Уже в Глазго он зарекомендовал себя как блестящий лектор. В 1760—1766 гг. им были выполнены важнейшие исследования по теплоте.

В 1766 г. Блэк переходит в Эдинбургский университет, где читает лекции по химии практически до конца жизни. Правда, исследовательская деятельность ученого здесь постепенно ослабевает, отчасти вследствие хронических болезней. Тем не менее изложение на лекциях важнейших открытий современной химии (в том числе и собственных) и обаяние личности Блэка превратили Эдинбургский университет в центр притяжения молодежи.

интересовавшейся химией: сюда приезжали студенты не только из Англии и Ирландии, но и из многих стран континентальной Европы. Блэк относился к плеяде блестящих деятелей науки и культуры середины XVIII в.; его близкими друзьями были философ Д. Юм, экономист А. Смит, геолог Дж. Хаттон. Ученый умер 6 декабря 1799 г.

Начало исследований Блэка по теплоте относится к 1760 г. Его первые опыты были поставлены с целью проверки линейности шкал термометров. Эти эксперименты привели ученого к мысли о различии двух характеристик тепловых явлений: теплоты и температуры. Интересно, что сначала Блэк пришел к выводу о существовании скрытых теплот и лишь затем сформулировал идею об удельной теплоемкости как характеристике вещества. Отметим, что охарактеризовать взгляды Блэка на природу теплоты довольно сложно. Хотя ученый знал о мнении Бойля и Ньютона, что теплота — род движения, он все же склонялся к теории теплорода, поскольку не мог представить, как могут двигаться частицы, образующие твердые тела. В лекциях же Блэк говорил, что «пути к достижению правильных представлений о теплоте лежат через изучение фактов», подчеркивая тем самым необходимость более глубокого экспериментального изучения предмета для формирования адекватных представлений о нем.

Работы Блэка по теплоте имели и практическое значение: его советами пользовался при усовершенствовании паровой машины Дж. Уатт, работавший механиком в университете Глазго.

Результаты своих исследований по теплоте Блэк не публиковал, а излагал их в лекционном курсе по химии, поэтому они все же становились известными в широких научных кругах. Тем не менее в ряде случаев опыты и выводы Блэка были независимо повторены другими учеными. Лишь в 1803 г., уже после смерти Блэка, один из наиболее талантливых его учеников Дж. Робайсон издал курс лекций по химии в двух томах, куда были включены и лекции по теории теплоты.

О теплоте

(...) Второе достижение в наших знаниях о теплоте, полученное при использовании термометров, состоит в более ясном, чем в прошлом, представлении относительно распределения теплоты между различными телами.

Я отмечал ранее, что даже без помощи термометров мы можем уловить стремление теплоты передаваться от какого-либо более горячего тела к более холодным окружающим телам до тех пор, пока она не будет распределена между ними так, что ни одно из них не будет более склонно забирать теплоту от остальных. Теплота таким образом приводится в состояние равновесия. Это равновесие в определенном отношении любопытно.

Мы обнаруживаем, что, когда заканчиваются все взаимные действия, термометр, приложенный к любому из тел, достигает одной и той же степени расширения; поэтому температура тел одинакова и равновесие является всеобщим. Ранее полученные знания об индивидуальном отношении каждого из тел к теплоте не могли убедить нас в этом, и мы целиком обязаны этим открытием термометру. Мы должны поэтому принять как один из наиболее общих законов теплоты, что «все тела, свободно сообщаящиеся друг с другом и не подверженные неравным внешним воздействиям, приобретают одинаковую температуру, что покаazuje термометр». Все они приобретают температуру окружающей среды.

Используя эти инструменты, мы установили, что если взять 1000 (или более) различных веществ, таких, как металлы, камни, соли, различные сорта дерева, пробка, перья, шерсть, вода и множество других жидкостей, то хотя вначале все они будут нагреты по-разному, если их поместить вместе в одной комнате, где нет огня и куда не проникают солнечные лучи, теплота будет передаваться от более нагретых тел к более холодным, возможно, на протяжении нескольких часов или в течение дня, но в конце этого времени, если мы приложим термометр к каждому из тел, он будет указывать в точности один и тот же градус. Поэтому теплота в данном случае распределяется до тех пор, пока ни одно из тел не будет иметь большую потребность или склонность к теплоте, чем все другие. Когда мы прикладываем термометр последовательно ко всем телам, то вслед за тем, как первое тело, к которому он прикладывался, привело прибор к своей собственной температуре, ни одно из других не расположено увеличивать или уменьшать количество теплоты, которое первое тело оставило в термометре. Это и есть то, что обычно называют равным нагревом или равенством [в распределении] теплоты между различными телами; я называю это *равновесием теплоты*. Природа этого равновесия не была как следует понята до тех пор, пока я не указал метод его исследования. Д-р Бургаве считал, что когда оно достигается, то имеется равное количество теплоты во всяком равном объеме пространства, каким-либо образом заполненного различными телами; и профессор Мушенброк выразил свое мнение по этому поводу: «*Est enim ignis aequaliter per omnia, non admodum magna, distributus, ita ut in pede cubico auri et aeris et plumarum, par ignis sit quantitas*». Основание, которое они приписывают этому мнению, состоит в том, что, к какому бы из тел ни был приложен термометр, он указывает тот же градус.

Однако это [мнение] обусловлено очень поверхностным взглядом на предмет. Оно смешивает количество теплоты в различных телах с его общей силой или интенсивностью, хотя ясно, что это две разные вещи, которые всегда следует различать, когда мы размышляем о распределении теплоты. <...>

Ранее считалось общепризнанным, что количества теплоты

требуемые для увеличения нагрева различных тел на одинаковое число градусов, находятся в прямой пропорциональности к количеству вещества в каждом [теле]; и поэтому, когда тела имеют одинаковые размеры, количества теплоты пропорциональны их плотностям. Однако вскоре после того, как я начал думать об этом предмете (1760), я почувствовал, что это мнение было ошибкой и что количества теплоты, которые разные виды вещества должны получать для приведения их в равновесие друг с другом или для увеличения их температуры на одинаковое число градусов, не пропорциональны количеству вещества в каждом из них, но находятся в отношении, сильно отличающемся от этого, которому пока нельзя сопоставить никакой общий принцип или причину. По этому поводу стоит обратиться к *Comment. de Rebus in Medicina Gestis*, vol. 21, 26, где содержится описание ценных экспериментов Вильке, взятое из *Swedish Transactions*. Также интересны эксперименты профессора Гадоллина, описанные в *Nova Acta Reg. Societ. Upsalensis*, tom 5. На это мнение меня впервые натолкнул опыт, описанный д-ром Бургава (*Elementa Chemiae*, exp. 20, cor. 11). После рассказа об эксперименте, который выполнил Фаренгейт по его просьбе, по смешиванию горячей и холодной воды он сообщает также, что Фаренгейт смешивал ртуть и воду, нагретые не одинаково. Из замечания доктора совершенно ясно, что ртуть, хотя она имеет более чем в 13 раз большую плотность, чем вода, производит меньший эффект в нагревании или охлаждении воды, с которой она смешивается, чем произвела бы равная мера воды. Он ясно указывает, что ртуть, соединялась ли она горячей с холодной водой или холодной с горячей водой, никогда не производила больший эффект нагревания или охлаждения равного количества воды, чем произвела бы на ртуть столь же горячая или холодная вода, составляющая лишь две трети объема ртути. Он добавляет, что было необходимо взять три [объемные] меры ртути к двум воды, чтобы получить ту же среднюю температуру, которая получается при смешивании равных мер горячей и холодной воды.

Чтобы сделать это более ясным, предположим, что вода находится на 100-м градусе тепла и что равная мера теплой ртути, находящаяся на 150-м градусе, внезапно смешивается с ней. Мы знаем, что средняя температура между 100 и 150 равна 125 и что эта средняя температура получилась бы при смешивании холодной воды при 100 [градусах] с равной мерой теплой воды при 150 [градусах]; теплота нагретой воды была бы понижена на 25 градусов, в то время как теплота холодной воды на столько же бы возросла. Но когда вместо теплой воды используется теплая ртуть, температура смеси оказывается равной лишь 120 градусам вместо 125. Ртуть поэтому становится менее теплой на 30 градусов, хотя вода становится теплее лишь на 20 градусов; и [это происходит] несмотря на то, что количество теплоты, которое получает вода, есть в точности то же коли-

чество, которое потеряла ртуть. Это показывает, что одинаковое количество материи тепла создает больший эффект при нагревании ртути, чем при нагревании равной меры воды, и, следовательно, что меньшего ее количества достаточно для ощутимого возрастания тепла ртути на то же число градусов. То же самое происходит, как мы ни меняем опыт; поскольку, если вода является более теплой массой, а ртуть — менее теплой при той же разности, что [указывалась] выше, установившаяся температура равна 130 [градусам]. Вода в этом случае становится менее теплой на 20 градусов, тогда как потерянная ею теплота, переданная ртути, делает последнюю теплее на 30 градусов. И наконец, если мы возьмем три меры ртути и две воды, то неважно, какая [из жидкостей] горячее. Установившаяся температура всегда равна средней из двух температур, или 125 градусам, при ранее отмечавшихся начальных температурах. Отсюда ясно, что того же количества материи тепла, которое делает две меры воды теплее на 25 градусов, достаточно для того, чтобы сделать три меры ртути теплее на то же число градусов. Ртуть, следовательно, имеет меньшую *емкость* [по отношению] к материи тепла, чем вода (если мне позволительно использовать это выражение); она требует меньшего ее количества, чтобы поднять свою температуру на то же число градусов.

Вывод, который сделал д-р Бургаве из этого эксперимента, весьма удивителен. Замечая, что тепло распределяется между различными телами пропорционально количеству вещества в каждом из них, он заключает, что оно распределяется пропорционально пространству, которое занимает каждое тело; этот вывод противоречит этому же опыту. Тем не менее Мушенброк следует мнению Бургаве.

Как только я понял этот эксперимент так, как я его теперь объяснил, я обнаружил замечательное согласие между ним и некоторыми опытами, выполненными д-ром Марином («Очерк о нагревании и охлаждении тел»), которые поначалу казались весьма удивительными и необъяснимыми, но, будучи соотнесенными с вышеописанным опытом, могут быть объяснены той же первопричиной. Д-р Мартин помещал перед огнем на равных расстояниях от него некоторое количество воды и равный объем или меру ртути, причем обе [жидкости] находились в равных и подобных стеклянных сосудах и в каждую был погружен чувствительный термометр. Затем он тщательно наблюдал в темп или быстротой, с которой эти жидкости нагревались огнем и с которой повышались показания термометров. При повторении экспериментов он обнаружил, что ртуть нагревалась огнем гораздо быстрее, чем вода, почти вдвое быстрее. После каждого опыта, нагрев обе жидкости до одинаковой степени, он помещал их в поток холодного воздуха и при этом обнаружил, что ртуть всегда остывала гораздо быстрее, чем вода. До того как были проведены эти эксперименты, предполагалось, что ртуть должна требовать более длительного нагрева или

охлаждения, чем равный объем воды, в пропорции 13 или 14 к одному.

Однако с той точки зрения, которую я сформулировал относительно опытов Фаренгейта и Бургаве с ртутью и водой, вышеупомянутые эксперименты д-ра Мартина легко объясняются. Нам нужно лишь предположить, что материя тепла, сообщаемая огнем, передавалась в равной мере ртути и воде, но, поскольку для нагревания ртути ее требовалось меньше, чем для нагревания воды, из двух [жидкостей] ртуть неизбежно нагревалась быстрее. И когда обе [жидкости], будучи нагреты одинаково, были подвержены действию холодного воздуха для охлаждения, то он поначалу отбирал у них теплоту одинаково быстро, однако ртуть, теряя то же количество материи тепла, что и вода, неизбежно остывала в большей степени; и поэтому она становилась холоднее значительно быстрее, чем вода. Так опыты д-ра Мартина, хорошо согласуясь с экспериментами Фаренгейта, ясно показывают, что ртуть, несмотря на большую плотность и вес, требует меньше тепла для нагревания, чем необходимо для нагревания на то же число градусов равной меры одинаково холодной воды. Поэтому можно сказать, что ртуть имеет меньшую емкость по отношению к материи тепла. И таким образом выясняется, что, когда мы хотим найти емкость различных тел по отношению к теплоте, мы можем определить ее только из опытов. Несколько соответствующих экспериментов были проведены как мной самим, так и другими. (...)

Скрытая теплота

(...) Считалось общепринятым, что жидкое состояние создается путем добавления небольшого количества теплоты к уже содержащемуся в теле, когда оно нагрето до своей точки таяния; а возвращение такого тела в твердое состояние считалось зависящим от очень малого уменьшения количества его теплоты после охлаждения до той же степени; что твердое тело, когда оно превращается в жидкость, получает не большую прибавку к имеющейся в нем теплоте, чем та, что измеряется повышением температуры, показываемом термометром после плавления; и что, когда растаявшее тело снова делается застывшим путем уменьшения его теплоты, оно претерпевает не большую потерю теплоты, чем обнаруживается при простом приложении к нему того же инструмента.

Насколько мне известно, это было всеобщим суждением о предмете, когда в 1757 г. я начал читать лекции в университете г. Глазго. Однако вскоре я обнаружил причину для отказа от него, как не согласующегося со множеством замечательных фактов, когда они рассматриваются [достаточно] внимательно; и я постарался показать, что эти факты представляют собой убедительные свидетельства того, что жидкое состояние создается теплотой совершенно по-другому.

Теперь я опишу, каким образом, как мне представляется, жидкое состояние создается теплотой, а затем мы сравним прежний и мой взгляды на этот предмет с явлениями.

Суждение, которое сформировалось у меня на основе внимательного наблюдения фактов и явлений, состоит в следующем. Когда, например, лед или любая другая твердая субстанция превращается в жидкость под действием тепла, то она, по моему мнению, получает гораздо большее количество теплоты, чем то, что ощутило сразу после этого [превращения] с помощью термометра. По этому случаю в него входит большее количество теплоты без того, однако, чтобы сделать его заметно теплее, что проверяют с помощью этого прибора. Тем не менее эта теплота должна быть введена в него, чтобы придать ему жидкое состояние; и я утверждаю, что это большое добавление теплоты является главной и наиболее прямой причиной возникновения жидкого состояния.

И, с другой стороны, когда мы снова лишаем такое тело его жидкого состояния путем уменьшения его теплоты, из него выходит большое количество теплоты; и пока оно принимает твердое состояние, потеря этой теплоты не ощущается обычным способом с применением термометра. Видимая нагретость тела, измеряемая этим прибором, не уменьшается или не пропорциональна потере теплоты, которое тело в этом случае отдает наружу; и из ряда фактов следует, что твердое состояние не может быть порождено без рассеяния этого большого количества теплоты. И это подтверждает мнение, что количество теплоты, поглощенное и в действительности скрытое в составе жидкостей, является наиболее необходимой и непосредственной причиной их жидкого состояния.

Дабы понять основательность этого мнения и несоответствие прежнего многим очевидным фактам, мы должны рассмотреть, во-первых, эффекты, наблюдаемые при таянии льда и замерзании воды.

Если мы проследим за тем, как тают лед или снег, когда они подвергаются действию воздуха теплой комнаты или когда оттепель сменяет мороз, то мы сможем легко понять, что, какими бы холодными они ни были сначала, вскоре они нагреваются до их точки плавления и начинают на поверхности превращаться в воду. И если бы общее мнение было хорошо обосновано, если бы полное превращение льда и снега в воду требовало лишь добавления очень малого количества теплоты, то масса, даже значительная по размеру, вся должна была растаять всего за несколько минут или секунд, в течение которых теплота продолжает непрерывно сообщаться [снегу и льду] из окружающего воздуха. Если бы все обстояло именно так, последствия были бы во многих отношениях ужасными, поскольку даже при нынешнем ходе вещей таяние большого количества снега и льда вызывает бурные потоки и сильные наводнения в холодных странах или в реках, которые текут оттуда. Но если бы лед

« снег таяли так внезапно, как это с необходимостью должно было иметь место, если бы прежнее суждение о действии теплоты при их таянии было хорошо обосновано, то потоки и наводнения были бы несравненно более неопределенными и страшными. Они должны были бы разрывать и сметать все столь внезапно, что человечество испытывало бы огромные трудности при спасении от их разрушающего действия. В действительности это внезапное превращение в жидкость не происходит; таяние массы льда или снега происходит очень медленно и требует большого времени, в особенности если она имеет большие размеры, такие, как груды льда и сугробы снега, образующиеся за зиму в некоторых местах. После начала их таяния требуется еще много недель теплой погоды, чтобы они полностью превратились в воду. Эта замечательная медлительность, с которой тает лед, позволяет нам легко сохранять его в течение лета в устройствах, называемых ледниками. Лед начинает в них таять, как только он туда помещается; но поскольку они имеют лишь очень небольшую поверхность, доступную воздуху, и очень толстое покрытие из соломы и, насколько возможно, доступ в них внешнего воздуха предотвращен, теплота проникает в ледник очень медленно, и это обстоятельство, в дополнение к той медлительности, с которой сам лед расположен таять, растягивает процесс его полного превращения в жидкость настолько, что в некоторых ледниках он сохраняется до конца лета. Аналогичным образом снег остается на многих горах на протяжении лета, находясь в состоянии таяния, но таяния столь медленного, что всего этого времени года недостаточно для его полного превращения в жидкость.

Эта замечательная медлительность, с которой тают лед и снег, представляется мне совершенно не согласующейся с общепринятым представлением относительно преобразования теплоты при плавлении тел.

И именно это явление составляет часть основания того суждения, которое я предложил выше, поскольку если мы исследуем, что происходит, то поймем, что в тающий лед проникает огромное количество теплоты для образования воды, в которую он превращается, и что продолжительность времени, необходимого для получения столь большого количества теплоты от окружающих тел, есть причина медлительности, с которой плавится лед. Если у кого-то возникают сомнения в проникновении теплоты в тающий лед и поглощении ее последним, то ему достаточно лишь коснуться льда; он мгновенно почувствует, что лед быстро вытягивает теплоту из его теплой руки. Он может также исследовать окружающие лед тела или тела, находящиеся с ним в контакте, и тогда обнаружит, что все они лишаются значительной части своей теплоты. Если же он подвесит с помощью нити лед в воздухе теплой комнаты, то сможет ощутить рукой или зафиксировать термометром поток холодного воздуха, непрерывно опускающийся ото льда, поскольку находящийся в кон-

такте [со льдом] воздух лишается части своей теплоты и поэтому сгущается и становится тяжелее, чем теплый воздух остальной части комнаты. Вследствие этого он опускается и его место вокруг льда занимает более теплый воздух; но и он, в свою очередь, вскоре лишается некоторого количества теплоты и так же готов опускаться. Таким образом, существует постоянный поток теплого воздуха извне [по направлению] к сторонам льда и опускание воздуха в холодном состоянии от нижней части массы [льда], и во время этого процесса лед с необходимостью должен получать большое количество теплоты.

Поэтому очевидно, что тающий лед получает теплоту очень быстро, но единственным воздействием этой теплоты является превращение льда в воду, которая по ощущению даже в малейшей степени не теплее, чем был до этого лед. Термометр, приложенный к каплям или маленьким потокам воды сразу же, как только они отделились от тающего льда, укажет тот же градус, что и в случае, когда его прикладывают к самому льду, или, если какая-то разница и есть, то она слишком мала, чтобы быть замеченной. Поэтому большое количество теплоты или материи тепла, которое проникает внутрь тающего льда, не создает других эффектов, кроме сообщения ему текучести без увеличения ощутимой теплоты; кажется, что она поглощается или скрывается внутри льда так, чтобы ее нельзя было обнаружить путем приложения термометра. (...)

О паре и испарении

(...) Более правильное объяснение придет в голову любому, кто возьмет на себя труд рассмотреть этот предмет спокойно и внимательно. При обычном способе нагрева воды источник нагрева прикладывается к нижним частям жидкости. Если давление на поверхность не возрастает, то вода вскоре приобретает наибольшую теплоту, которую она может выносить без принятия формы пара. Поэтому последовательные прибавки теплоты в тот же момент, когда они поступают в воду, должны превращать в пар ту ее часть, на которую они воздействуют. Поскольку все эти добавки теплоты поступают через нижнюю часть жидкости, там происходит непрерывное образование упругого пара, который, учитывая, что он почти ничего не весит, должен подниматься через окружающую воду и представляться с силой выбрасываемым на поверхность и оттуда распространяться в воздухе. Таким образом, пока продолжается кипение, вода постепенно расходуется, но ее температура никогда не возрастает, по крайней мере в той части, которая остается после длительного, непрерывного и сильного кипения. Вообще можно предположить, что части, находящиеся в контакте с дном сосуда, получают немножко больше теплоты, но эта последняя мгновенно передается окружающей воде, через которую поднимается упругий пар.

Все это имеет видимость простого, ясного и полного объясне-

ния образования пара и кипения жидкостей; и это было единственным объяснением явления до того, как я начал читать эти лекции. Однако я убежден, что это ни в коей мере не является полным описанием происходящего. В соответствии с ним и с представлением, которое сложилось об образовании пара, считалось само собой разумеющимся, что после того, как тело нагрето до точки испарения, для превращения его в пар не требуется ничего более, кроме маленькой добавки теплоты. С другой стороны, предполагалось также, что когда пары воды охлаждены настолько, что готовы к конденсации, то эта конденсация, или возвращение в состояние воды, будет происходить сразу или вследствие потери им очень малого количества теплоты.

Но я могу легко показать тем же способом, что и в случае текучести, что требуется очень большое количество теплоты, чтобы создать пар, хотя тело уже и нагрето до той температуры, которую оно не может пройти ни на малейшую часть градуса без того, чтобы испытать такое превращение. Неизбежным следствием должен быть взрыв всей воды с силой, равной силе [взрыва] пороха. Но я могу показать, что это огромное количество теплоты проникает в пар постепенно, во время образования последнего, не делая его ощутимо теплее для термометра. Если исследовать пар с помощью термометра, то обнаруживается, что он имеет в точности ту же температуру, что и кипящая вода, из которой он происходит. Вода должна быть нагретой до определенной температуры, поскольку только при этой температуре она склонна к поглощению теплоты; и она не взрывается мгновенно, поскольку в это мгновение не может быть достаточного поступления теплоты во всю массу. С другой стороны, я могу показать, что когда водяной пар конденсируется в жидкость, то то же самое большое количество теплоты выходит из него в более холодное вещество, благодаря которому он конденсируется; и вещество пара, или воды, в которую он превращается, не становится вследствие потери этого значительного количества теплоты ощутимо холоднее. Оно не становится холоднее пропорционально количеству теплоты, которое может быть получено из него во время конденсации.

Все это становится очевидным, когда мы внимательно рассматриваем постепенное образование пара вследствие непрерывного использования источника теплоты и аналогичную постепенную конденсацию этого пара, когда мы непрерывно приводим его в контакт с более холодным телом. (...)

Поэтому я всерьез занялся постановкой экспериментов, соответствующих разделяемому мной подозрению, касающемуся кипения воды. Мое предположение, если придать ему [законченную] форму, состояло в следующем. Я предположил, что во время кипения теплота поглощается водой и проникает в состав пара, образующегося из нее, тем же способом, как она поглощается льдом при таянии и проникает в состав образующейся воды. И видимый эффект теплоты в этом последнем случае состоит

не в нагревании окружающих тел, но в придании льду текучести; так и в случае кипения поглощаемая теплота не нагревает окружающие тела, но превращает воду в пар. В обоих случаях, рассматриваемых с точки зрения причины теплоты, мы не ощущаем ее наличия: она спрятана или скрыта, и я дал ей название СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ. (...)

Комментарий

Перевод с английского отрывков из лекции Дж. Блэка выполнен С. Р. Филоновичем по изданию: Black J. *Lectures on the Elements of Chemistry*. Ed. by J. Robison. Edinburg, 1803, vol. 1.

«Ибо огонь распределен одинаково по всем неравновеликим телам, так что в кубическом футе и золота, и меди, и свинца огонь оказывается в равном количестве».

Литература

- [1] Собрание сочинений Блэка не издавалось, однако его основные достижения отражены в посмертном издании Black J. *Lectures on the Elements of Chemistry*. Ed. by J. Robison. Vols. 1—2. Edinburg, 1803.
 - [2] Samsey W. *Life and letters of Joseph Black*, M. D. London, 1918.
 - [3] McKie D., Heathcote N. H. de V. *The discovery of specific and latent heats*. London, 1935.
-



Ж. Л. Лагранж

1736—1813

Об аналитической механике

История развития классической механики представляет собой прекрасную иллюстрацию взаимного влияния естествознания и математики. Многие методы математики и даже целые ее разделы возникли при решении задач, поставленных механикой. Не случайно первое последовательное изложение механики с использованием исчисления бесконечно малых дал великий математик Л. Эйлер. Своего высшего развития механика XVIII в. достигла в трудах французского ученого Ж. Л. Лагранжа.

Жозеф Луи Лагранж родился 25 января 1736 г. в Турине, в семье казначея, разорившегося в результате неудачных финансовых предприятий. Отец хотел, чтобы сын стал адвокатом, и определил его в Туринский университет. Однако там наибольшее внимание юноши привлекли физика и математика. У него обнаружился блестящий математический талант, и в девятнадцать лет он стал профессором Артиллерийской школы в Турине.

Уже первые научные работы Лагранжа, посвященные как чисто математическим проблемам, так и задачам гидродинамики и акустики, были высоко оценены такими учеными, как Даламбер и Эйлер. Уже в 1756 г. Лагранж по представлению Эйлера был избран иностранным членом Берлинской Академии наук. Особую известность Лагранжу в начале его научной карьеры принесли исследования по вариационному исчислению.

В 1764 г. Парижская Академия наук объявила конкурс по проблеме движения Луны. Лагранж представил работу «Исследование о либрации* Луны», которая и была удостоена премии. В 1766 г. за исследование, посвященное теории движения спутников Юпитера, он удостоивается еще одной премии Парижской Академии. В том же году он становится президентом Берлинской Академии наук вместо переехавшего в Петербург Эйлера.

* Либрация — наблюдаемые периодические маятникообразные колебания Луны относительно ее центра масс.

Берлинский период (1766—1787) был самым плодотворным в жизни Лагранжа. В Берлине он подготовил важные работы по алгебре и теории чисел, а также по вопросам решения уравнений в частных производных. Там же он много занимался сферической тригонометрией и астрономическими проблемами. В Германии Лагранж подготовил и свою знаменитую «Аналитическую механику», которая была опубликована в 1788 г., уже после переезда в Париж. Во время работы в Берлине ученый был избран иностранным членом Петербургской Академии наук.

В 1787 г. после смерти короля Пруссии Фридриха II условия работы Лагранжа в Берлине ухудшились, и он переехал во Францию. Там он встретил радушный прием. Однако на некоторое время его научная работа была прервана: Лагранж вследствие переутомления тяжело заболел.

О высоком авторитете Лагранжа в Парижской Академии наук свидетельствует тот факт, что во время Великой французской революции при издании Конвентом декрета об изгнании всех иностранцев из страны для него было сделано исключение. Во время революции Лагранж был привлечен к работе комиссии, которая занималась разработкой новой метрической системы мер и весов. В 1797 г. после создания Политехнической школы в Париже, давшей впоследствии Франции блестящую плеяду ученых (Ф. Араго, Э. Малюс, О. Френель, С. Карно и др.), Лагранж ведет там активную преподавательскую работу. При открытии Института Франции (1795), заменившего Королевскую Академию наук, Лагранж избирается главой его физико-математического класса.

И в конце жизни ученый продолжает интенсивно работать над научными проблемами. В 1797 г. выходит в свет его фундаментальное сочинение «Теория динамических функций». Лагранж умер 10 апреля 1813 г.

За долгую творческую жизнь Лагранж занимался многими задачами механики. Однако вершиной этой области безусловно была «Аналитическая механика». В этой книге описано огромное число новых методов. В основу статики Лагранж положил принцип возможных перемещений, в основу динамики — сочетание этого принципа с принципом Даламбера. Он ввел обобщенные координаты и придал уравнениям динамики новую форму, а также развил принцип наименьшего действия — не случайно характеристической функции механической системы, выраженной через обобщенные координаты и время, дано название «лагранжиан». Лагранж превратил механику в общую науку о движении тел различной природы: жидких, газообразных и упругих.

Существует уже много трактатов о механике, но план настоящего трактата является совершенно новым. Я поставил себе целью свести теорию механики и методы решения связанных с нею задач к общим формулам, простое развитие которых дает все уравнения, необходимые для решения каждой задачи. Я надеюсь, что способ, каким я постарался этого достичь, не оставит желать чего-либо лучшего.

Кроме того, эта работа принесет пользу и в другом отношении: она объединит и осветит с единой точки зрения различные принципы, открытые до сих пор с целью облегчения решения механических задач, укажет их связь и взаимную зависимость и позволит судить об их правильности и сфере их применения.

Я делю эту работу на две части: на статику, или теорию равновесия, и на динамику, или теорию движения; в каждой из этих частей я отдельно рассматриваю твердые и жидкие тела.

В этой работе совершенно отсутствуют какие бы то ни было чертежи. Излагаемые мною методы не требуют ни построений, ни геометрических или механических рассуждений; они требуют только алгебраических операций, подчиненных планомерному и однообразному ходу. Все любящие анализ с удовольствием убедятся в том, что механика становится новой отраслью анализа, и будут мне благодарны за то, что этим путем я расширил область его применения. <...>

ЧАСТЬ I Статика

Раздел II

Общая формула статики
для равновесия любой системы сил
и метод применения этой формулы

1. Общий закон равновесия машин заключается в том, что силы относятся друг к другу обратно отношению скоростей точек, к которым они приложены, причем скорости должны измеряться по направлению этих сил.

В этом законе заключается положение, которое обычно называют *принципом виртуальных скоростей*. Как мы показали в предыдущем разделе, этот принцип уже давно известен в качестве основного принципа равновесия, в силу чего его можно рассматривать как своего рода аксиому механики.

Для того чтобы выразить этот принцип в виде формулы, допустим, что силы P , Q , R , ..., действующие по определенным направлениям, взаимно уравновешивают друг друга. Представим себе, что из точек, к которым приложены силы, отложены отрез-

ки, равные $p, q, r, \dots$ и расположенные по направлению этих сил. Обозначим через $dp, dq, dr, \dots$ вариации, или дифференциалы, этих отрезков, поскольку они могут получиться в результате какого-либо бесконечно малого изменения положения различных тел или точек системы.

Ясно, что эти дифференциалы выразят пути, которые будут пройдены в одно и то же мгновение силами $P, Q, R, \dots$ по своим собственным направлениям, если допустить, что эти силы стремятся удлинить соответственно отрезки $p, q, r, \dots$. Таким образом, дифференциалы $dp, dq, dr, \dots$ будут пропорциональны виртуальным скоростям сил $P, Q, R, \dots$ и, следовательно, могут быть для простоты подставлены вместо этих скоростей.

Установив это, рассмотрим сначала только две силы P и Q , находящиеся в равновесии. Согласно закону равновесия сил, величины P и Q должны быть обратно пропорциональны дифференциалам dp, dq . Но легко понять, что равновесия между двумя силами не будет, если только они не будут расположены так, что, когда одна из них движется по собственному своему направлению, другая сила вынуждена двигаться в сторону, противоположную своему собственному направлению. Отсюда следует, что дифференциалы dp и dq должны иметь противоположные знаки. Поэтому, если допустить, что обе силы P и Q положительны; для равновесия получается

$$\frac{P}{Q} = -\frac{dq}{dp}, \text{ или } Pdp + Qdp = 0.$$

Такова общая формула равновесия двух сил.

Рассмотрим теперь равновесие трех сил P, Q, R , виртуальные скорости которых представлены дифференциалами dp, dq, dr . Положим $Q = Q' + Q''$ и допустим, что часть Q' силы Q такова, что

$$Pdp + Q'dq = 0.$$

Таким образом, сила P будет находиться в равновесии с силой Q' , и для полного равновесия необходимо, чтобы другая часть Q'' той же силы Q находилась в равновесии с третьей силой R . что дает уравнение

$$Q''dq + Rdr = 0.$$

Если это уравнение связать с предыдущим, то вследствие равенства $Q' + Q'' = Q$ получим следующее уравнение:

$$Pdp + Qdq + Rdr = 0.$$

Если имеется четвертая сила S , виртуальная скорость которой представлена дифференциалом ds , то можно положить

$$Q = Q' + Q'' \text{ и } Pdp + Q'dq = 0,$$

а также

$$R = R' + R'' \text{ и } Q''dq + Rdr = 0.$$

Итак, часть Q' силы Q будет находиться в равновесии с силой P ; часть R' силы R будет в равновесии с другой частью Q'' силы Q , и, для того чтобы имело место полное равновесие между силами P, Q, R, S , оставшаяся часть R'' силы R должна находиться в равновесии с силой S . Таким образом,

$$R''dr + Sds = 0.$$

Если все эти три уравнения соединить в одно, то получается

$$Pdp + Qdq + Rdr + Sds = 0.$$

И так далее, как бы ни было велико число сил, находящихся в равновесии.

2. Итак, для равновесия любого числа сил $P, Q, R, \dots$, направленных по линиям $p, q, r, \dots$ и приложенных любым образом, мы имеем уравнение вида

$$Pdp + Qdq + Rdr + \dots = 0.$$

Это общая формула статики для равновесия любой системы сил.

Мы назовем каждый член этой формулы, например Pdp *моментом силы P* и примем слово «момент» в том смысле, какой ему придал Галилей, т. е. как произведение силы на ее виртуальную скорость. Тогда приведенная выше общая формула статики гласит: *сумма моментов всех сил равна нулю.*

При применении этой формулы вся трудность сводится к тому, чтобы определить значения дифференциалов $dp, dq, dr, \dots$ в соответствии с природой заданной системы.

Рассмотрим теперь систему в двух различных, но бесконечно близких положениях и станем искать наиболее общие выражения для интересующих нас дифференциалов, введя в них столько неопределенных величин, сколько имеется произвольных элементов при изменении положения системы. Полученные таким образом выражения мы подставим в заданное уравнение. Это уравнение должно иметь силу независимо от всех неопределенных величин для того, чтобы равновесие системы вообще существовало и, кроме того, во всех направлениях. Приравняем нулю отдельно сумму членов, в которые входят одни и те же неопределенные величины, и таким путем получим столько отдельных уравнений, сколько имеется этих неопределенных величин. Однако нетрудно убедиться, что их число всегда будет равно числу неизвестных в положении системы. Таким образом, с помощью этого метода мы получим столько уравнений, сколько их требуется для определения состояния равновесия системы.

Этим именно методом и пользовались все авторы, применявшие до сих пор принцип виртуальных скоростей для разрешения проблем статики. Однако этот метод применения указанного принципа зачастую требует геометрических построений и рассуждений, благодаря которым решения становятся столь же длинными, как если бы их искали с помощью обыкновенных принципов статики. В этом, может быть, и заключается причина, препят-

ствовавшая применению этого принципа во всех тех случаях, когда его следовало бы, казалось, применить благодаря его простоте и общности.

3. Задачей настоящей работы является сведение механики к чисто аналитическим операциям, и формула, которую мы выше нашли, чрезвычайно приспособлена для выполнения этой задачи. Все дело сводится только к тому, чтобы выразить аналитически и в наиболее общем виде значения отрезков $p, q, r, \dots$, взятых по направлению сил $P, Q, R, \dots$, и тогда путем простого дифференцирования получаются значения виртуальных скоростей $dp, dq, dr, \dots$.

Следует при этом отметить, что в дифференциальном исчислении во всех тех случаях, когда несколько величин изменяются одновременно, допускают, что все они в течение одного и того же времени увеличиваются на величину своего дифференциала, и если согласно природе вопроса некоторые из них должны убывать в то время, как другие возрастают, то дифференциалам убывающих величин приписывают знак минус.

Дифференциалы $dp, dq, dr, \dots$ представляющие виртуальные скорости сил $P, Q, R, \dots$, следует считать положительными или отрицательными в зависимости от того, стремятся ли силы увеличить или уменьшить отрезки $p, q, r, \dots$, определяющие их направления. Но так как общая формула равновесия не изменяется при изменении знаков всех ее членов, можно с одинаковым основанием принять в качестве положительных дифференциалы тех отрезков, которые увеличиваются или же уменьшаются одновременно, и в качестве отрицательных — дифференциалы тех отрезков, которые изменяются в противоположном смысле. Таким образом, если считать силы положительными величинами, то их моменты $Pdp, Qdq, \dots$ будут положительными или отрицательными в зависимости от того, будут виртуальные скорости $dp, dq, \dots$ положительными или отрицательными. Если мы пожелаем заставить силы действовать в противоположном направлении, то нам придется только приписать знак минус тем величинам, которые представляют эти силы, или же изменить знак их моментов.

Отсюда вытекает основное свойство равновесия, заключающееся в том, что любая система сил, находящихся в равновесии, продолжает оставаться в этом состоянии, когда каждая из этих сил изменяет направление своего действия на противоположное, если только структура этой системы не претерпевает какого-либо изменения вследствие изменения направления всех сил.

4. Каковы бы ни были силы, действующие на заданную систему тел или точек, всегда можно считать, что они как бы стремятся к некоторым точкам, расположенным на линиях, по которым они направлены.

Назовем эти точки *центрами сил*; можно принять за отрезки $p, q, r, \dots$ соответствующие расстояния от этих центров до тех точек системы, в которых приложены силы $P, Q, R, \dots$. В этом случае ясно, что данные силы стремятся уменьшить отрезки $p, q, r, \dots$.

Следовательно, их дифференциалам следует сообщить знак *минус*, но если изменить все знаки, то общая формула сохранит свой вид:

$$Pdp + Qdq + Rdr + \dots = 0.$$

Но центры сил могут находиться как вне системы, так и внутри самой системы, составляя часть ее; по этому признаку различают силы *внешние* и *внутренние*.

В первом случае ясно, что дифференциалы $dp, dq, dr, \dots$ выражают полные вариации отрезков $p, q, r, \dots$, связанные с изменением положения системы. Они являются полными дифференциалами величин $p, q, r, \dots$, если рассматривать в качестве переменных все величины, относящиеся к положению системы, и в качестве постоянных — величины, относящиеся к положению различных центров сил.

Во втором случае некоторые из тел системы сами будут центрами сил, действующих на другие тела системы, и вследствие равенства действия и противодействия эти последние, в свою очередь, будут одновременно центрами сил, действующих на первые.

Рассмотрим два тела¹, действующих друг на друга с некоторой силой P , причем эта сила может происходить вследствие притяжения или отталкивания этих тел, либо вследствие наличия пружины, находящейся между ними, либо, наконец, может происходить от какой-нибудь другой причины. Пусть p — расстояние между этими двумя телами, dp' — вариация этого расстояния, поскольку она зависит от изменения положения одного из тел. Ясно, что по отношению к этому телу Pdp' будет моментом силы P . Точно так же если через dp'' обозначить вариацию того же расстояния p , происходящую вследствие изменения положения другого тела, то по отношению к этому второму телу мы будем иметь момент Pdp'' той же силы P . Следовательно, весь момент, обязанный своим существованием этой силе, может быть выражен через $P(dp' + dp'')$. Но ясно, что $dp' + dp''$ представляет собой полный дифференциал p , который мы обозначим dp , так как расстояние p может изменяться только вследствие смещения обоих этих тел. Таким образом, рассматриваемый момент сил равен Pdp . Этот вывод можно распространить на любое количество тел².

5. Отсюда следует, что для получения суммы моментов всех сил заданной системы, будь то силы внешние или внутренние, следует рассмотреть в отдельности каждую из сил, действующих на различные тела или точки системы, и взять сумму произведений этих различных сил, умноженных каждая на дифференциал соответствующего расстояния между обоими точками каждой силы, а именно: между точкой, на которую эта сила действует, и точкой, к которой она стремится. В этих дифференциалах следует рассматривать в качестве переменных все величины, зависящие от положения системы, и в качестве постоян-

ных — величины, относящиеся к внешним точкам или центрам, т. е. эти последние точки следует рассматривать как постоянные, когда положение системы подвергается изменению.

Указанная сумма, будучи приравнена нулю, даст общую формулу статики.

ЧАСТЬ II

Динамика

Раздел II

Общая формула динамики для движения системы тел, находящихся под действием каких-либо сил

1. Когда силы, действующие на систему тел, распределены соответственно законам, изложенным в первой части настоящего сочинения, то эти силы взаимно уничтожаются и система остается в равновесии. Но если равновесия не существует, то тела должны двигаться, подчиняясь полностью или частично влиянию действующих сил. Определение движений, вызываемых заданными силами, и составляет предмет настоящей второй части «Аналитической механики».

Мы будем рассматривать главным образом силы ускоряющие и замедляющие, действие которых, подобно действию силы тяжести, непрерывно и которые стремятся каждое мгновение сообщить бесконечно малую и одинаковую для всех частиц материи скорость.

В том случае, когда эти силы действуют свободно и равномерно, они вызывают скорости, которые возрастают пропорционально времени. Сообщенные таким образом за заданное время скорости можно рассматривать как наиболее простое действие этого рода сил, которое, следовательно, является наиболее подходящим для измерения. Простые действия этих сил следует в механике считать известными, и все искусство этой науки заключается лишь в том, чтобы вывести из них сложные явления, которые должны получаться в результате соединенного и видоизмененного действия этих сил.

2. Итак, допустим, что для каждой ускоряющей силы известна скорость, какую она способна сообщить в течение определенного промежутка времени, который мы примем в качестве единицы времени, движущемуся телу, действуя на него все время одинаковым образом, и будем измерять ускоряющую силу именно с помощью этой скорости. Последняя же, в свою очередь, должна измеряться тем пространством, которое движущееся тело прошло бы в течение такого же времени, если бы оно продолжало двигаться равномерно. На основании теорем Галилея известно, что это пространство всегда вдвое больше пространства, фактически проходимого телом под постоянным действием ускоряющей силы.

Вообще можно какую-нибудь известную ускоряющую силу принять в качестве единицы и к ней относить все прочие силы. Тогда в качестве единицы пространства следует принять удвоенную величину того пространства, которое под влиянием той же равномерно действующей силы пройдет тело в течение промежутка времени, принятого в качестве единицы времени, а скорость, полученная за то же время под постоянным действием той же силы, будет в этом случае единицей скоростей.

Таким образом, силы, пространства, времена и скорости явятся лишь простыми отношениями, обыкновенными математическими количествами³.

Так, например, если в качестве единицы ускоряющих сил принять силу тяжести на широте Парижа и время измерять в секундах, тогда следует 30,196 парижских футов принять в качестве единицы пройденных пространств, так как 15,098 — это высота, с какой на этой широте падает в одну секунду тело, предоставленное самому себе. В этом случае единицей скоростей будет та скорость, которую падающее тело приобретает, пройдя указанную высоту.

3. Установив эти предварительные определения, рассмотрим систему тел, расположенных совершенно произвольным образом и находящихся под действием любых ускоряющих сил.

Пусть m — масса любого из этих тел, которое мы будем рассматривать в качестве точки. Для простоты отнесем абсолютное положение этого тела к концу любого промежутка времени t к трем прямоугольным координатам: x , y , z . Эти координаты мы будем предполагать всегда параллельными трем осям, неподвижным в пространстве и пересекающимся под прямыми углами в одной точке, называемой *началом координат*. Следовательно, эти координаты выразят расстояния тела от трех плоскостей, проходящих через эти же оси.

Вследствие взаимной перпендикулярности указанных плоскостей координаты x , y , z выражают те расстояния, на которые тело при своем движении отдаляется от этих плоскостей. Значит,

$$\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}$$

выразят те скорости, которые рассматриваемое тело имеет в некоторое мгновение, чтобы удалиться от каждой из этих плоскостей и двигаться в сторону возрастающих координат. Если бы тело затем было предоставлено самому себе, то, согласно основным принципам теории движения, эти скорости остались бы в последующие мгновения постоянными.

Однако вследствие существования между телами связи и под действием влияющих на них ускоряющих сил эти скорости в течение мгновения dt получают приращения

$$d \frac{dx}{dt}, d \frac{dy}{dt}, d \frac{dz}{dt},$$

которые надлежит определить. Эти приращения можно рассматривать как новые скорости, сообщенные каждому телу, и если их разделить на dt , то мы будем иметь меру ускоряющих сил, необходимых для того, чтобы вызвать эти приращения. В самом деле, как бы ни было изменчиво действие какой-либо силы, согласно природе дифференциального исчисления, мы можем ее всегда принять в качестве постоянной в течение бесконечно малого времени. Тогда скорость, сообщенная телу этой силой, пропорциональна произведению силы на время. Следовательно, сама сила будет выражена с помощью отношения скорости ко времени.

Если элемент времени dt принять в качестве постоянной величины, то рассматриваемые ускоряющие силы выразятся через $\frac{d^2x}{dt^2}$, $\frac{d^2y}{dt^2}$, $\frac{d^2z}{dt^2}$, а если эти силы умножить на массу m тела, на которое они действуют, то

$$m \frac{d^2x}{dt^2}, m \frac{d^2y}{dt^2}, m \frac{d^2z}{dt^2}$$

выразят силы, примененные непосредственно для того, чтобы в течение времени dt двигать тело m параллельно осям координат x , y , z . Таким образом, каждое тело m системы можно рассматривать как находящееся под действием подобных сил. Следовательно, все эти силы должны быть эквивалентны тем силам, под влиянием которых, согласно допущению, находится система и действие которых видоизменяется вследствие природы самой системы. Поэтому, согласно теореме, приведенной в первой части (разд. II, п. 15), сумма моментов первых всегда должна быть равна сумме моментов вторых.

4. В дальнейшем мы будем применять обычный знак d для обозначения дифференциалов по времени, а вариации, выражающие виртуальные скорости, мы будем обозначать знаком δ , как мы это уже делали и раньше при разрешении некоторых вопросов в первой части настоящего сочинения.

Тогда мы будем иметь $m \frac{d^2x}{dt^2} \delta x$, $m \frac{d^2y}{dt^2} \delta y$, $m \frac{d^2z}{dt^2} \delta z$ для моментов сил $m \frac{d^2x}{dt^2}$, $m \frac{d^2y}{dt^2}$, $m \frac{d^2z}{dt^2}$, действующих по направлению координат x , y , z и стремящихся увеличить эти координаты. Сумма моментов может быть, таким образом, выражена с помощью формулы

$$Sm \left(\frac{d^2x}{dt^2} \delta x + \frac{d^2y}{dt^2} \delta y + \frac{d^2z}{dt^2} \delta z \right).$$

если допустить, что знак интегрирования S распространяется на все тела системы.

5. Пусть теперь P , Q , R , ... представляют собою заданные ускоряющие силы, действующие на каждое тело системы по

направлению соответствующих центров, к которым, согласно допущению, направлены эти силы, и пусть $p, q, r, \dots$ — прямолинейные расстояния каждого из этих тел от тех же центров. Тогда дифференциалы $\delta p, \delta q, \delta r, \dots$ — вариации линий $p, q, r, \dots$, происходящие вследствие вариаций $\delta x, \delta y, \delta z$ координат x, y, z тела m . Но так как силы $P, Q, R, \dots$, согласно нашему представлению, стремятся уменьшить эти линии, то их виртуальные скорости должны быть выражены через $-\delta p, -\delta q, -\delta r, \dots$ (ч. I, разд. II, п. 3). Следовательно, моменты сил $mP, mQ, mR, \dots$ равны $-mP\delta p, -mQ\delta q, -mR\delta r, \dots$, а сумма моментов всех этих сил составит

$$-Sm(P\delta p + Q\delta q + R\delta r + \dots).$$

Если эту сумму приравнять к сумме, приведенной в предыдущем пункте, то мы получим

$$Sm\left(\frac{d^2x}{dt^2}\delta x + \frac{d^2y}{dt^2}\delta y + \frac{d^2z}{dt^2}\delta z\right) = -Sm(P\delta p + Q\delta q + R\delta r + \dots)$$

или, перенеся правую часть влево,

$$Sm\left(\frac{d^2x}{dt^2}\delta x + \frac{d^2y}{dt^2}\delta y + \frac{d^2z}{dt^2}\delta z\right) + Sm(P\delta p + Q\delta q + R\delta r + \dots) = 0.$$

Такова общая формула динамики для движения любой системы тел. <...>

Комментарий

Перевод с французского работы Ж. Л. Лагранжа выполнен В. С. Гохманом. Отрывки из работы воспроизводятся по изданию: Лагранж Ж. Аналитическая механика. В 2 т. 2-е изд. М. — Л., 1950.

Здесь, как и раньше, слово «тело» обозначает материальную точку.

Особенность изложения Лагранжа состоит в том, что он, вводя деление сил на внешние и внутренние, при определении работы внутренних сил всегда в качестве элемента рассматривает сумму работ действия и противодействия, особо отмечая взаимное перемещение взаимодействующих точек. Пояснение, которое делает здесь Лагранж, связано с тем, что в XVIII в. еще не стало традицией рассмотрение физических величин, имеющих составную размерность.

Литература

- [1] Собрание сочинений Ж. Л. Лагранжа: Lagrange J. L. Oeuvres, T. 1—14. Paris, 1867—1892.
- [2] Forti A. Intorno alla vita e alle opere di Luigi Lagrange. Roma, 1869.
- [3] Погребысский И. Б. От Лагранжа к Эйнштейну. М., 1966.
- [4] Жозеф Луи Лагранж (1736—1936). Сб. ст., М. — Л., 1937.
- [5] Тюлина И. А. Жозеф Луи Лагранж. М., 1977.



Ш. Кулон

1736—1806

О фундаментальном законе электростатики

Вопрос о том, как взаимодействуют наэлектризованные тела, интересовал ученых издавна: эффект притяжения легких предметов натертым янтарем был известен еще в эпоху античности. Однако лишь после создания механики Ньютона этот вопрос приобрел определенность и была поставлена задача определения зависимости силы электростатического взаимодействия от расстояния. Понятно, что многие естествоиспытатели XVIII в., занимавшиеся проблемами электричества, задумывались об аналогии между электрическими силами и силами всемирного тяготения. На этой аналогии основывалось предположение о том, что «закон электрической силы» есть закон «обратных квадратов». Правда, доказать справедливость этого предположения оказалось не так просто. Это объяснялось, во-первых, особенностями явлений электростатики, отличающими их от эффектов тяготения, а во-вторых, относительно низким уровнем развития количественного физического эксперимента. Лишь в 1785 г. были представлены убедительные экспериментальные доказательства того, что сила, действующая между неподвижными «элементарными» (т. е. точечными) зарядами, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Честь обоснования этого закона принадлежит выдающемуся французскому инженеру и физiku Кулону.

Шарль Огюстен Кулон родился 14 июля 1736 г. во французском городе Ангулеме в семье чиновника. Он закончил военно-инженерную школу в Мезьере — одном из лучших высших технических учебных заведений того времени. После окончания учебы в течение ряда лет Кулон служил на Мартинике, где руководил строительством крупного форта. После возвращения на родину он продолжал исполнять обязанности офицера военно-инженерного корпуса, однако постепенно все больше времени уделял научным исследованиям. Первая же научная работа Кулона, начатая еще на Мартинике, «О приложении правил максимумов и минимумов к некоторым проблемам статики, относящимся к архитектуре» принесла автору известность. Многие методы решения задач строительной механики, предложенные Кулоном, явились основой прогресса этой отрасли знаний в XVIII—XIX вв.

Кулон был одним из первых ученых, сочетавших в своих исследованиях высокий уровень экспериментов с ориентацией на практические проблемы. Ярким примером такого сочетания является работа Кулона, посвященная внешнему (сухому) трению и составившая целую эпоху в изучении этого сложного физического явления. На основе простых, но весьма убедительных опытов ученый изучил зависимости силы трения покоя и силы трения скольжения от множества факторов (нормального давления, площади и длительности контакта тел, состояния их поверхностей, относительной скорости движения и т. д.). Особенно важно подчеркнуть, что опыты Кулона по сухому трению были полномасштабными, т. е. проводились при условиях, близких к реализующимся на практике, что позволяло использовать их результаты для решения технических задач. Важнейшим результатом работы Кулона было подтверждение в широком диапазоне нагрузок пропорциональности силы трения скольжения $F_{тр}$ и силы нормального давления F_n , действующей между трущимися поверхностями, о которой писал Г. Амонтон еще в 1699 г. Закон $F_{тр} = \mu F_n$, где μ — коэффициент трения, часто называют законом Амонтона—Кулона.

За работу по внешнему трению в 1781 г. Кулон получил премию Парижской Академии наук. В этом же году он был избран членом этой академии и переехал в Париж. С этого времени научная работа становится в жизни Кулона основной. В 80-е годы Кулон провел исследование кручения тонких металлических нитей, на основе которого он построил знаменитые крутильные весы — прибор для измерения малых сил, обладавший уникальной для XVIII в. чувствительностью.

Крутильные весы стали основным прибором в цикле работ Кулона по электричеству и магнетизму (1785—1789). В этом цикле, состоявшем из семи мемуаров, были установлены важнейшие количественные закономерности электро- и магнитостатики.

Вследствие событий революции 1789 г. ученый был вынужден прервать исследования и покинуть Париж. После возвращения Кулона в столицу и избрания его членом Института Франции, заменившего Королевскую Академию, исследовательская деятельность ученого заметно ослабла, хотя им была выполнена важная работа по изучению вязкого трения. В последние годы жизни Кулон много занимался вопросами совершенствования народного образования во Франции. Умер Кулон в Париже 28 августа 1806 г.

Попытки экспериментального определения «закона электрической силы» предпринимались с середины XVIII в., однако до Кулона все они оказались неудачными, поскольку не проводилось различие между пондеромоторными силами, возникающими между заряженными телами произвольных размеров, и силами, действующими между «элементарными» (точечными) зарядами. Правда, английскому ученому Г. Кавендишу с помощью метода

сферического конденсатора (около 1773 г.) удалось показать, что закон взаимодействия электрических зарядов есть действительно закон «обратных квадратов», однако результаты его исследований не были опубликованы и никак не повлияли на работу Кулона. Следует отметить, что метод Кавендиша не позволял ввести единицу электрического заряда. Метод Кулона, основанный на непосредственном анализе сил взаимодействия заряженных тел малых размеров, позволил это сделать, поэтому опыты французского ученого имели особое значение для развития науки об электричестве.

**Первый мемуар
по электричеству и магнетизму.
Конструкция и применение
электрических весов, основанных
на свойстве металлических нитей
иметь силу реакции
при кручении, пропорциональную
углу кручения**

**Экспериментальное определение закона,
следуя которому взаимно отталкиваются
части тел, наэлектризованных
электричеством одного рода**

В Мемуаре¹, представленном в академию в 1784 г., я на основе эксперимента определил закон для силы кручения металлической нити и обнаружил, что эта сила равна произведению угла кручения на диаметр нити подвеса в четвертой степени и ее обратной длине, умноженной на постоянный коэффициент, зависящий от природы металла, который легко определить на опыте.

В том же Мемуаре я показал, что с помощью этой силы кручения можно с большой точностью измерять очень незначительные силы, как, например, одну десятиmillionную грана. Там же я дал первое приложение этой теории, стремясь оценить постоянную силу, приписываемую сцеплению, в формуле, которая выражает трение поверхности твердых тел, движущихся в жидкости.

Сегодня я представляю перед академией электрические весы, сконструированные согласно тем же принципам. Они с наивысшей точностью измеряют состояние и электрическую силу тела. настолько слабую, насколько слабым должен быть градус электричества.

Конструкция весов. Хотя практика показала мне, что для выполнения некоторых электрических опытов в удобной форме необходимо исправить несколько ошибок в первых изготовленных мною весах подобного рода, однако до сих пор я пользовался только ими и поэтому дам их описание, предупреждая, что их

форма и величина могут и должны меняться, следуя природе экспериментов, которые намереваются провести. Первый рисунок дает общий вид этих весов, детали которых таковы.

На стеклянном цилиндре *ABCD* [рис. 66, а] 12 дюймов в диаметре и 12 дюймов высотой устанавливалась стеклянная пластина диаметром 13 дюймов, полностью закрывавшая стеклянный сосуд. В этой пластине просверлены два отверстия диаметром почти в 20 линий, одно — в центре, в *f*, и над ним возвышается стеклянная трубка высотой 24 дюйма. Эта трубка закреплена в отверстии клеем, используемым в электрических приборах. На вершине трубки в *h* помещен крутильный микрометр, который в деталях виден на рисунке [рис. 66, б]. Верхняя часть прибора имеет головку *b*, указатель *oi* и зажим для подвеса *q*. Этот зажим входит в отверстие *G*, образованное ободом *ab*, поле которого разделено на 360 градусов, и медной трубкой, которая входит в трубку *H*, припаянную изнутри к верхнему концу стеклянной трубки, или штока *fh* [рис. 66, а]. Зажим [рис. 66, б] имеет форму, близкую к форме рейсфедера, и может затягиваться с помощью ушка *q*. Именно рейсфедером и сжимается конец очень тонкой серебряной нити. Другой ее конец [рис. 66, в] зажат в *p* с помощью медного или железного стержня диаметром всего в одну линию, конец которого расщеплен и образует зажим, сжимающийся посредством подвижного кольца Φ . Этот маленький стержень утолщается в *c*, где он просверлен для того, чтобы пропустить иглу *ag* [рис. 66, в]. Этот стержень должен иметь вес, достаточный, чтобы натягивать серебряную нить, не разрывая ее. Игла *ag* подвешивается горизонтально почти на середине высоты большого сосуда, который окружает ее. Она образована либо шелковой нитью, натертой испанским воском, либо соломинкой, также натертой испанским воском, и заканчивается на протяжении от *q* до *a*, на 18 линий, цилиндрической нитью из шеллака²; на конце этой иглы *a* имеется маленький бузиновый шарик, от двух до трех линий в диаметре. В *g* расположен маленький вертикальный

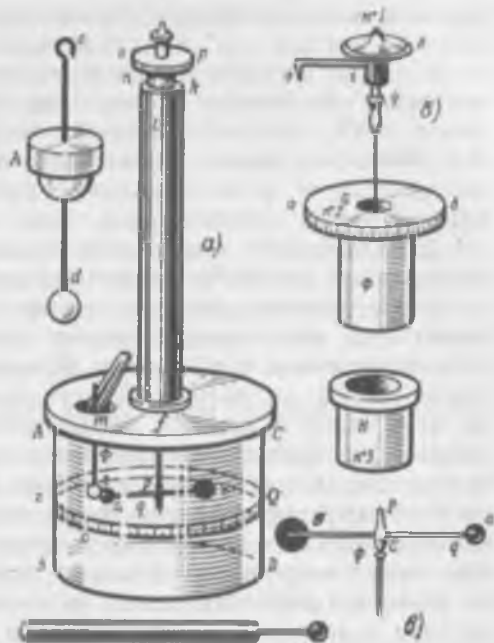


Рис. 66

пропитанный скипидаром кусочек бумаги, который служит противовесом шарика a и замедляет колебания.

Мы уже говорили, что в крышке AC просверлено второе отверстие m . Именно в это отверстие вводится маленький цилиндр $m\Phi i$, средняя часть Φi которого сделана из шеллака. В i находится шарик, также сделанный из бузины. Вокруг сосуда на высоте иглы описана окружность zQ , разделенная на 360° .

Для большей простоты я пользовался бумажной лентой, разделенной на 360° , которой обклеивал сосуд на высоте иглы.

Чтобы начать работать с этим прибором, я поступал примерно так: располагал крышку таким образом, чтобы отверстие m отвечало начальному делению или точке o шкалы zoQ , прочерченной на сосуде. Я устанавливал указатель микрометра oi в точку o , или на начальное деление этого микрометра; затем я заставлял весь микрометр поворачиваться в вертикальной трубке fh до тех пор, пока игла ag не оказывалась отвечающей начальному делению круга zoQ , если смотреть на вертикальную нить, на которой подвешена игла, и центр шарика. Затем через отверстие m я вводил другой шарик i , подвешенный на цилиндре $m\Phi i$, так, чтобы он коснулся шарика a и чтобы при взгляде через центр нити подвеса и шарик i последний отвечал начальному делению круга zQ . Теперь весы готовы ко всем операциям. Мы приведем в качестве примера способ, использованный нами для установления фундаментального закона, согласно которому отталкиваются наэлектризованные тела.

Фундаментальный закон электричества. Отталкивающая сила двух маленьких шариков, наэлектризованных электричеством одного рода, обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами двух шариков.

Эксперимент. Электризуется маленький проводник, представляющий собой булавку с большой головкой, которая изолирована путем втыкания ее острия в конец палочки из испанского воска. Эта булавка вводится в отверстие m и ею касаются шарика i , находящегося в контакте с шариком a . После удаления булавки два шарика оказываются заряженными электричеством одного и того же рода и расходятся на расстояние, которое измеряется с помощью шкалы zQ по направлению на нить подвеса и центр шарика a . Поворачивая затем указатель микрометра в направлении plo , закручивают нить подвеса lp и создают силу, пропорциональную углу кручения, которая стремится приблизить шарик a к шарiku i . Таким способом наблюдают расстояние, на которое при разных углах закручивания шарик a продвигается к шарiku i . Сравнивая силы кручения с соответствующими расстояниями между двумя шариками, определяют закон отталкивания.

Я привожу здесь только несколько измерений, которые легко повторить и которые тут же делают зримым закон отталкивания.

Первый опыт. При электризации двух шариков с помощью

головки булавки, когда указатель микрометра установлен на o , шарик иглы a удалится от шарика i на 36° .

Второй опыт. При закручивании нити подвеса посредством головки микрометра на 126° два шарика сблизятся и остановились на расстоянии 18° один от другого.

Третий опыт. При закручивании нити подвеса на 567° два шарика сблизятся до $8,5^\circ$.

Объяснение результатов этого эксперимента. Когда шарики еще не наэлектризованы, они касаются друг друга и центр шарика a , подвешенного на игле, удален от той точки, где кручение нити подвеса равно нулю, лишь на половину диаметра двух шариков. Следует предупредить, что серебряная нить lp , которая образует подвес, имеет длину 28 дюймов и эта нить настолько

тонка, что фут длины этой нити весит всего $\frac{1}{16}$ грана. Рассчитывая силу, с которой следует подействовать [на коромысло] в точке a , удаленной на 4 дюйма от нити lp , или от центра подвеса, чтобы закрутить эту нить, я нашел по формулам, объясненным в Мемуаре о законе силы кручения металлических нитей в томе Академии за 1784 г., что для закручивания этой нити на 360° необходимо приложить в точке a , действуя плечом ar в четыре дюйма, силу всего лишь $\frac{1}{340}$ грана. Поскольку силы кручения, как доказано в Мемуаре, меняются как углы кручения, малейшая отталкивающая сила между двумя шариками заметно удаляет их один от другого.

В нашем первом опыте, когда указатель микрометра стоял на точке o , мы нашли, что шарики удалились на 36° , что создало в то же время силу кручения $36^\circ = \frac{1}{3400}$ грана.

Во втором опыте расстояние между шариками равно 18° , но, поскольку микрометр закручен на 126° , в результате для расстояния 18° сила отталкивания была 144° . Таким образом, на середине первого расстояния отталкивание шариков учетверилось.

В третьем опыте нить подвеса закрутили на 567° и шарики находились на удалении всего только $8,5^\circ$. Общее закручивание, следовательно, 576° , т. е. равно учетверенному закручиванию во втором опыте. Отсюда следует, что в третьем опыте расстояние между шариками всего лишь на полградуса меньше половины расстояния второго опыта. Значит, из этих трех опытов вытекает, что отталкивание, с которым два шарика, наэлектризованные электричеством одного рода, действуют друг на друга, обратно пропорционально квадратам расстояний.

Замечание первое. При повторении описанных выше опытов обнаружится, что, используя серебряную нить, столь же тонкую, как и применявшаяся нами, которая дает для силы кручения при угле 5° только 24 миллионных грана при спокойном воздухе и при соблюдении некоторых предосторожностей, можно устано-

вить иглу в естественное положение, где кручение равно нулю, только с точностью от 2 до 3°. Следовательно, чтобы сравнить первый опыт со следующими, необходимо после электризации двух шариков закрутить нить подвеса на угол от 30 до 40°, что вместе с наблюдаемым расстоянием между двумя шариками даст достаточно значительную силу кручения, при которой неопределенность начального положения иглы в 2 или 3°, когда кручение равно нулю, не внесет в результаты ощутимой ошибки. <...>

Замечание второе. Электричество на двух шариках немного уменьшается в зависимости от времени, которое длится эксперимент. Я проверил, что в тот день, когда был проведен описанный выше опыт, наэлектризованные шарики, находившиеся вследствие взаимного отталкивания на расстоянии 30° один от другого при угле кручения 50°, сблизились на 1° за 3'. Но поскольку мне требовалось только 2', чтобы провести три опыта, описанные выше, в этих экспериментах можно пренебречь ошибкой, происходящей из-за потери электричества. <...>

Замечание третье. Расстояние между двумя шариками, когда они удалены друг от друга действием взаимного отталкивания, измеряется в точности не углом, который они образуют, а хордой дуги, которая соединяет их центры. Также и плечо в крайнем положении, где проявляется действие, измеряется не половиной длины иглы, или радиусом, а косинусом половины угла, образованного расстоянием между двумя шариками. Это две величины, одна из которых меньше дуги и, следовательно, уменьшает расстояние, измеряемое дугой, в то время как вторая уменьшает плечо и до некоторой степени компенсирует первую. В опытах такого рода, которыми мы занимаемся, без значительной ошибки можно сохранить данную нами оценку, если расстояние между двумя шариками не превосходит 25—30°. В других случаях расчет следует проводить строго. <...>

**Второй мемуар
по электричеству и магнетизму,
где определяется,
следуя каким законам
действует магнитная жидкость,
так же как и жидкость
электрическая,
либо при отталкивании,
либо при притяжении**

<...> Но когда я хотел воспользоваться тем же способом, чтобы определить силу притяжения двух шариков, заряженных электричеством разного рода, то, пользуясь теми же весами, что служили для измерения отталкивания двух шариков, я встретил

ся на практике с неудобством, которого не было при измерении отталкивания. Практическая трудность состояла в том, что, когда два шарика, притягиваясь, сближаются, сила притяжения, которая, как мы скоро увидим, обратно пропорциональна квадрату расстояния, часто меняется в большем отношении, чем сила кручения, пропорциональная просто углу кручения. Лишь после неудач многих опытов притягивающимся шарикам стали мешать касаться друг друга в крайних положениях с помощью установки идеоэлектрической преграды движению иглы. Но поскольку наши весы предназначены для измерения действий, меньших миллионной доли грана, сцепление иглы с этим препятствием портит результаты и требует касаний, во время которых часть электричества теряется. <...>

**Второй экспериментальный метод
для определения закона,
следуя которому шар диаметром в один
или два фута притягивает маленькое
тело, назлектризованное
электричеством другого рода,
чем его собственное**

Метод, которому мы собираемся следовать, аналогичен тому, который был применен в седьмом томе *Savants Etrangers*³ для определения магнитной силы стальной пластинки в зависимости от ее длины, ширины и толщины. Он состоит в подвешивании горизонтально иглы, у которой назлектризован только конец и которая, находясь на неопределенном расстоянии от шара, назлектризованного электричеством другого рода, притягивается и колеблется под действием этого шара. По числу колебаний за данное время путем расчета определяют силу притяжения на разных расстояниях как силу гравитации по колебаниям обычного маятника.

Вот несколько замечаний, которыми мы руководствовались в последующих экспериментах. Шелковая нить, какую вытягивают из кокона, способная выдерживать без разрыва до 80 гранов, имеет такую податливость к кручению, что если на сходную нить длиной 3 дюйма подвесить в пустоте горизонтально маленькую круглую пластинку, вес и диаметр которой известны, то по времени колебаний маленькой пластинки согласно формулам, разъясненным в Мемуаре о силе кручения, напечатанном в томе Академии за 1784 г., найдем, что при действии с плечом от 7 до 8 линий для закручивания шелка вокруг его оси подвеса на полный оборот чаще всего требуется приложить силу лишь в одну шестидесятимиллионную грана. Если нить подвеса имеет удвоенную длину, или 6 дюймов, то требуется только одна стодвадцатимиллионная грана. Тогда, подвешивая на этом шелке гори-



ощутимым образом, даже тогда, когда сила, создающая колебания, составляет лишь сотую часть грана. После того как это положение изложено, его нужно применить для определения закона электрического притяжения следующим образом.

Иглу *Ig* [рис. 67] из шеллака подвешивают на шелковой нити *sc* длиной от 7 до 8 дюймов, состоящей из одного волоска, какой вытягивают из кокона. На конце *I* иглы перпендикулярно ей укрепляют маленький кружок диаметром от 8 до 10 линий, очень легкий, вырезанный из кусочка позолоченной бумаги. Шелковая нить привязывается в *s* к нижнему концу маленькой палочки *st*, высушенной в печи и натертой шеллаком или испанским воском. Эта палочка удерживается в *I* с помощью подвижной стойки с зажимом, которая скользит вдоль направляющей *oE* и фиксируется по желанию с помощью винта *V*.

На рисунке *G* — это шар из меди или картона, покрытого оловом, поддерживаемый четырьмя стеклянными опорами, натертыми испанским воском, над каждой из которых для обеспечения лучшей изоляции возвышается палочка из испанского воска от 3 до 4 дюймов длиной. Эти четыре опоры своими нижними концами вставлены в диск, помещенный на небольшую плиту на ползуне, который может, как это видно из рисунка, устанавливаться на высоте, наиболее удобной для опыта. Направляющая *Eo* также может с помощью винта *E* устанавливаться на подходящей высоте.

Когда все готово, шар G устанавливается так, что его горизонтальный диаметр Gr направлен на центр диска I , который удален [от шара] на несколько дюймов. С помощью лейденской банки шару сообщается электрическая искра, к диску подносят проводящее тело, и действие наэлектризованного шара на электрическую жидкость ненаэлектризованного диска сообщает по-

следнему электричество другого рода, чем на шаре: после удаления проводящего тела шар и диск притягивают друг друга.

Эксперимент. Шар G имеет диаметр 1 фут, диск l — 7 линий, игла из шеллака lg имеет длину 15 линий; нить подвеса sc была из шелка, вытягиваемого из кокона, длиной 8 линий. Когда подвижная стойка находилась в o , диск касался шара в r и по мере того, как стойка сдвигалась к E , диск удалялся от центра шара на 0, 3, 6, 9, 12 дюймов и шар наэлектризовывался электричеством, которое называется положительным, диск — отрицательным электричеством. С помощью описанной выше процедуры были получены такие результаты:

Расстояние d от диска до центра шара		15 колебаний происходят за
1-й опыт	9 дюймов	20"
2-й опыт	18 дюймов	40"
3-й опыт	24 дюйма	60"

Объяснение результата этого эксперимента. Когда все точки сферической поверхности действуют с притягивающей или отталкивающей силой, обратно пропорциональной квадрату расстояний, на точку, расположенную на некотором расстоянии от этой поверхности, то, как известно, это действие такое же, как если бы вся сферическая поверхность была сосредоточена в ее центре.

Поскольку в нашем эксперименте диск имел диаметр всего 7 линий, а в этих опытах наименьшее расстояние от него до центра шара составляло 9 дюймов, то без ощутимой ошибки можно считать все линии, которые идут от центра шара к точке диска, параллельными и равными. Следовательно, полное действие диска можно предположить сосредоточенным в его центре, как и действие шара. При малых колебаниях иглы действие, которое заставляет ее колебаться, будет величиной постоянной для данного расстояния и будет осуществляться по направлению, соединяющему два центра. Таким образом, если ϕ — сила, T — время определенного числа колебаний, то получим T пропорциональным $1/\sqrt{\phi}$. Но если d — расстояние от центра шара до центра диска и сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояний или $1/d^2$, то оказывается, что T пропорционально d , или расстоянию. Если, как в наших опытах, менять расстояние, то время одного и того же числа колебаний должно меняться как расстояние от центра диска до центра шара. Сравним эту теорию с экспериментом:

Расстояние между центрами шаров		15 колебаний происходят за
1-й опыт	9 дюймов	20"
2-й опыт	18 дюймов	41"
3-й опыт	24 дюйма	60"

Расстояние здесь меняется как числа 3, 6, 8. Время одного и того же числа колебаний — как 20, 41, 60. Согласно теории, оно должно быть 20, 40, 54.

Таким образом, в этих трех опытах разница между теорией и экспериментом равна $1/10$ для последнего опыта по отношению к первому и почти равна нулю для второго опыта по отношению к первому. Следует отметить, что потребовалось почти 4 мин, чтобы провести три опыта. Хотя в день эксперимента электричество удерживалось достаточно долго, тем не менее оно теряло $1/40$ своего действия в минуту. В Мемуаре, следующем за тем, который я представляю сегодня, мы увидим, что, когда плотность электричества не слишком велика, электрическое действие двух наэлектризованных тел уменьшается за данное время в точности как электрическая плотность или как интенсивность действия. Так как наши опыты длились 4 мин, а электрическое действие уменьшалось на $1/40$ за минуту, то от первого до последнего опыта действие, обусловленное интенсивностью плотности электричества, независимое от расстояния, должно было уменьшиться почти на одну десятую. Следовательно, чтобы получить исправленную длительность пятнадцати колебаний в последнем опыте, надо $(\sqrt{10} : \sqrt{9}) \cdot 60''$, и найденная величина, которая оказывается равной $57''$, отличается лишь на $1/20$ от времени $60''$, определенного в эксперименте.

Таким образом, посредством метода, совершенно отличного от первого, мы пришли к сходному результату. Отсюда мы можем заключить, что взаимное притяжение электрической жидкости, называемой положительною, к электрической жидкости, называемой обыкновенно отрицательною, обратно пропорционально квадрату расстояний. (...)

Комментарий

Перевод с французского отрывков из мемуаров Ш. Кулона выполнен С. Р. Филоновичем. Мемуары опубликованы в издании: *Mémoires de mathématique et de physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers savants*, 1785 (publ. Paris, 1788), p. 569—611.

¹ Речь идет о мемуаре «Теоретические и экспериментальные исследования силы кручения и упругости металлических проволок».

² Шеллак — воскообразное вещество, выделяемое тропическими насекомыми, хороший изолятор.

³ Имеется в виду мемуар Кулона «Исследование относительно наилучшего способа изготовления магнитных стрелок».

Литература

- [1] Собрание сочинений Ш. Кулона: Coulomb S.-A. Collection de mémoires relatifs à la physique. Paris, 1884.
- [2] Gillmor C. S. Coulomb and the evolution of physics and engineering in 18th—century France. Princeton, 1971.
- [3] Филонович С. Р. Шерль Кулон. М., 1988.



Г. Кавендиш

1731—1810

Определение плотности Земли

Установление Ньютоном закона всемирного тяготения явилось важнейшим событием в истории физики. Его значение определяется прежде всего универсальностью гравитационного взаимодействия. На законе всемирного тяготения основывается один из центральных разделов астрономии — небесная механика. Непосредственно для физики значение этого закона определялось тем, что его следствия допускали экспериментальную проверку с точностью, недоступной другим механическим опытам конца XVII—XVIII вв. Дискуссия о точности, с которой выполняется закон всемирного тяготения, шла на протяжении всего XVIII в. В итоге с помощью простого соотношения, установленного Ньютоном, был объяснен ряд своеобразных астрономических явлений (в частности, особенности движения Луны), которые первоначально выдвигались как примеры, опровергающие закон всемирного тяготения.

Однако, несмотря на все успехи небесной механики, на протяжении многих десятилетий использование закона всемирного тяготения затруднялось тем, что не было определено значение гравитационной постоянной G , входящей в закон Ньютона:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

где m_1 и m_2 — массы материальных точек, r — расстояние, а F — сила взаимодействия между ними. Вследствие этого ученые были вынуждены пользоваться в расчетах относительными величинами. К середине XVIII в. назрела необходимость экспериментального определения G . Поскольку нахождение G имело значение главным образом для астрономии, эта задача была сформулирована как определение средней плотности Земли. Очевидно, что при известных значениях плотности ρ и радиуса R Земли, а также ускорения свободного падения g на ее поверхности можно найти G :

$$G = \frac{3g}{4\pi\rho R}.$$

Первым ученым, определившим плотность Земли (а следовательно, и G) с удовлетворительной точностью, был Г. Кавендиш.

Генри Кавендиш родился в Ницце 10 октября 1731 г. Он принадлежал к знатному роду герцогов Девонширских. Его мать умерла вскоре после рождения второго сына, когда Генри было всего два года. Воспитанием детей занимался отец, сэр Чарльз Кавендиш, страстный любитель науки, член Лондонского Королевского общества. После учебы в привилегированной средней школе Кавендиш поступил в Кембриджский университет, который закончил без какой-либо ученой степени.

Получив университетское образование, Кавендиш поселился в доме отца, который привлек его к исследованиям в области физики, химии и метеорологии. В дальнейшем на протяжении всей жизни Кавендиш вел очень замкнутый образ жизни чудака-одиночки. Его общение с внешним миром ограничивалось кругом членов Королевского общества, куда он был принят в 1760 г. Однако его научная активность была исключительно высока. Кавендиш вел интенсивную исследовательскую работу, участвовал в деятельности различных комиссий Королевского общества и почти не пропускал его заседаний. Он пользовался огромным уважением и авторитетом среди коллег по Обществу.

Кавендиш опубликовал 18 научных работ в журнале «Philosophical Transactions», однако гораздо большее число его исследований осталось неопубликованным и неизвестным современникам. Так, блестящие эксперименты Кавендиша по электричеству (он одним из первых ввел эталонную емкость, первым дал удовлетворительное опытное доказательство закона «обратных квадратов» для сил электрического отталкивания, предвосхитил открытия Ома и т. д.), проведенные в домашней лаборатории, стали известны лишь после публикации в 1879 г. его избранных работ, подготовленной Дж. К. Максвеллом.

При жизни Кавендиш был известен главным образом как выдающийся химик. Так, он независимо от Блэка ввел понятие удельной теплоемкости и указал на существование скрытых теплот (тепловые явления относились в XVIII в. к химии). В 60—70-е годы Кавендиш становится одним из ведущих исследователей в области «пневмохимии», занимавшейся исследованием газов. Он, в частности, получил убедительные свидетельства сложного состава воздуха, независимо от Д. Резерфорда открыл азот, выделил водород и определил его плотность, доказал, что при реакции кислорода и водорода образуется вода.

На протяжении многих лет Кавендиш занимался также математикой, механикой, минералогией и астрономией. Он вел научные исследования практически до конца жизни. Кавендиш умер 24 февраля 1810 г.

Образцом экспериментального искусства Кавендиша стал цикл опытов по определению средней плотности Земли. Идея опыта принадлежала Дж. Мичеллу, с которым Кавендиш многие годы вел переписку по вопросам астрофизики и который стремился решить задачу «взвешивания» (т. е. определения массы) звезд. Смерть Мичелла (1793) помешала реализации его идеи.

соответствующие эксперименты были проведены Кавендишем на усовершенствованной установке лишь в 1798 г.

Оригинальность схемы Мичелла—Кавендиша состояла в том, что средняя плотность Земли определялась в лабораторных условиях по наблюдениям взаимодействия сравнительно небольших масс. До этого все оценки средней плотности Земли базировались на измерениях отклонения отвеса от вертикали под действием расположенной поблизости горы. Наиболее известным в конце XVIII в. был результат $\rho = 4,71 \text{ г/см}^3$, полученный из наблюдений английского астронома Н. Маскелайна, выполненных вблизи горы Шихаллиен (1774). Этот результат существенно меньше истинного ($\rho = 5,53 \text{ г/см}^3$). Его сравнение со значением, полученным Кавендишем, $\rho = 5,48 \text{ г/см}^3$, показывает, в какой степени последнему удалось повысить точность определения ρ^* . Отметим, что использование данных Кавендиша дает для гравитационной постоянной значение $G = 6,71 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$ (современное значение $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$).

Опыты по определению плотности Земли

Много лет назад покойный преподобный Джон Мичелл, член этого общества¹, придумал метод определения плотности Земли с помощью притяжения малых количеств вещества; но так как он был занят другими предприятиями, то закончил прибор лишь незадолго до смерти и не успел провести с ним какие-либо опыты. После его смерти прибор перешел к преподобному Френсису Джону Хайду Волластону, Джексоуианскому профессору в Кембридже, который, не имея условий для проведения экспериментов с помощью этого прибора в таком виде, как ему хотелось, был настолько добр, что передал его мне.

Прибор очень прост; он состоит из деревянного коромысла 6 футов длиной, сделанного так, чтобы соединять в себе большую прочность с малым весом. Это коромысло подвешено в горизонтальном положении посредством тонкой проволоки длиной 40 дюймов и на каждом из его концов висит по свинцовому шару диаметром около 2 дюймов; все это помещается в узкий деревянный кожух для защиты от ветра.

Поскольку для того, чтобы заставить это коромысло поворачиваться вокруг его центра, необходима сила не большая, чем та, которая требуется для закручивания подвеса, ясно, что если проволока достаточно тонка, то достаточно малейшей силы, такой,

* Это значение приведено в работе Кавендиша. В 1842 г. Ф. Бейли указал на арифметическую ошибку, допущенную Кавендишем при выводе среднего значения ρ . С учетом поправки Бейли величина ρ , определенная по данным Кавендиша, оказывается равной $\rho = 5,45 \text{ г/см}^3$.

как притяжение свинцового груза диаметром в несколько дюймов, чтобы заметно отклонить коромысло. Грузы, которые соби-
рался использовать м-р Мичелл, были диаметром 8 дюймов. Один из них должен был помещаться с одной стороны кожуха, напротив одного шарика, так близко к нему, как только можно, а другой — с другой стороны, против другого шарика так, чтобы притяжения со стороны обоих грузов соединялись для отклонения коромысла. Когда его отклонение под воздействием этих грузов устанавливалось, грузы должны были перемещаться по другую сторону кожуха и положение коромысла должно было определяться снова. Следовательно, половина разности этих положений должна показать, насколько коромысло было отклонено притяжением грузов.

Чтобы определить отсюда плотность Земли, необходимо установить, какая требуется сила для отклонения коромысла на данное расстояние. Сделать это м-р Мичелл собирался путем приведения коромысла в движение и наблюдения времени его колебаний, откуда сила может быть легко рассчитана* $\langle \dots \rangle^2$.

На рис. 68 показано продольное вертикальное сечение прибора и помещения, в котором он расположен. *ABCDDCBAEFFE* — это кожух; *x* и *x* — два шарика, свешивающихся на нитях *hx* с коромысла *ghmh*, которое само подвешено с помощью тонкой проволоки *gl*. Это коромысло состоит из тонкого соснового стержня *hmh*, усиленного серебряной проволокой *hgh*. Благодаря этому он делался достаточно прочным для удержания шариков, хотя и оставался очень легким¹.

Кожух поддерживается и устанавливается горизонтально посредством четырех винтов, опирающихся на столбы, жестко врытые в землю. Два из них *S* и *S* представлены на рисунке, а два другие не показаны во избежание путаницы. *GG* и *GG* — края стен помещения. *W* и *W* — свинцовые грузы, которые подвешены на медных стержнях *RrPrR* и деревянном бруске *rr* с осевой шпилькой *Pp*. Эта шпилька проходит над центром прибора через отверстие в бруске *HH* перпендикулярно бруску и поворачивается внутри этого отверстия, удерживаясь от падения пластиной *p*. *MM* представляет собой блок, прикрепленный к этой шпильке, а *Mm* — нить, накрученную на блок и проходящую через край стены; с ее помощью наблюдатель может поворачивать блок и таким образом передвигать грузы из одного положения в другое.

На рис. 69 приведен вид прибора сверху: *AAAA* — кожух. *SSSS* — четыре поддерживающие его винта, *HH* — коромысло и шарик, *W* и *W* — грузы, *MM* — блок для их передвижения. Когда грузы находятся в таком положении, то оба стремятся отклонить коромысло в направлении *hW*; когда же они передви-

* М-р Кулон во множестве случаев уже использовал приспособление такого рода для изучения слабых притяжений. М-р Мичелл сообщил мне о своем намерении провести этот эксперимент и о методе, который он собирался применить. ¹ до публикации каких-либо экспериментов м-ра Кулона.

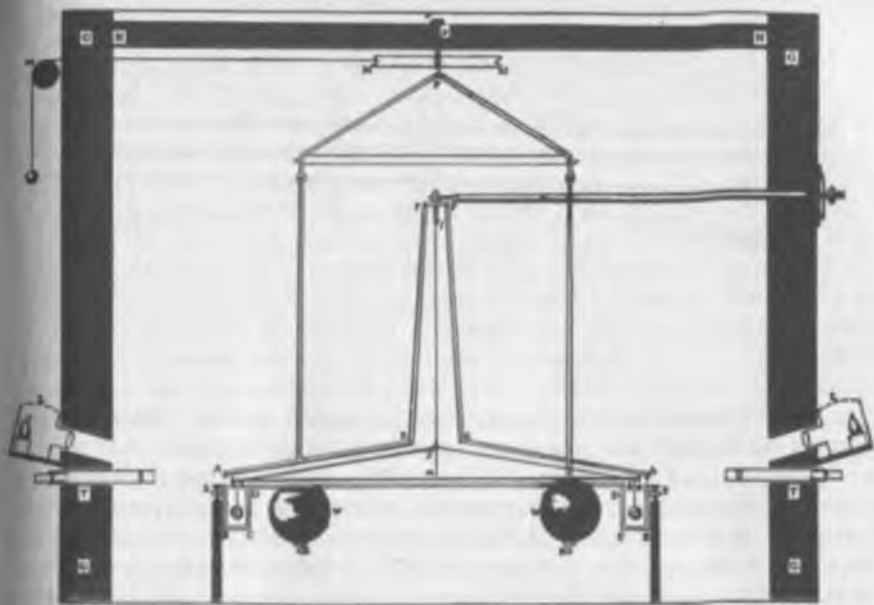


Рис. 66

гаются в положения ψ и ψ , представленные точечными линиями, то оба стремятся отклонить коромысло в противоположном направлении $h\psi$. От ударов о кожух эти грузы предохраняют кусочки дерева, останавливающие их, как только они приближаются на расстояние $\frac{1}{5}$ дюйма к кожуху. Кусочки дерева прикреплены к стене здания; и я обнаружил, что грузы могут ударяться о них со значительной силой без ощутимого сотрясения прибора.

Чтобы определить положение коромысла, внутри кожуха расположены пластинки из слоновой кости настолько близко к каждому из концов коромысла, насколько это возможно без опасения коснуться его; пластинки разделены на двадцатые доли дюйма. Другие маленькие пластинки из слоновой кости помещены на каждом конце коромысла и служат верньером, подразделяя эти деления на пять частей, так что положение коромысла может легко наблюдаться с точностью до одной сотой дюйма и оцениваться с еще большей точностью. Эти деления рассматриваются с помощью коротких телескопов T и T [рис. 68] через щели, прорезанные на концах кожуха и закрытые стеклами. Они освещаются лампами L и L с выпуклыми стеклами, расположенными так, чтобы отбрасывать свет на деления. Никакой другой свет в комнату не пропускался.

Деления на пластинке из слоновой кости идут в направлении $\psi\psi$ [рис. 69], так что, когда грузы помещались в позицию ψ и ψ , представленную точечными кружками, коромысло отклонялось в таком направлении, что указатель должен был отмечать

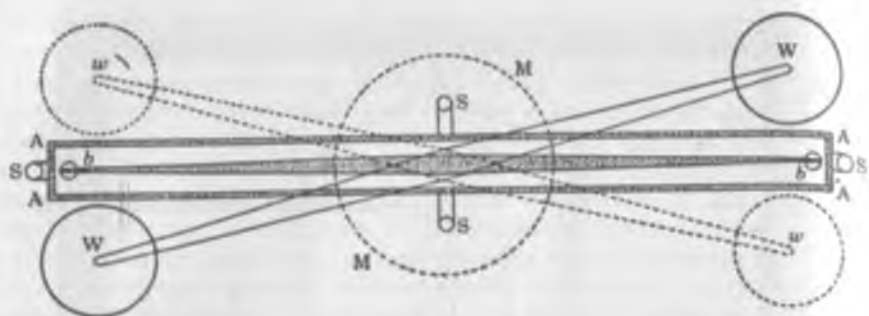


Рис. 69

большие числа на пластинках из слоновой кости. По этой причине я называю эту позицию грузов положительной.

Деревянный стержень *FK* [рис. 68] посредством бесконечного винта поворачивает держатель, к которому прикреплен проводок *gl*, что позволяет наблюдателю закручивать провод до тех пор, пока коромысло не установится в центре кожуха, без опасения коснуться какой-либо из его стенок. Проволока *gl* наверху прикреплена к держателю, а внизу — к центру коромысла с помощью латунных зажимов, в которых она удерживается винтами.

На этих двух рисунках различные части изображены почти в естественной пропорции по отношению друг к другу и в масштабе один к тридцати.

Прежде чем я перейду к описанию экспериментов, следует кое-что сказать о способе наблюдений. Предположим, что коромысло покоится и его положение определено. Пусть затем грузы сдвигаются. Вследствие этого коромысло не только сдвинется, но будет вынуждено колебаться и его колебания будут продолжаться довольно долго. Поэтому, чтобы выяснить, насколько сдвинуто коромысло, необходимо найти крайние точки колебания и отсюда определить точку, в которой оно оказалось бы в покое, если бы его движение было уничтожено, или точку покоя, как я буду ее впредь называть. Для этого я наблюдал три последовательные крайние точки колебания и брал среднее между первой и третьей точками, а затем принимал среднее между ней и второй крайней точкой за точку покоя. Так как колебания непрерывно уменьшались, очевидно, что среднее между двумя крайними точками не могло дать истинную точку покоя.

Можно подумать, что более точно было бы наблюдать много крайних точек колебания, чтобы находить точку покоя по разным сериям из трех крайних отклонений и брать средний результат. Однако надо отметить, что, несмотря на предосторожности, соблюдавшиеся во избежание какой-либо возмущающей силы, коромысло редко будет оставаться в покое в течение целого часа. По этой причине лучше определять точку покоя из наблюдений

выполненных, насколько это возможно, сразу же после передвижения грузов.

Вторая величина, которую надо определить, — это время колебания. Ее я нахожу следующим образом: определяю две крайние точки колебания, а также моменты времени, в которые коромысло достигает двух данных делений между этими крайними точками, заботясь о том, насколько я мог предвидеть, чтобы эти деления располагались по разные стороны от средней точки и не очень далеко от нее. Затем я рассчитываю среднюю точку колебания и с помощью пропорции нахожу момент времени, в который коромысло проходит через среднюю точку. Затем после нескольких колебаний я повторяю эту операцию и делю интервал времени между приходом коромысла в эти две средние точки на число колебаний, что дает время одного колебания. Следующий пример более отчетливо пояснит сказанное.

Первая колонка содержит крайние точки колебаний, вторая — промежуточные деления, третья указывает время, когда коромысло проходит эти деления, четвертая дает точку покоя, которая находится таким образом: среднее между первой и третьей крайними точками равно 27,1, и среднее между ним и второй крайней точкой равно 24,6, что соответствует точке покоя, найденной по первым трем крайним смещениям. Аналогично найденная по второму, третьему и четвертому крайним смещениям точка покоя равна 24,7 и т. д. В пятой колонке указано время, когда коромысло проходило среднюю точку колебания, которое находится так: среднее между 27,2 и 22,1 равно 24,65, и это есть средняя точка первого колебания. Поскольку коромысло проходит деление 25 в $10^h 23' 4''$, а деление 24 — в $10^h 23' 57''$, то с помощью пропорции мы находим, что деление 24,65 оно проходит в $10^h 23' 23''$. Аналогично, коромысло проходит среднюю точку седьмого колебания в $11^h 5' 22''$, и поэтому шесть колебаний совершается за $41' 59''$, или одно колебание за $7' 0''^3$ (...)

Время одного колебания может быть определено либо из предварительных испытаний, либо это можно делать в каждом

Крайние точки	Деление	Время, ч. мин. с	Точка покоя	Время середины колебания, ч. мин. с
27,2	25	10 23 4	—	10 23 23
	24	57	—	
22,1	—	—	24,6	
27	—	—	24,7	
22,6	—	—	24,75	
26,8	—	—	24,8	
23	—	—	24,85	
26,6	—	—	24,9	
	25	11 5 22	—	11 5 22
	24	6 48	—	
23,4				

эксперименте, определяя время колебаний коромысла, которые реально возникают вследствие передвижения грузов. Однако у последнего метода есть одно преимущество, а именно: если бы имелась какая-то случайная причина притяжения (как, например, электричество на стеклянных пластинках, через которые наблюдается движение коромысла), увеличивающая силу, необходимую для отклонения коромысла, то она уменьшила бы также и время колебания. Следовательно, ошибка в результате должна быть значительно меньше, когда сила, необходимая для отклонения коромысла, выведена из опыта, проведенного в то же время, чем когда она определяется из предшествующих опытов.

Описание опытов. В моем первом опыте проволока, на которой подвешивалось коромысло, была из посеребренной меди длиной $39\frac{1}{4}$ дюйма; один фут ее весил $2\frac{2}{5}$ грана. Ее жесткость была такой, что заставляла коромысло совершать одно колебание примерно за 15 мин. Вообще-то я сразу же обнаружил, что она недостаточно жесткая, поскольку притяжение грузов слишком сильно отклоняло шарики, так что заставляло их касаться стенок кожуха; тем не менее, прежде чем ее заменить, я решил провести несколько опытов.

В этом эксперименте стержни, с помощью которых подвешивались свинцовые грузы, были сделаны из железа. Так как я позаботился, чтобы в коромысле не было ничего магнитного, то, казалось бы, не имело никакого значения, были ли стержни магнитными или нет. Однако для большей безопасности я снял свинцовые грузы и испытал, какой эффект создадут стержни сами по себе. В это время путем расчета я нашел, что гравитационное притяжение шариков к этим стержням относится к притяжению грузов примерно как 17 к 2500. Поскольку, как показали последующие испытания, притяжение грузов оказалось достаточным, чтобы отклонить коромысло примерно на 15 делений, притяжение одних стержней должно отклонять его приблизительно на $\frac{1}{10}$ деления, и поэтому перемещение стержней из одной крайней позиции в другую должно сдвигать его примерно на $\frac{1}{5}$ деления.

Результат опыта состоял в том, что в течение первых 15 мин после перемещения стержней из одной крайней позиции в другую коромыслу было сообщено очень слабое движение, вряд ли большее, чем то, что должно сообщаться действием гравитационного притяжения. Однако затем движение усилилось, так что оказалось, что за следующие четверть часа или полчаса оно сдвинулось на $\frac{1}{2}$ или $1\frac{1}{2}$ деления в том же направлении, в каком это должно происходить под действием тяготения. При возвращении железных деталей обратно в их исходное положение коромысло сдвигалось назад так же, как ранее двигалось вперед.

Следует отметить, что в этих экспериментах движение коромысла вряд ли было сильнее, чем движение, которое иногда имеет место без видимых причин. Тем не менее так как в трех опытах, проделанных с этими стержнями, движение было всегда

одного и того же рода, хотя и различалось по величине от $1/2$ до $1 1/2$ деления, то представляется, что имеется веское основание считать, что оно создается действием стержней.

Поскольку мне казалось, что этот эффект обязан магнетизму, хотя он и не был таким, какой я ожидал от этой причины, я заменил железные стержни на медные и также испытал их. Результат оказался таким, что все-таки наблюдался некоторый эффект того же рода, но более случайный, так что я отнес его к некой случайной причине и поэтому подвесил свинцовые грузы и продолжил эксперименты.

Следует отметить, что эффект, который, казалось, создает перемещение железных стержней из одной крайней позиции в другую, составлял в среднем не более одного деления. В то же время эффект, создаваемый движением грузов из средней в крайнюю позицию, был около 15 делений. Таким образом, если бы я продолжал пользоваться железными стержнями, то порожденная этим ошибка в результате вряд ли могла превосходить $1/30$ целого.

Опыт I. 5 августа
Грузы в средней позиции

Крайние точки	Деления	Время, ч. мин. с	Точка покоя	Время середины колебания, ч. мин. с	Разность, мин. с
	11,4	9 42 0			
	11,5	55 0			
	11,5	10 5 0	11,5		

В 10 ч 5 мин грузы передвинуты в положительную позицию

11,4	—	—	25,82	
27,6	—	—	26,07	
24,7	—	—	26,1	
27,3	—	—		
25,1	—	—		

В 11 ч 6 мин грузы возвращены в среднюю позицию

	11	0 0 48	—	0 1 13	
	12	1 30	—		
18,2	—	—	12	—	14 56
	12	16 29	—	16 9	
	11	17 20	—		
6,6	—	—	11,92	—	14 36
	11	30 24	—	30 45	
	12	31 11	—		
16,3	—	—	11,72	—	15 13
	12	45 58	—	45 58	
	11	47 4	—		

Смещение коромысла при сдвиге грузов из средней в положительную позицию 14,32
из положительной в среднюю позицию 14,1
Время одного колебания 14 55

Необходимо отметить, что в этом опыте притяжение грузов отклоняло коромысло с деления 11,5 до деления 25,8, так что если бы не было предпринято никаких мер, то импульс, приобретенный при этом, перенес бы коромысло к делению 40 и поэтому заставил бы шарики удариться о кожух. Чтобы предотвратить этот удар, после того как коромысло приближалось к делению 15, я возвращал грузы в среднюю позицию и оставлял их там до того момента, когда коромысло подходило близко к крайней точке своего колебания, и тогда снова сдвигал грузы в положительную позицию. Тогда колебания оказывались настолько ослабленными, что шарики не касались стенок. Именно эта причина мешала мне наблюдать первую крайнюю точку колебания. Аналогичный метод использовался и тогда, когда грузы возвращались в среднюю позицию, а также в двух следующих экспериментах.

Колебания [возникавшие] при перемещении грузов из средней в положительную позицию были столь малы, что в это время казалось нецелесообразным определять время колебания. Когда грузы возвращались в среднее положение, я определял моменты времени прихода коромысла в среднюю позицию каждого колебания с целью убедиться, насколько близко времена различных колебаний согласуются между собой. В большей части следующих опытов я удовлетворялся наблюдением времени прихода коромысла в среднюю точку лишь для первого и последнего колебаний. (...)

О методе расчета плотности Земли из этих экспериментов. Сначала я рассмотрю задачу в предположении, что медные стержни невесомы и что груз оказывает ощутимое притяжение

Опыт II. 6 августа
Грузы находятся в средней позиции

Крайние точки	Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с
	11	10 4 0			
	11	11 0			
	11	17 0			
	11	25 0			
Грузы передвинуты в положительную позицию					
29,3					
24,1	—	—	26,87		
30	—	—	27,57		
26,2	—	—	28,02		
29,7	—	—	28,12		
26,9	—	—	28,05		
28,7	—	—	27,85		
27,1	—	—	27,82		
28,4					

Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с

Грузы возвращены в среднюю позицию

12	1 3 50	—	1 4 1	
13	4 34			
—	—	12,37	—	14 52
13	18 29	—	18 53	
12	19 18			
—	—	11,67	—	14 16
11	33 48	—	33 39	
12	34 51			
—	—	11	—	13 46
13	45 8	—	47 25	
12	46 22			
—	—	10,75	—	15 25
11	2 3 48			
12	5 18	—	2 2 50	

<i>Смещение коромысла при сдвиге грузов из средней в положительную позицию</i>	<i>15,87</i>
<i>из положительной в среднюю позицию</i>	<i>15,45</i>
<i>Время одного колебания</i>	<i>14 42</i>

Опыт III. 7 августа

находятся в положительной позиции, и коромысло слегка движется

Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с

—	—	30,12		
—	—	30,02		
—	—			

Грузы передвинуты в среднюю позицию

14	10 34 18	—	10 34 55	
15	35 8			
—	—	14,8	—	14 44
15	49 31	—	49 39	
14	50 27			
—	—	14,07	—	14 38
14	11 5 7	—	11 4 17	
15	6 18			
—	—	13,52	—	14 47
14	11 18 46	—	11 19 4	
13	19 58			
—	—	13,3	—	14 27
13	33 46	—	33 31	
14	35 26			

Крайние точки	Деления	Время, ч, мин, с	Точка покоя	Время середины колебания, ч, мин, с	Разность, мин, с
<i>Грузы сдвинуты в положительную позицию</i>					
32	28	0 2 48	—	0 2 29	
	27	3 56			
23,7	—	—	27,8		
31,8	—	—	28,27		
25,8	—	—	28,62		
	27	44 58	—	47 40	
	28	46 50			
31,1					
<i>Смещение коромысла при сдвиге грузов из положительной в среднюю позицию</i>					
					15,22
<i>из средней в положительную позицию</i>					14,5
<i>Время одного колебания при грузах</i>					
<i>в средней позиции</i>					14 39
<i>в положительной позиции</i>					14 54

лишь на ближайший шарик; затем я исследую, какие исправления необходимы для учета [массы] коромысла и стержней и некоторых других малых факторов.

Первая задача состоит в том, чтобы найти силу, которая требуется для отклонения коромысла, что, как было сказано выше, должно быть определено по времени одного колебания.

Расстояние между центрами двух шариков равно 73,3 дюйма, и поэтому расстояние каждого из них от центра движения составляет 36,65 дюйма, длина же секундного маятника в этих широтах равна 39,14 [дюйма]. Поэтому если жесткость проволоки, на которой подвешено коромысло, такова, что сила, которая должна быть приложена к каждому шарiku для отклонения коромысла на угол A , так относится к весу шариков, как дуга A к радиусу, то коромысло будет совершать колебание за то же время, что и маятник, длина которого 36,65 дюйма, т. е. за

$\sqrt{\frac{36,65}{39,14}}$ секунд. И поэтому если жесткость проволоки такова,

что порождает одно колебание за N секунд, то сила, которую необходимо приложить к каждому из шариков для отклонения коромысла на угол A , так относится к весу шариков, как дуга

$A \frac{1}{N^2} \frac{36,65}{39,14}$ относится к радиусу. Но шкала из слоновой кости на

конце коромысла находится на расстоянии 38,3 дюйма от центра движения, и каждое деление равно $\frac{1}{20}$ дюйма, поэтому оно стя-

гивает центральный угол, дуга которого равна $1/766$, а значит, сила, которая должна быть приложена к каждому шарiku для

отклонения коромысла на одно деление, относится к весу шарика, как $\frac{1}{766N^2} \cdot \frac{36,65}{39,14}$ к 1 или как $\frac{1}{818N^2}$ к 1.

Следующая задача состоит в нахождении отношения, которое притяжение шариков грузами образует с их притяжением к Земле, в предположении, что шарики расположены в середине кожуха, т. е. не ближе к одной из его стенок, чем к другой. Когда грузы приближаются к шарикам, их центры находятся на расстоянии 8,85 дюйма от осевой линии кожуха. Однако по небрежности расстояние между стержнями, удерживающими эти грузы, было сделано равным расстоянию между центрами шариков, в то время как оно должно быть несколько больше последнего. Вследствие этого центры грузов не становятся в точности против центров шариков при сближении с ними. Действие грузов при отклонении коромысла оказывается меньше, чем оно должно быть в противном случае, в утроенном отношении $\frac{8,85}{36,65}$ к хорде

угла, синус которого равен $\frac{8,85}{36,65}$, или в утроенном отношении косинуса $1/2$ этого угла к единице, или в отношении 0,9779 к 1.

Каждый из грузов весит 2 439 000 гранов, и поэтому он равен по весу 10,64 сферического фута воды. Отсюда создаваемое им притяжение частицы, помещенной в центр шарика, так относится к притяжению сферического фута воды, действующего на равную частицу, помещенную на его поверхности, как $10,64 \cdot 0,9779 \times \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$ к 1.

Средний диаметр Земли равен 41 800 000 футов*, и поэтому, если средняя плотность Земли так относится к плотности воды, как D к 1, то притяжение шарика к свинцовому грузу будет относиться к его притяжению к Земле, как $10,64 \cdot 0,9779 \times \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$ к $41\,800\,000 D$, или 1 к 8 739 000.

Таким образом показано, что сила, которую необходимо приложить к каждому из шариков, чтобы отклонить коромысло на одно деление от его естественного положения, составляет $\frac{1}{818N^2}$ веса шарика. Если средняя плотность Земли относится к плотности воды как D к 1, то притяжение шарика грузом равно $\frac{1}{8\,739\,000 D}$ веса этого шарика, и поэтому данное притяжение сможет отклонить коромысло от его естественного положения на $\frac{818 N^2}{8\,739\,000 D}$ или $\frac{N^2}{10\,683 D}$ делений. Следовательно, если окажется, что при передвижении грузов из средней в крайнюю позицию

* Строго говоря, мы должны были бы вместо среднего диаметра Земли взять диаметр сферы, притяжение которой равно силе тяжести в этих широтах; однако это отличие учитывать не стоит.

коромысло сдвинулось на B делений, или если оно сдвигается на $2B$ делений при перемещении грузов из одной крайней позиции в другую, то плотность D Земли равна $\frac{N^2}{10\,683\,B}$.

Теперь мы должны рассмотреть поправки, которые необходимо внести в этот результат, учитывающие: 1) влияние, которое сопротивление движению коромысла оказывает на время колебания; 2) притяжение коромысла к грузам; 3) их притяжение дальнего шарика; 4) притяжение шариков и коромысла к медным стержням; 5) притяжение, действующее на шарики и коромысло со стороны кожуха; 6) изменение притяжения шариков к грузам в зависимости от положения коромысла и влияние, которое оно имеет на время колебания. Вообще говоря, ни одна из этих поправок, исключая последнюю, не имеет большого значения, но ими нельзя полностью пренебречь⁵. <...>

Вывод. Нижеприведенная таблица содержит результаты опытов.

Из этой таблицы следует, что хотя эксперименты достаточно хорошо согласуются между собой, все же различие между ними как в смещении коромысла, так и во времени колебания больше,

Опыт	Сдвиг грузов	Смещение коромысла	То же с поправкой	Время колебания, мин, с	То же с поправкой	Плотность
1	из ср. в +	14,32	13,42			5,5
	из + в ср.	14,1	13,17	14 55	—	5,61
2	из ср. в +	15,87	14,69	—	—	4,88
	из + в ср.	15,45	14,14	14 42	—	5,07
3	из + в ср.	15,22	13,56	14 39	—	5,26
	из ср. в +	14,5	13,28	14 54	—	5,55
4	из ср. в +	3,1	2,95	—	6 54	5,36
	из + в —	6,18	—	7 1	—	5,29
	из — в +	5,92	—	7 3	—	5,58
5	из + в —	5,9	—	7 5	—	5,65
	из — в +	5,98	—	7 5	—	5,57
	из ср. в —	3,03	2,9	—	—	5,53
6	из — в +	5,9	5,71	—	—	5,62
7	из ср. в —	3,15	3,03	7 4	—	5,29
	из — в +	6,1	5,9	среднее	6 57	5,44
8	из ср. в —	3,13	3,00	—	—	5,34
	из — в +	5,72	5,54	—	—	5,79
9	из + в —	6,32	—	6 58	—	5,1
10	из + в —	6,15	—	6 59	—	5,27
11	из + в —	6,07	—	7 1	—	5,39
12	из — в +	6,09	—	7 3	—	5,42
	из — в +	6,12	—	7 6	—	5,47
13	из + в 2	5,97	—	7 7	—	5,63
	из — в +	6,27	—	7 6	—	5,34
14	из + в —	6,13	—	7 6	—	5,46
15	из — в +	6,34	—	7 7	—	5,3
16	из — в +	6,1	—	7 16	—	5,75
	из — в +	5,78	—	7 2	—	5,68
17	из + в —	5,64	—	7 3	—	5,85

чем это может следовать из одних только ошибок наблюдений. Что касается различий в смещениях коромысла, то его можно легко отнести за счет тока воздуха, создаваемого разностью температур; однако сомнительно, что этим можно объяснить различие во времени колебания. Я не думаю, чтобы ток воздуха был постоянным и одинаковым по быстроте во всех фазах колебания шарика; но поскольку весьма вероятно, что в токе имелаась большая нерегулярность, что очень возможно, то этого достаточно для объяснения указанных различий.

Согласно среднему результату опытов, проведенных с первой из использованных проволок, плотность Земли оказывается в 5,48 раза больше плотности воды. Согласно среднему результату опытов, проведенных со второй проволокой, она оказывается такой же. Наибольшая разность результатов 23 наблюдений, выполненных с этой проволокой, равна всего лишь 0,75; так что крайние результаты отличаются от среднего значения не больше чем на 0,38 или на 1/14 целого. Следовательно, плотность должна считаться определенной с большой точностью. Вообще, можно возразить, что, поскольку результат оказывается зависящим от тока воздуха или какой-то другой причины, с законом которой мы недостаточно хорошо знакомы, эта причина может действовать всегда или, как правило, в одном направлении и поэтому может вносить значительную ошибку в результат. Тем не менее, поскольку эксперименты проводились в разную погоду при большом разнообразии в разности температур грузов и воздуха и при различных расстояниях покоящегося коромысла от стенок кожуха, маловероятно, чтобы эта причина действовала столь постоянно в одном направлении, чтобы сделать ошибку в среднем результате почти равной разности между средним и крайним. Поэтому маловероятно, чтобы плотность Земли отличалась от 5,48 так сильно, как на 1/14 этой величины.

Относительно этих опытов может быть сделано и другое возражение, а именно: неясно, следует ли сила тяготения на этих малых расстояниях в точности тому же закону, что и на больших расстояниях. Однако нет никаких причин думать, что какая-то нерегулярность этого рода имеет место до тех пор, пока тела не подвергаются действию, которое называется притяжением сцепления и которое, по-видимому, распространяется лишь на очень малые расстояния. Чтобы посмотреть, может ли это притяжение влиять на результат, я проделал эксперименты 9, 10, 11 и 15, в которых шарики были вынуждены оставаться так близко к стенкам кожуха, как только было возможно. Между результатами, полученными в этих условиях и тогда, когда шарики помещались в любой другой части кожуха, не было различий, зависящих от данных условий.

Согласно экспериментам по измерению притяжения горы Шихаллиен, выполненным д-ром Маскелайном, плотность Земли составляет $4\frac{1}{2}$ плотности воды, что отличается от вышеописанного определения значительно сильнее, чем я мог ожидать. Од-

нако я опасаясь входить в рассуждения, какому определению следует больше доверять, пока я не выясню более тщательно, насколько описанное выше определение подвержено влиянию нерегулярностей, величину которых я не могу измерить.

Комментарий

Сокращенный перевод с английского работы Г. Кавендиша выполнен С. Р. Филоновичем по изданию The Scientific Researches of the Honourable Henry Cavendish, F. R. S. Cambridge, 1921, Vol. 2, p. 249—286.

- ¹ Речь идет о Лондонском Королевском обществе. Работа Кавендиша была доложена на заседании этого Общества и впервые опубликована в его трудах — журнале «Philosophical Transactions».
 - ² Далее Кавендиш поясняет, что прибор Мичелла по ряду причин не удовлетворял его, и поэтому установка для проведения опытов была изготовлена практически заново. Ниже следует описание конструкции прибора Кавендиша.
 - ³ Здесь и далее (в описании экспериментов) выпущены отрывки, в которых излагаются результаты контрольных опытов, поставленных с целью выявления возможных источников погрешностей.
 - ⁴ Всего Кавендиш провел 17 серий экспериментов; большая часть таблиц, содержащих соответствующие результаты, опущена.
- Далее Кавендиш подробно рассматривает величины этих поправок. Приведенные в таблице результаты для плотности Земли даны с учетом указанных поправок.

Литература

- [1] Собрание работ Г. Кавендиша: The Scientific Researches of the Honourable Henry Cavendish, F. R. S. Cambridge, 1921. Vol. 1. The Electrical Researches; vol. 2 Chemical and Dynamical.
- [2] Berry A. J. Henry Cavendish: his life and scientific work. London, 1960.
- [3] Саритов М. У. Постоянная тяготения и масса Земли. М., 1969.
- [4] Филонович С. Р. Генри Кавендиш. /Кавент. 1981. № 10 С. 17—22.



В. Гершель

1738—1822

Об инфракрасном излучении

В современной физике к оптическому диапазону шкалы электромагнитных волн относят инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения. Причина объединения разных видов излучения в одном диапазоне состоит в общности ряда их свойств. Процесс осознания этой общности составляет важную страницу в истории физики. Вследствие относительной простоты экспериментирования с инфракрасными лучами этот вид излучения практически сразу же после его открытия стал предметом многочисленных исследований. Обнаружение сходства многих явлений, характерных для видимого и теплового излучений, сыграло важную роль в установлении связи оптики с другими разделами физики. Инфракрасное излучение было открыто в 1800 г. В. Гершелем, к тому времени уже снискавшим славу выдающегося астронома.

Вильям (Фридрих Вильгельм) Гершель родился в Ганновере (Германия) 15 ноября 1738 г. в семье военного музыканта. Поначалу юноша пошел по стопам отца, став гобоистом в оркестре. В 1757 г. он переехал в Англию, которая стала его второй родиной. В первые годы жизни в Англии Гершель добывал средства к существованию уроками музыки и исполнительской деятельностью. Свой досуг он посвящал изучению иностранных языков и чтению. Увлечение теорией музыкальной гармонии привело его к занятиям математикой, затем он обратился к оптике, от нее перешел к астрономии. С 1773 г., когда мастер-самоучка впервые самостоятельно изготовил зеркало для телескопа-рефлектора, начинается многолетняя плодотворная научная работа Гершеля, результаты которой сделали его одним из ведущих астрономов-наблюдателей своего времени. За заслуги перед наукой Гершель был избран членом Лондонского Королевского общества, а затем и членом ряда других научных организаций (в том числе с 1789 г. он был почетным членом Петербургской АН). В 1782 г. король Георг III назначил Гершеля королевским астрономом, что позволило ученому сосредоточить все силы на научных исследованиях. Достижениям Гершеля во многом способствовала помощь, которую оказывала ему сестра Каролина — одна из первых женщин-астрономов.

Увлечение астрономией в семье Гершеля стало наследственным — его сын Джон стал астрономом с мировым именем. Умер В. Гершель 25 августа 1822 г.

Успех наблюдательной деятельности Гершеля связан прежде всего с высоким качеством изготавливавшихся им самим телескопов. Его инструменты по своим размерам и разрешающей силе превосходили все другие телескопы той эпохи (крупнейший 40-футовый телескоп-рефлектор Гершеля имел диаметр зеркала 48 дюймов). Даже неполное перечисление достижений Гершеля в астрономии показывает, насколько велик его вклад в эту науку: открытие Урана (1781), двух спутников Сатурна (1789), измерение периода вращения Сатурна и его колец (1790), открытие более 2500 туманностей и звездных скоплений, в том числе 182 двойных и кратных туманностей, и т. д. При исследовании собственных движений звезд ученый обнаружил движение Солнечной системы в пространстве. Гершель способствовал и развитию методологии астрономии. Так, он использовал специальный «метод черпков» (т. е. подсчет звезд в избранных площадках небесной сферы), позволивший ему очертить форму Галактики и оценить ее размеры. В итоге им был сделан правильный вывод об изолированности нашей Галактики во Вселенной. Значительный интерес представляет и концепция Гершеля об эволюции космической материи, составной частью которой является небулярная звездно-космогоническая гипотеза сгущения звезд и их скоплений из диффузной материи.

На фоне почти непрерывного потока астрономических открытий Гершеля его основное достижение в физике — открытие инфракрасного излучения — может показаться случайным. Это, однако, не так. Занимаясь исследованием Солнца, Гершель искал способ уменьшения нагрева инструмента, с помощью которого велись наблюдения. Для этого он решил определить, различаются ли в смысле нагрева действия различных частей видимого спектра. Для этого ученый получал на поверхности стола призматический спектр и помещал в различные его части один из двух идентичных по чувствительности термометров, в то время как второй оставался неосвещенным и служил в качестве контрольного. Регистрируя увеличение показаний освещенного термометра, Гершель обнаружил, что «максимум тепла» лежит, вероятно, за насыщенным красным цветом и, возможно, «за видимым преломлением». Вслед за этим наблюдением, о котором Гершель сообщил Лондонскому Королевскому обществу¹, он провел подробное исследование распределения лучистой энергии в спектре, создаваемом призмой. Это исследование и положило начало изучению инфракрасного излучения. Ниже приводится текст этой статьи Гершеля. После нее он опубликовал еще одну работу², посвященную сравнению свойств этого вида излучения со свойствами видимого света. Гершель пришел к выводу о близости эффектов, производимых невидимым инфракрасным излучением и светом, и высказал гипотезу о единстве природы двух видов

излучения. Дальнейшие эксперименты с инфракрасными лучами, проведенные в первой половине XIX в. Л. Нобили, М. Меллони, Дж. Форбсом и другими учеными, полностью подтвердили гипотезу Гершеля, а теория электромагнитного поля Максвелла дала этой гипотезе теоретическое обоснование.

Опыты по преломляемости невидимых солнечных лучей

В той части моей предыдущей работы, где трактуется о лучистой теплоте, был сделан намек, хотя и на основе несовершенных опытов, что диапазон ее преломляемости, вероятно, шире, чем у призматических цветов; и поскольку недавно стояла благоприятная солнечная погода и было получено достаточное подтверждение этого факта, целесообразно добавить следующие эксперименты к тем, что уже описаны. Я запасся небольшой подставкой на четырех коротких ножках и покрыл ее белой бумагой [рис. 70]. На ней я провел пять линий, параллельных одному из краев подставки, на расстоянии $1\frac{1}{2}$ дюйма друг от друга, но так, что первая линия могла быть удалена от края не более чем на $\frac{1}{4}$ дюйма. Эти линии я пересек под прямым углом тремя другими, из которых вторая и третья находились соответственно в $2\frac{1}{2}$ и 4 дюймах от первой. Те же термометры, которые раньше обозначались № 1, 2 и 3, укрепленные на своих маленьких наклонных плоскостях, были затем установлены так, чтобы центры тени от их шариков отбрасывались на пересечении упомянутых линий. Затем, установив мою маленькую подставку на стол, я заставлял призматической спектр падать так, что крайний цвет попадал на край бумаги и ничего не могло проходить за первую линию. При таком расположении весь спектр, исключая ничтожную последнюю четверть дюйма, которая служила направляющей, находился за краем подставки и не мог мешать эксперименту. На этот раз я к тому же воспользовался предосторожностью, затемнив окно, в котором была установлена призма, путем укрепления темно-зеленых штор, с тем чтобы оставалось столько света, сколько удобно.

Когда термометры приняли в точности температуру комнаты, я расположил подставку так, что часть красного цвета, преломленного призмой, падала на край бумаги перед термометром № 1 примерно на полпути, или $1\frac{1}{4}$ дюйма, от термометра № 2. Следовательно, красный цвет не был близок ни к термометру № 2, ни к термометру № 3, которые должны были служить эталонами. Во время эксперимента я удерживал конец видимого красного цвета в точности на первой линии, как на положенном ему пределе, слегка перемещая подставку, когда это было необходимо, и обнаружил, что термометры, находившиеся все на второй линии, показали следующее. В данном случае, когда центр

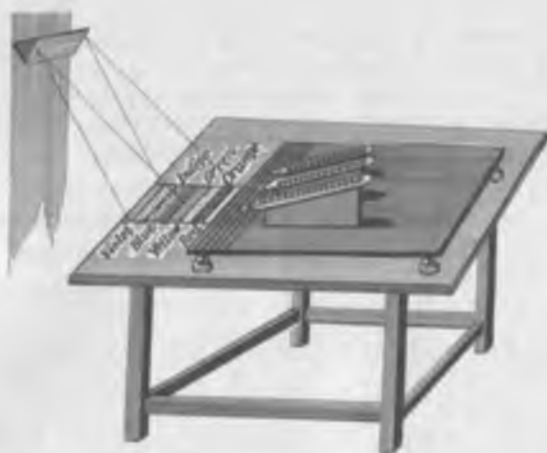


Рис. 70

термометра № 1 помещался на $\frac{1}{2}$ дюйма за видимым светом, он поднялся за 10 мин на $6\frac{1}{2}^{\circ}$ [табл. 1].

Для подтверждения этого факта я охладил термометр № 1 и поместил на его место термометр № 2; термометр № 3 я поместил на место № 2, а первый — на место № 3; установив их, как и раньше, на второй линии и подвергнув их воздействию, я получил такие результаты. Теперь термометр № 2 за 12 мин поднялся на $2\frac{3}{4}^{\circ}$, и, будучи гораздо более чувствительным, чем № 1, он приобрел температуру, соответствующую этому положению, в более короткое время. Однако я подвергал его воздействию дольше, дабы быть совершенно уверенным в результате. Тот факт, что его показания возросли только на $2\frac{3}{4}^{\circ}$, в то время как у № 1 — на $6\frac{1}{2}^{\circ}$, уже объяснялся ранее [табл. 2].

Поскольку теперь очевидно, что имело место преломление лучей, приходящих от Солнца, которые, хотя и недоступны зрению, все же наделены значительной способностью в создании тепла, я продолжил исследования их протяженности следующим образом. Термометры были установлены на третьей линии вместо второй; подставка до первой линии освещалась окрашенной полоской исчезающих красных лучей. Результаты таковы. Здесь термометр № 1 поднялся на $5\frac{1}{4}^{\circ}$ за 13 мин, находясь на расстоянии 1 дюйм за видимым светом красных лучей [табл. 3].

Затем я поместил термометры на четвертую линию вместо третьей и, действуя, как и раньше, получил следующие результаты. Термометр № 1 поднялся на $3\frac{1}{8}^{\circ}$ за 10 мин, находясь на расстоянии в $\frac{1}{2}$ дюйма за светом красных лучей [табл. 4].

Теперь я мог перейти к пятой линии; но такой прекрасный день в смысле чистоты неба и совершенного безветрия не часто можно ожидать в это время года; поэтому я поспешил провести испытания с другим концом призматического спектра. Это было

Таблица 1

№ 1	№ 2	№ 3
45	45	44
49	45	44
51	$44\frac{3}{4}$	44
$50\frac{1}{4}$	$43\frac{3}{4}$	$43\frac{1}{2}$

Таблица 2

№ 1	№ 2	№ 3
44	44	45
47	44	45
$46\frac{3}{4}$	44	45
$46\frac{3}{4}$	44	45

Таблица 3

№ 1	№ 2	№ 3
46	46	$45\frac{3}{4}$
50	$46\frac{1}{2}$	46
$51\frac{3}{4}$	$46\frac{3}{4}$	$46\frac{1}{4}$
$52\frac{1}{4}$	47	$46\frac{3}{4}$

Таблица 4

№ 1	№ 2	№ 3
$48\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{4}$	$47\frac{3}{4}$
$51\frac{1}{2}$	$48\frac{3}{8}$	$47\frac{7}{8}$

Таблица 5

№ 1	№ 2	№ 3
48	48	$47\frac{3}{4}$
48	48	$47\frac{3}{4}$
48	$47\frac{1}{2}$	47
$48\frac{1}{2}$	$47\frac{1}{2}$	47
48	48	$47\frac{3}{4}$

Таблица 6

№ 1	№ 2	№ 3
48	48	$47\frac{3}{4}$
$48\frac{1}{2}$	48	$47\frac{3}{4}$
$48\frac{3}{4}$	$48\frac{1}{2}$	$47\frac{3}{4}$
49	$48\frac{1}{2}$	$47\frac{3}{4}$

Таблица 7

№ 1	№ 2	№ 3
$48\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
$55\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
$55\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48

Таблица 8

№ 1	№ 2	№ 3
$48\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
$55\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
57	49	$48\frac{1}{2}$

Таблица 9

№ 1	№ 2	№ 3
57	49	$48\frac{1}{2}$
$58\frac{1}{2}$	$49\frac{3}{4}$	49
59	$50\frac{1}{4}$	$49\frac{3}{4}$
59	50	$49\frac{1}{2}$

Таблица 10

№ 1	№ 2	№ 3
$50\frac{1}{2}$	$50\frac{1}{2}$	50
$57\frac{3}{4}$	50	$49\frac{1}{2}$
$58\frac{1}{2}$	50	$49\frac{1}{2}$
$58\frac{3}{4}$	50	$49\frac{1}{2}$

исполнено с некоторым трудом, поскольку освещенность фиолетовыми лучами настолько слаба, что нельзя уловить их точное окончание. Однако, насколько можно было судить, я поместил термометры на 1 дюйм за предел досягаемости фиолетовых лучей и получил такие результаты. Теперь несколько показаний термометров, два из которых, № 1 и 2, использовались как переменные, тогда как № 3 оставался эталоном, считывались в течение 12 мин. Однако, как можно видеть при внимательном рассмотрении, результаты не дают оснований приписывать какому-либо из их малых изменений другую причину, чем случайное возмущение, которое должно происходить от движения воздуха в комнате, где проводятся какие-то работы [табл. 5].

Затем я поставил термометры на линию самого первого заметного фиолетового света, но так, что № 1 и № 2 вновь были освещены, тогда как № 3 оставался эталоном. Результаты оказались следующими. Термометр № 3 поднялся за 15 мин на 1° ; а термометр № 2 — на $1/2^\circ$ за то же время. Эти последние эксперименты в достаточной степени убедили меня в том, что никакие лучи, которые могут падать за фиолетовым [цветом], не могут иметь ощутимой способности ни к освещению, ни к нагреванию и что обе эти способности сосуществуют на протяжении всего призматического спектра и заканчиваются там, где исчезает самый слабый фиолетовый [свет] [табл. 6].

Оставалось решить еще один очень существенный вопрос, а именно: определить положение максимума нагревательной способности. Поскольку я уже знал, что он не лежит с фиолетового края красного [света], я начал с полноцветного красного цвета и поместил расположенные в линию термометры так, чтобы иметь шарик термометра № 1 в середине таких лучей, в то время как другие два термометра оставались в стороне и не были подвержены их действию. В этом случае термометр № 1, подставленный под полноцветные лучи, поднялся на 7° за 10 мин [табл. 7].

Я сдвигал подставку назад до тех пор, пока центр шарика термометра № 1 не оказался в точности в исчезающем красном цвете, так что половина его шарика была внутри, а половина — вне видимых солнечных лучей. Здесь термометр № 1 поднялся на 8° за 10 мин.

Не теряя времени, дабы лучше связать вместе эти последние наблюдения, я не стал возвращать термометр № 1 к комнатной температуре, будучи уже хорошо знаком со скоростью [изменений] его показаний в сравнении с № 2, а перешел к следующему эксперименту, сдвинув подставку настолько, что шарик термометра № 1 был полностью вне видимых солнечных лучей, помещая все же линию границы красного цвета столь близко к наружной стороне шарика, сколь было возможно без того, чтобы коснуться его. Здесь термометр № 1 за 10 мин поднялся еще на 1° по сравнению с тем, насколько он смог подняться в его предшествующем положении; теперь это составляло 9° выше эталона. Шарик этого термометра имел диаметр в точности полдюйма, и поэтому его

центр находился на $1/4$ дюйма за видимым освещением, действию которого не подвергалась ни одна его часть [табл. 8, 9].

Для получения истинного максимума было бы неправильно сравнивать эти последние наблюдения с теми, что были выполнены раньше этим же утром, поскольку теперь солнце было сильнее, чем в тот период времени. По этой причине я сделал так, чтобы линия окончания видимого света снова находилась на расстоянии $1/2$ дюйма от этого шарика, и получил такие результаты. Теперь, когда центр шарика термометра № 1 находился на расстоянии $1/2$ дюйма от видимых солнечных лучей, он за 16 мин поднялся на $8\frac{3}{4}^\circ$, и разность слишком незначительна, чтобы предположить, что последнее положение термометра было гораздо дальше максимума нагревательной способности; хотя в то же время эксперимент в достаточной степени указывает, что нет необходимости искать место, о котором идет речь, на большем расстоянии [табл. 10].

Теперь легко уложить полученные результаты в очень узкие рамки. Первые четыре эксперимента доказывают, что существуют лучи, приходящие от Солнца, которые преломляются слабее, чем любые из лучей, действующих на глаз. Они наделены сильной способностью к нагреву тел, но лишены способности освещать тела. Это и объясняет причину, почему до сих пор они ускользали от внимания. В мои намерения не входит указание угла наименьшего преломления для этих лучей, поскольку для этой цели необходимы более точные, повторяющиеся и пространственные опыты. Но на расстоянии 52 дюйма от призмы все еще имелась значительная способность к нагреву, проявляемая нашими невидимыми лучами на расстоянии $1\frac{1}{2}$ дюйма за красными лучами, измеренном по их проекции на горизонтальную плоскость. У меня нет сомнений, что их действительность может быть прослежена и несколько далее. Опыты 5 и 6 показывают, что способность к нагреванию тянется до крайних пределов видимых фиолетовых лучей, но не далее их; и она постепенно ослабляется по мере того, как лучи становятся все более преломляемыми. Последние четыре эксперимента доказывают, что максимум нагревательной способности находится в невидимых лучах, и, вероятно, он находится на расстоянии не менее полдюйма за последними видимыми лучами, когда они проецируются так, как указано выше. Эти эксперименты показывают также, что невидимые солнечные лучи в своем наименее преломляемом состоянии и значительно дальше максимума все еще демонстрируют способность к нагреванию, полностью равную способности к нагреванию красного света. Следовательно, если мы можем вывести количество действующего фактора из производимого действия, то по числу невидимых солнечных лучей, возможно, значительно превышают видимые.

В заключение, если мы называем светом те лучи, которые освещают объекты, и лучистым теплом те, что нагревают тела, то можно задать вопрос: существенно ли отличается свет от лу-

чистой теплоты? Ответ, который я мог бы предложить, состоит в том, что по правилам философствования мы не можем принять, две разные причины для объяснения определенных эффектов, если их можно отнести за счет одной. Пучок лучистого тепла, исходящий от Солнца, состоит из лучей, по-разному преломляющихся. (...) Если это правильное описание солнечного тепла, в поддержку которого я ссылаюсь на свои опыты, то нам остается лишь принять, что те солнечные лучи, которые имеют преломляемость лучей, содержащихся в призматическом спектре, благодаря строению органов зрения воспринимаются под видом света, а остальные, будучи задержанными оболочками и соками глаза, действуют на органы зрения, как и на все другие части нашего тела, вызывая ощущение тепла.

Комментарий

Перевод с английского работы В. Гершеля выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: *Philosophical Transactions*, 1800, vol. 90, Pt. 11, p. 284. Название работы на языке оригинала: «Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of Sun».

¹ Речь идет о статье Гершеля «Исследование способности призмных цветов нагревать и освещать тела; с замечаниями, которые доказывают различную преломляемость лучистой теплоты; к чему прибавлено исследование метода удобного наблюдения Солнца посредством телескопов с большою апертурой и высоким увеличением». В ней Гершель предложил использовать в качестве фильтра уменьшающего нагрев телескопа, слой воды, подкрашенной чернилами.

² Эта работа называется «Опыты с солнечными и земными лучами, которые вызывают тепло; с сравнительным обзором законов, которым подчиняются свет и теплота, или, точнее, лучи, которые их вызывают, с целью определить, одинаковы они или различны».

³ Гершель измерял изменение температуры в градусах шкалы Фаренгейта.

Литература

- [1] Собрание научных трудов В. Гершеля: *The Scientific Papers of Sir William Herschel*. Vols. 1—2 London, 1912.
- [2] King H. C. *Sir William Herschel and the discovery of radiant heat*. «Journal of British Astronomical Association», 1955, vol. 65, n 7.
- [3] Еремеева А. И. *Вселенная Гершеля*. М., 1966.



А. Вольта

1745—1827

Об электрическом токе

Основное внимание исследователей XVIII в., занимавшихся проблемами электричества, было сосредоточено на электростатических явлениях. Хотя Б. Франклин еще в конце 40-х годов XVIII в. доказал электрическую природу молнии, это атмосферное явление не было осознано как принципиально новое проявление электричества — ток. Поэтому столь большой эффект произвело открытие итальянского анатома и физиолога Л. Гальвани, обнаружившего в 1780 г. сокращение мышц препарированной лягушки при прикосновении к ним двух разнородных металлов, между которыми имеется электрический контакт. Гальвани не сумел найти правильное объяснение открытого им эффекта и выдвинул идею о существовании так называемого «животного электричества». С критикой взглядов Гальвани выступил другой итальянский ученый А. Вольта. Дискуссия с Гальвани привела Вольту в конечном счете к созданию первого источника постоянного тока, открывшего новую эпоху в исследовании электричества.

Алессандро Вольта родился 18 февраля 1745 г. в небольшом городе Комо (близ Милана) в знатной дворянской семье. С ранних лет он проявлял интерес к естественным наукам, особенно к молодой тогда области электричества. Первая печатная работа Вольты увидела свет, когда ему было 24 года, она была посвящена развитию теории лейденской банки. Начинающий исследователь обратил на себя внимание и получил место преподавателя физики в школе родного города. К этому времени относятся исследования Вольты по химии и изобретение ряда физических и химических приборов. Он исследовал горючие газы, открыл болотный газ (метан) и пришел к выводу, что последний образуется вследствие разложения животных и растительных останков, тогда как в этот период в химии господствовало представление о чисто минералогическом происхождении горючих газов. Он изобрел, в частности, водородную лампу и эвдиометр, употребляемый при газовом анализе.

Всемирную известность принесло Вольте изобретение электрофора (1777). В том же году он стал профессором физики в университете Павии, с которым связана вся дальнейшая твор-

ческая жизнь ученого вплоть до ухода в отставку в 1819 г. Последние годы жизни, отойдя от научных исследований, он провел безвыездно в родном городе, где умер 5 марта 1827 г.

К началу дискуссии с Гальвани Вольта был уже известным ученым, особенно авторитетным в вопросах, связанных с электричеством. Кроме изобретения электрофора Вольте принадлежит создание чувствительного электроскопа с соломинками, плоского конденсатора, обнаружение проводимости пламени.

Поначалу Вольта, настороженный идеей о «животном электричестве», с недоверием отнесся ко всей работе Гальвани. Тщательно повторив его опыты, Вольта убедился в точности сделанных Гальвани наблюдений. Однако сомнения в справедливости их объяснения остались.

В результате многочисленных опытов и тонких рассуждений в 1793 г. Вольта пришел к выводу, что эффекты, обнаруженные Гальвани, не являются порождением самого организма, а возникают как следствия соприкосновения разнородных металлов. Он определяет «контактный ряд» металлов, создающих «напряжения» при соприкосновении.

Вольта продолжает исследования с целью повышения контактного напряжения. Он строит цепи, состоящие из различных металлов, надеясь, что это приведет к увеличению конечного результата. Но эта надежда не сбылась: в 1796 г. ученый сформулировал закон, согласно которому напряжение между крайними металлами в цепи, составленной из различных проводников, равно напряжению, которое устанавливается при непосредственном контакте крайних металлов незамкнутой цепи. Эти исследования и привели ученого к изобретению вольтова столба — первого источника постоянного электрического тока. Араго писал, что прибор Вольты «был самым замечательным прибором, когда-либо изобретенным людьми, не исключая телескопа и паровой машины».

Мир узнал об этом изобретении из письма ученого президенту Лондонского Королевского общества Дж. Бэнксу, датированного 20 марта 1800 г. Уже вскоре во многих странах ученые начали создавать «вольтовы столбы» и исследовать новые физические явления. Так, в том же году А. Фуркруа обнаружил тепловое действие электрического тока, а У. Никольсон и А. Карлейль открыли явление электролиза. В 1802 г. русский физик В. В. Петров с помощью гигантской батареи, составленной из элементов Вольты, впервые получил электрическую дугу.

Впечатление, которое произвело на научный мир открытие Вольты, характеризуется тем, что ученого пригласили во Францию и в Англию для демонстрации его «столба». В Париже он показывал опыты на заседании Академии наук, на котором присутствовал Бонапарт. За большой вклад в науку Вольта был удостоен ряда наград, был избран иностранным членом Лондонского Королевского общества и Академии наук Франции.

Об электричестве, возбуждаемом простым соприкосновением различных проводящих веществ

Комо, 20 марта 1800 года

[После долгого молчания, в чем я не стану оправдываться, я хочу сообщить Вам, а через Вас Королевскому обществу о некоторых поразительных результатах, к коим я пришел во время моих опытов с электричеством, возбуждаемым простым взаимным соприкосновением двух различных металлов, и даже иных проводников также различной природы, жидких или содержащих некоторую влагу, которой они как раз и обязаны своею проводимостью.]

Самым основным и включающим почти все остальные результаты является постройка прибора, сходного по эффектам, т. е. по сотрясению, вызываемому в руках и т. д., с лейденскими банками или с такими электрическими слабо заряженными, но непрерывно действующими батареями, где бы заряд после каждого взрыва восстанавливался сам собой; одним словом, этот прибор обладает бесконечным зарядом, постоянным импульсом или действием электрического флюида. Но он в то же время значительно отличается от них и непрерывным, ему свойственным действием, и тем, что он состоит исключительно из нескольких незлектриков¹, выбранных среди самых лучших проводников, а потому совсем не обладающих, как считалось до сих пор, электрической природой. Лейденские же банки и электрические батареи, как известно, состоят из одной или более изолированных пластинок, из тонких слоев вещества, обычно считаемых электрическими, и снабжены проводниками или так называемыми незлектрическими телами. Действительно, мой прибор, который несомненно удивит Вас, представляет собой собрание некоторого количества хороших проводников разного рода, расположенных в известном порядке. Его образуют 30, 40, 60 (и более) кусков меди (или лучше серебра), наложенных каждый на кусок свинца (или лучше цинка), и такого же количества слоев воды или другого лучшего жидкого проводника, как, например, соленая вода, щелок и т. п., или кусков картона, кожи и т. п., пропитанных этими жидкостями. Мой новый прибор состоит, таким образом, из указанных слоев, помещенных между каждой парой, или комбинацией из двух различных металлов, из такой перемежающейся последовательности и всегда в одном порядке, этих трех проводников. Он по своим действиям подражает лейденским банкам или электрическим батареям, вызывая такие же сотрясения, как и они. Он, правда, значительно отстает от этих батарей, даже сильно заряженный, в отношении силы взрыва, искры, расстояния, на котором происходит разряд, и т. п. и действует как очень слабо заряженная ба-

тарей, в то же время обладающая огромной емкостью. С другой стороны, он бесконечно превосходит силу и возможности этих же батарей, ибо не требует предварительной зарядки посторонним электричеством и вызывает сотрясение всякий раз, когда к нему прикасаются надлежащим образом, сколько бы раз это ни производилось.

Этот прибор, более сходный по существу, как я покажу дальше, с естественным электрическим органом электрического ската или электрического угря и т. п., чем с лейденской банкой и известными электрическими батареями, я назову искусственным электрическим органом. На самом деле, разве он не состоит также только из проводников? Разве он, кроме того, не активен сам по себе без предварительного заряжения, без всякого электричества, возбуждаемого каким-либо из известных методов, но действует беспрестанно и безостановочно, вызывая в любой момент более или менее сильные сотрясения, возобновляющиеся при каждом прикосновении, которые при частом повторении создают то же ощущение органов, как и при прикосновениях к скату?

Я опишу подробнее этот и аналогичные приборы, а также самые замечательные из относящихся сюда опытов.

Я заготовил несколько дюжин небольших круглых пластинок или дисков из меди, латуни и лучше всего серебра с диаметром примерно 1 дюйм и такое же количество оловянных пластинок (или еще лучше цинковых) примерно той же формы и величины. Я говорю примерно, потому что точность здесь не имеет значения и вообще величина и форма металлических частей произвольны. Самое важное, чтобы их можно было удобнее поместить одну над другой в виде столба. Кроме того, я приготовил большое количество кружков из картона, кожи или любого губчатого материала, впитывающего и задерживающего много воды или другой жидкости, которой они должны быть сильно смочены для успешного опыта. Эти кружки, которые я буду называть мокрыми дисками, делаются несколько меньше, чем металлические, чтобы, находясь между последними, они не выходили за их края.

Когда все это находится у меня под рукой и в надлежащем порядке, т. е. металлические диски в сухом и чистом виде, а неметаллические — хорошо пропитаны простой водой (или еще лучше соленой) и слегка отжаты, чтобы жидкость не стекала, я их складываю в должной последовательности.

Я кладу на стол или на какую-нибудь опору одну из металлических пластинок, например серебряную, а на нее цинковую и затем мокрый диск и т. д. в том же порядке. Всегда цинк должен следовать за серебром или наоборот в зависимости от расположения их в первой паре, и каждая пара перекладывается мокрым диском. Таким образом, я складываю из этих этажей столб такой высоты, который может держаться не обрушиваясь.

Если он содержит около 20 подобных этажей, то он не только показывает на электрометре Кавалло, снабженном конденсатором,

свыше 10 или 15°, и заряжает этот конденсатор простым прикосновением, так что получается искра и т. п., но и ударяет в пальцы, если касаться ими его двух концов (верхушки и основания столба) двумя или несколькими слабыми и более или менее частыми толчками в зависимости от частоты этого соприкосновения. Эти удары вполне сходны с легким сотрясением, испытываемым при касании к лейденской банке, слабо заряженной, или к ослабшему скату, который больше походит на мой прибор своими без конца повторяющимися ударами.

Чтобы получились эти слабые сотрясения, описанные мною, необходимо, чтобы пальцы, которыми одновременно касаются двух концов, были смочены водой, ибо в противном случае кожа является недостаточно хорошим проводником. Чтобы результаты были еще надежней и сотрясения сильнее, необходимо соединить основание столба, т. е. диск дна, при помощи достаточно широкой пластинки или толстой металлической проволоки с водой довольно большого таза и чашки, куда опускают один, два, три пальца или всю руку, касаясь одновременно верхнего края (последнего или одного из последних дисков столба) концом металлической пластинки, находящейся в другой сильно смоченной руке, причем рука должна охватывать большую ее часть и сильно ее сжимать. Уже ощущается легкое покалывание или сотрясение в одном или двух суставах пальца, погруженного в воду таза, если касаться пластинкой в другой руке четвертой и даже третьей пары дисков. Если прикоснуться к 5-й, затем 6-й паре их, переходить постепенно все выше и выше к вершине столба, то можно ясно наблюдать, как постепенно увеличивается сила сотрясений. Сила, полученная от колонны, состоящей из 20 пар дисков (не более), такова, что происходят сотрясения, ощущаемые всем пальцем, притом довольно болезненные, если он один был погружен в воду таза. Они распространяются до запястья (но без всякой боли) и даже до локтя, если вся рука целиком или частично была опущена в таз, и даже чувствуются в запястье другой руки.

Я предполагаю, что были приняты все меры для надлежащей конструкции такого столба, что каждая пара металлов, состоящая из серебряного и цинкового дисков, сообщается со следующей парой таких же дисков при помощи достаточного слоя влаги, например чистой воды и, еще лучше, соленой, или же при помощи диска из картона, кожи или чего-либо подобного, хорошо пропитанного этой соленой водой. Этот диск не должен быть слишком маленьким, и поверхности его должны плотно прилипать к поверхностям металлических пластинок, которые он разделяет. Это чрезвычайно важное условие. Что касается металлических пластинок каждой пары, то они могут касаться друг друга лишь в нескольких точках.

Мимоходом замечу, что если для свободного прохождения электрического тока средней силы достаточно соприкосновения металлов (прекрасных проводников) всего лишь в нескольких

точках, то жидкости или тела, пропитанные влагой, являющиеся худшими проводниками, требуют широкой площади касания с металлическими проводниками, а еще более между собой, чтобы электрический ток легко проходил и не задерживался на своем пути, особенно если он движется с незначительной силой, как в нашем случае.

В общем, действие (испытываемое сотрясение) моего прибора возрастает по мере увеличения температуры окружающего воздуха, или воды, или смоченных дисков, входящих в состав столба или даже воды таза, так как тепло улучшает проводимость воды, еще лучше она становится от всех солей и, в частности, от поваренной соли. Вот одна из причин, вернее, даже единственная, почему лучше применять соленую воду в тазах и в промежутках между металлическими дисками, а также для пропитки картонных и т. п. дисков, как я уже указывал выше.

Но все эти меры приводят все-таки к слишком незначительным результатам и слабым сотрясениям, если столб состоит всего лишь из 20 дисков, хотя бы они были из самых лучших металлов для данного опыта, таких, как серебро и цинк; будь они из серебра и свинца или олова, или из меди и олова, эффект был бы в два раза меньше, если не возместить их меньшую силу большим числом дисков. Таким образом, электрическая сила этого прибора увеличивается и доводится до силы ската, электрического угря или даже превышает при помощи большого числа дисков, расположенных так, как я указывал. Если к этим 20 парам прибавить еще 20 или 30 других, расположенных в том же порядке, то сотрясения, вызванные таким длинным столбом (я укажу потом, как его поддерживать, чтобы он не обрушился, или, еще лучше, разделить его на два столба или более), отличаются значительно большей силой и пройдут по двум рукам до плеча, особенно в руке, погруженной в воду. Эта рука с предплечьем немеет, если повторить сотрясения несколько раз и быстро друг за другом, и это происходит в том случае, если погружена в воду таза вся рука. Если же опустить туда один лишь палец, весь или часть его, то сотрясения, сконцентрированные на нем одном, будут так болезненны и жгучи, что вынести их невозможно.

Нужно думать, что этот столб, образуемый из 40 или 50 пар металлов и вызывающий довольно сильные сотрясения в руках одного лица, заставит почувствовать подобные сотрясения, хотя и в более слабой степени, ряд лиц, держащихся за руки (мокрые) и образующих непрерывную цепь.

Возвращаясь к описанию механической конструкции моего прибора, имеющего ряд вариантов, я опишу здесь не все те, которые я придумал и выполнил или в большом, или в малом масштабе, но лишь некоторые из них, самые любопытные или полезные, обладающие каким-либо действительным преимуществом, например более легким или быстрым выполнением, более надежной работой и лучшей сохранностью.



Рис. 71

Начнем с одного из них, объединяющего, может быть, все эти преимущества и в то же время отличающегося внешним видом от прибора со столбом, описанного выше. Недостаток его состоит в том, что он слишком объемист. Изображение этого прибора, который я назову устройством с цепью из чашек, дается на рис. 71.

Несколько стаканов из любого материала, кроме металлов, например из дерева, глины, черепахи и еще лучше хрусталя (особенно удобны маленькие кубки или стаканчики), наполняются наполовину чистой или соленой водой или щелоком. Они сообщаются друг с другом так, что образуется подобие цепи при помощи металлических дуг, из которых одно плечо Aa или только конец A , погруженный в стаканчик, сделан из красной или желтой меди или лучше из посеребренной меди, а другой Z' , опущенный в следующий стаканчик, — из олова или лучше из цинка. Замечу, что щелок и другие щелочные жидкости следует предпочесть, когда один из погруженных металлов — олово. Лучше применять соленую воду при цинке. Оба металла, образующие дугу, спаяны в любом месте выше части, погруженной в жидкость; эта последняя часть должна обладать довольно большой поверхностью. Поэтому она должна иметь вид пластинки в 1 кв. дюйм или около этого, остальная часть дуги может быть совсем тонкой, даже состоять из простой металлической проволоки. Она может быть совсем из другого металла, чем части, погруженные в жидкость стаканчиков, ибо действие электрического флюида всех контактов нескольких чередующихся металлов, или сила, с какой этот ток проталкивается до конца, почти или совсем равна получаемой при непосредственном контакте первого металла с последним без промежуточных контактов⁵, как я удостоверился на опытах, о чем я еще буду говорить.

Таким образом, ряд из 30, 40, 60 таких стаканчиков, связанных, как указано, друг с другом и расставленных или по прямой линии, или по кривой, или по изогнутой любым образом, образует новый прибор. Он по существу и по материалу есть тот же столб, что описан выше. Основное здесь в непосредственном сообщении между различными материалами, составляющими пару, и промежуточной связью между одной парой и другой, реализующейся при помощи влажного проводника, что имеет место как в первом, так и во втором приборе. (...)

Комментарий

Перевод с английского письма А. Вольты, опубликованного в «Philosophical Transactions» (1800, vol 90, p. 403—431), выполнен М. И. Радовским. Отрывок из этого письма воспроизводится по изданию Радовский М. И. Гальвани и Вольта. К 150-летию открытия электрического тока. М. — Л., 1941.

- ¹ «Неэлектриками» в XVIII в. называли проводники, которые невозможно было наэлектризовать.
- ² Позже французские физики начали называть прибор Вольты «вольтовым столбом», исходя из формы его первых образцов.
- ³ Электрометр Кавалло представлял собой пару бузиновых шариков, подвешенных на шелковых нитях, верхние концы которых закреплялись в одной точке.
- ⁴ Обозначения пластин А и Z соответствуют начальным буквам слов *argentum* (серебро) и *zincum* (цинк).
- ⁵ Здесь впервые формулируется закон Вольты.

Литература

- [1] Собрание сочинений А. Вольты: *La opere di Alessandro Volta*. Vols. 1—7. Milano, 1918—1929.
- [2] *Maraldi U. La vita di Alessandro Volta*. Firenze, 1959.
- [3] *Dibner B. Alessandro Volta and the electric battery*. N. Y. 1964.
- [4] Радовский М. И. Гальвани и Вольта. М. — Л., 1941.
- [5] Околотин В. Вольта. М., 1986.



Т. Юнг

1773—1829

Об интерференции света и ее проявлениях

Физическая оптика развивалась очень неравномерно. После плодотворного периода конца XVII в., ознаменовавшегося открытием интерференционных и дифракционных эффектов, установлением сложного состава белого света, доказательством конечности скорости распространения света, выдвижением двух основных гипотез — волновой и корпускулярной — о природе света, в XVIII в. оптических исследованиях наступил спад. Хотя в этот период было открыто явление аберрации света, разработаны основы фотометрии и создан первый ахроматический рефрактор, продвижение в развитии представлений о природе света не наблюдалось. Выступления отдельных ученых (Л. Эйлер, М. В. Ломоносов) в защиту волновых представлений о свете не имели успеха, и подавляющее большинство ученых придерживалось корпускулярной концепции.

Начало коренных изменений в оптических исследованиях относится к первым годам XIX в., когда английский ученый Т. Юнг опубликовал ряд работ, в которых был сформулирован закон интерференции и даны примеры его применения для объяснения множества оптических явлений.

Томас Юнг родился 13 июня 1773 г. в Милвертоне (графство Сомерсет, Англия) в семье торговца тканями. Он был старшим сыном в большой семье, принадлежавшей к религиозной общине квакеров. Воспитывавшийся в строгих правилах этой секты Юнг очень рано проявил редкие способности: в возрасте двух лет он научился читать, а в шесть лет начал изучать латынь. Хотя родители направляли мальчика для обучения в различные учебные заведения, основные знания Юнг приобрел самостоятельно — с ранних лет он относился к самообразованию как к важнейшему способу совершенствования в науках. В девятнадцать лет Юнг уже владел многими иностранными языками и считался знатоком греческого и латыни.

С 1792 по 1803 г. Юнг изучал медицину в Лондоне, Эдинбурге, Геттингене и, наконец, в Кембридже. Еще в первые годы учебы он подготовил интересную научную работу, в которой доказал, что аккомодация глаза обусловлена изменением формы хруста-

лика. За эту работу в 1794 г. он был избран членом Лондонского Королевского общества. Во время пребывания в Кембридже Юнг занялся исследованием акустических и оптических явлений (интерес к акустике был связан с любовью к музыке — Юнг играл практически на всех музыкальных инструментах того времени). Аналогия между многими явлениями акустики и оптики убедила его в справедливости волновых представлений о свете. В 1801 г. Юнг сформулировал принцип интерференции, эффективность которого была продемонстрирована им в ряде работ 1801—1803 гг. Итоги этого этапа изучения свойств света были подведены Юнгом в фундаментальном «Курсе лекций по натуральной философии», два тома которого были изданы в 1807 г. Этот курс, подготовленный на основе лекций, читавшихся Юнгом в 1802—1803 г., когда он занимал пост профессора Королевского института, содержал огромный научный материал. В него были включены как обзоры важнейших работ по механике, физике и астрономии других авторов, так и оригинальные результаты, полученные самим Юнгом. В частности, в «Курсе» впервые был введен термин «энергия» и рассматривался модуль упругости, получивший затем название «модуля Юнга».

После издания «Курса лекций» Юнг перешел к исследованиям в области медицины, результаты которых он изложил в большом сочинении «Введение в медицинскую литературу». Разнообразие интересов и занятий Юнга не может не поражать. Не получив признания как практикующий врач, Юнг обращается к изучению египетских иероглифов, получив при этом важные результаты. Одновременно он исполняет обязанности секретаря Лондонского Королевского общества по зарубежным связям, а также является секретарем Комиссии долгот и издателем «Морского альманаха» — справочника по практической астрономии. Кроме того, он ведет большую литературную работу: для Приложения к *Encyclopaedia Britannica* он подготовил более 40 биографических очерков ученых-естественников и филологов, целый ряд фундаментальных статей, оставивших заметный след в истории науки. Всей своей жизнью (Юнг умер 10 мая 1829 г.) ученый оправдал прозвище «феноменальный», данное ему в годы учебы в Кембриджском университете.

После 1807 г., на протяжении всей жизни, Юнг продолжал интересоваться вопросами оптики. Этот интерес стимулировался как важными экспериментальными открытиями, относящимися к поляризационным явлениям (1810—1815), так и появлением работ выдающегося французского ученого О. Френеля (1815—1823). Юнг был активным пропагандистом идей Френеля, состоял с ним в переписке и переводил его работы на английский язык. Отметим, что в некоторых вопросах Юнг предвосхищал точные доказательства Френеля. Так, в 1817 г. в письме, адресованном Араго, Юнг высказал предположение, что явления поляризации могут быть связаны с поперечной компонентой

световых волн. Хотя в целом по глубине и разработанности теория световых волн Френеля значительно превосходит представления Юнга, волновая оптика с полным основанием называется «оптикой Юнга — Френеля».

О теории света и цветов

Хотя изобретение правдоподобных гипотез, независимых от каких-либо экспериментальных наблюдений, может принести очень мало пользы для развития естествознания, тем не менее открытие простых и единых принципов, с помощью которых большое число явно разнородных явлений сводятся к согласованным и универсальным законам, должно всегда считаться имеющим большое значение для усовершенствования человеческого разума; и чем больше и больше явлений оказываются согласующимися с принципами, заложенными в основу, тем более эти принципы могут претендовать на замену звания «гипотеза» званием «фундаментальный закон природы».

Цель сегодняшнего доклада не столько выдвижение каких-либо абсолютно новых мнений, сколько обращение к ряду предложенных ранее теорий и к их непосредственным создателям, чтобы подкрепить эти теории дополнительными доказательствами и применить эти теории к большому числу разнообразных фактов, которые раньше были погружены в темноту. В этой связи не было абсолютно никакой необходимости проводить хотя бы один новый опыт, поскольку набралось уже большое количество экспериментов в высшей степени превосходных, поскольку они должны были проводиться без малейшей приверженности их авторов к системе, с помощью которой они будут объяснены. Тем не менее здесь будет изложен ряд фактов, ранее не наблюдавшихся, с тем чтобы показать полное согласие упомянутой системы с разнообразными явлениями природы, которые с ней связаны. <...>

Гипотеза I. Вселенную наполняет светоносный эфир малой плотности и в высшей степени упругий. <...>

Гипотеза II. Волнообразные движения возбуждаются в этом эфире всякий раз, как тело становится светящимся.

Комментарий. Я использую термин «волнообразное движение» (undulation), отдавая ему предпочтение перед словом «колебание» (vibration), потому что колебание обычно понимается как движение, происходящее попеременно то вперед, то назад вследствие сложения импульса тела и ускоряющей силы, которое, естественно, более или менее непрерывно. Волнообразное же движение предполагается состоящим из колебательного движения, последовательно распространяющегося через различные части среды без всякого стремления каждой частицы продолжать свое движение, кроме как в связи с передачей следующим друг за другом волнообразных движений от явно колеблю-

щегося тела. Так в воздухе вибрирующая струна создает волнообразные движения, представляющие звук. <...>

Гипотеза III. *Ощущение различных цветов зависит от различной частоты колебаний, возбуждаемых светом в сетчатке.* <...>

Предложение VIII. Когда два волнообразных движения от разных источников либо точно совпадают, либо очень близки по направлению, их общее действие состоит в комбинации движений, принадлежащих каждому из них.

Поскольку каждая частица среды подвержена действию каждого волнообразного движения, где бы ни совпадали их направления, волнообразные движения могут распространяться не иначе как объединяя свои движения, так что объединенное движение может быть либо суммой, либо разностью отдельных движений в соответствии с тем, сходные или несходные части волнообразных движений совпадают.

Я уже раньше¹ настаивал на широком применении этого принципа к гармоникам [звука], однако далее выяснится, что он еще более полезен для объяснения явлений цветов. Волнообразные движения, которые теперь нужно сравнить, имеют равные частоты. Когда два ряда в некий момент времени точно совпадают, то очевидно, что общая скорость движений частицы должна быть наибольшей. Ясно также, что она должна быть наименьшей и, если волнообразные движения равны по силе, полностью исчезать, когда момент наибольшего прямого движения, принадлежащего одному волнообразному движению, совпадает с моментом наибольшего обратного движения, принадлежащего второму. В промежуточном состоянии объединенное волнообразное движение будет обладать промежуточной силой; однако то, по каким законам должна изменяться эта промежуточная сила, нельзя определить без дополнительных данных. Хорошо известно, что в области звука сходные причины вызывают явление, называемое биениями. Два ряда волнообразных движений почти равной величины попеременно то объединяются, то уничтожают друг друга в зависимости от того, когда они более или менее точно совпадают по времени совершения соответствующих движений.

Следствие I. *О цветах бороздчатых поверхностей.* Бойль, по-видимому, был первым, кто наблюдал цвета царапин на полированных поверхностях. Ньютон их не заметил. Мазеас и м-р Брум провели на эту тему несколько экспериментов, однако не получили каких-либо удовлетворительных выводов. Между тем все разнообразие этих цветов очень просто выводится из этого предложения.

Пусть в данной плоскости имеются две отражающие точки, очень близкие друг к другу, и пусть плоскость расположена так, что отраженное изображение светящегося предмета, видимое в ней, окажется совпадающим с этими точками. Тогда очевидно, что длины падающего и отраженного лучей, взятые вместе, равны по отношению к двум точкам, если считать эти

лучи способными к отражению во всех направлениях. Пусть теперь одна из точек опустилась ниже данной плоскости; тогда полный путь света, отраженного от нее, будет удлиннен на величину, которая равна понижению точки, умноженному на удвоенный косинус угла падения [рис. 72].

Теперь, если равные волнообразные движения данных размеров заставить отразиться от двух точек, расположенных достаточно близко для того, чтобы казаться глазу одной точкой, то если только эта линия равна половине ширины полного волнообразного движения², то отражение от пониженной точки будет так интерферировать с отражением от фиксированной точки, что поступательное движение одного будет совпадать с возвратным движением другого и оба они будут уничтожены. Когда же эта линия равна полной ширине волнообразного движения, эффект будет удвоен; а когда она будет равна полутора ширинам, то движения снова уничтожатся, и так далее для значительного числа изменений. Если же отраженные волнообразные движения будут разных типов³, то они будут действовать друг на друга по-разному в зависимости от их отношения к различным длинам той линии, которая является разностью их двух путей и которая может быть названа интервалом запаздывания.

Для того чтобы эффект был более ощутимым, ряд пар точек нужно объединить в две параллельные линии; если поместить несколько таких пар линий рядом друг с другом, то они облегчат наблюдение. Если одну такую линию заставить поворачиваться вокруг другой как вокруг оси, то понижение относительно данной плоскости будет равно синусу угла наклона; и поскольку глаз и светящийся объект остаются фиксированными, разность длин путей будет меняться как этот синус.

Наилучшими объектами для экспериментов⁴ являются превосходные микрометры м-ра Ковентри; наиболее удобны те из них, которые состоят из параллельных линий, проведенных на стекле на расстоянии одной пятисотой дюйма друг от друга. Каждая из этих линий при рассмотрении в микроскоп оказывается состоящей из двух или более тонких линий, в точности параллельных, расположенных на расстоянии, несколько большем, чем одна двадцатая расстояния между смежными линиями. Я расположил один из таких микрометров так, чтобы он отражал солнечный свет под углом 45° , и зафиксировал микрометр таким образом, что, когда он вращался вокруг одной из линий как вокруг оси, я мог измерять угловое движение, и я обнаружил, что наиболее яркий красный свет получается при наклоне в $10^1/4^\circ$, $20^3/4^\circ$, 32° и 45° , синусы которых относятся как числа 1, 2, 3 и 4.

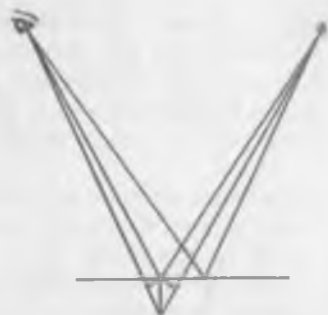


Рис. 72

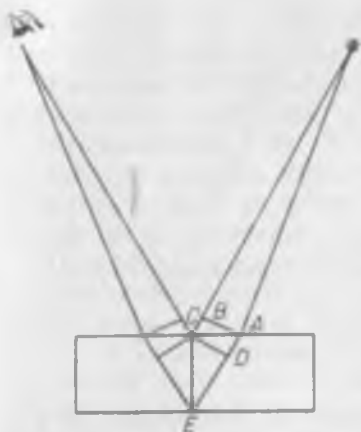


Рис. 73

При всех других углах, когда солнечный свет отражался от поверхности, этот цвет пропадал при изменении наклона и был одним и тем же при равных наклонах в любую сторону.

Этот эксперимент дает очень сильное подтверждение теории. Не возможно вывести никакого его объяснения из предлагавшихся до сих пор гипотез; и я уверен, что трудно будет изобрести какую-нибудь новую гипотезу, объясняющую его. Существует впечатляющая аналогия между разделением цветов и получением музыкальной ноты с помощью последовательных отражений от эквидистантных железных стержней, что, как я обнаружил,

прекрасно согласуется с известной скоростью звука и расстояниями между поверхностями.

Не представляется невероятным, что цвета покровов некоторых насекомых и некоторых других естественных тел, дающих при различном освещении красивейшее разнообразие, могут иметь такое происхождение, а не получаться из тонких пластин. В некоторых случаях одна царапина или бороздка может создавать сходные эффекты из-за отражений от ее противоположных краев.

Следствие II. О цветах тонких пластин. Когда поток света падает на две параллельные преломляющие поверхности, частичные отражения точно совпадают по направлению; в этом случае интервал запаздывания, взятый между поверхностями, так относится к их пути, как удвоенный косинус угла преломления к единице. Так, рисуя AB и CD перпендикулярно лучам [рис. 73], мы получаем, что времена прохождения BC и AD равны, а DE будет составлять половину интервала запаздывания; но DE относится к CE как синус DCE к единице. Следовательно, для того чтобы DE оставалось постоянным или чтобы один и тот же цвет мог отражаться, толщина CE должна меняться как секанс угла преломления CED , что точно согласуется с экспериментами Ньютона, поскольку исправления, которые он ввел, совершенно незначительны.

Пусть среда между поверхностями будет более разреженной, чем окружающие среды. Тогда импульс, отраженный от второй поверхности, встречая последующее волнообразное движение на первой поверхности, будет придавать частицам более разреженной среды полностью останавливать движение более плотной и уничтожать отражение (предложение IV)⁵, в то время как они сами будут испытывать более сильное побуждение к движению, чем если бы они находились в покое, и количество прошедшего света будет увеличено. Таким образом, цвета,

создаваемые отражением, будут уничтожаться, а цвета, создаваемые при прохождении, станут более яркими, когда удвоенная толщина, или интервал запаздывания, оказывается кратной полной ширине волнообразного движения, а при промежуточных толщинах эффект будет обратным в соответствии с наблюдениями Ньютона.

Если окажется, что такие же отношения хорошо выполняются по отношению к тонким пластинам более плотной среды, что, вообще говоря, не кажется невероятным, то необходимо будет принять исправленное доказательство Предложения IV. Однако в любом случае если тонкая пластина будет помещена между менее плотной и более плотной средами, то можно ожидать, что цвета, создаваемые при отражении и прохождении, поменяются местами.

Из ньютоновских измерений толщин, отражающих различные цвета, можно очень точно определить ширину и продолжительность соответствующих им волнообразных движений. Оказывается, что весь видимый спектр укладывается в отношение трех к пяти. Волнообразные движения красного, желтого и синего цветов должны быть связаны по величине как числа 8, 7 и 6, так что интервал от красного до голубого составляет одну четверть. (...) Абсолютная длина и частота каждого колебания представлена в таблице. Предполагается, что свет проходит 500 000 000 000 футов за $8\frac{1}{8}$ мин. (...)

Цвета	Длина волнообразного движения в воздухе, доли дюйма	Число волнообразных движений в одном дюйме	Число колебаний в секунду
Крайний Красный	0,0000266	37 640	463 миллиона миллионов
Промежуточный	0,0000256	39 180	482
Оранжевый	0,0000246	40 720	501
Промежуточный	0,0000235	42 510	523
Желтый	0,0000227	44 000	542
Промежуточный	0,0000219	45 600	561 (= 2^{18} приближенно)
Зеленый	0,0000211	47 460	584
Промежуточный	0,0000203	49 320	607
Синий	0,0000196	51 110	629
Промежуточный	0,0000189	52 910	652
Индиго	0,0000185	54 070	665
Промежуточный	0,0000181	55 240	680
Фиолетовый	0,0000174	57 490	707
Крайний	0,0000167	58 750	735
Среднее по всем цветам, или белый	0,0000225	44 440	547

(...) Если предположить, что свет любого данного цвета состоит из волнообразных движений данной ширины или данной частоты, то эти волнообразные движения должны подчиняться закономерностям, уже исследованным нами для волн на воде и пульсаций звука. Было показано, что для двух равных рядов волн, происходящих из центров, расположенных поблизости один от другого, можно видеть, как в определенных точках они разрушают действия друг друга, а в других точках — удваивают их. На основе сходного взаимодействия были объяснены и биения двух звуков. Теперь мы применим те же принципы к чередующимся соединению и гашению цветов [рис. 74].

Дабы действия двух частей света могли складываться таким образом, необходимо, чтобы эти части исходили из одного источника и достигали одной и той же точки разными путями, но по направлениям, не слишком отличающимся между собой. Эти различия [в путях] могут создаваться либо в одной, либо в обеих частях [света] с помощью дифракции, отражения, преломления или посредством комбинации этих эффектов. Однако простейшим, по-видимому, является случай, когда пучок однородного света падает на экран⁶, имеющий два очень маленьких отверстия или две щели, которые могут рассматриваться как центры расхождения, откуда свет идет во всех направлениях. В этом случае, когда два вновь образованных пучка воспринимаются на поверхности, расположенной так, чтобы пересекать их, свет пучков разделяется темными полосами на части приблизительно равные, но которые становятся шире, когда поверхность удаляется от отверстий, как будто на всех расстояниях от отверстий они стягивают очень близкие по величине углы, и эти части становятся шире в той же пропорции, в какой отверстия располагаются ближе друг к другу. Середина двух частей всегда светлая, и яркие полосы с каждой из сторон находятся на таких расстояниях, что свет, приходящий к ним от одного из отверстий, должен пройти больший путь, чем свет, приходящий от другого, на отрезок, который равен ширине одного, двух, трех или большего числа предполагаемых волнообразных движений, в то время как промежуточные темные области соответствуют разности в половину [ширины] предполагаемых волнообразных движений. В полтора, два с половиной волнообразных движения или более.

Из сравнения различных экспериментов представляется, что ширина волнообразных движений, составляющих крайний красный свет, должна считаться равной в воздухе около одной 36-ти-

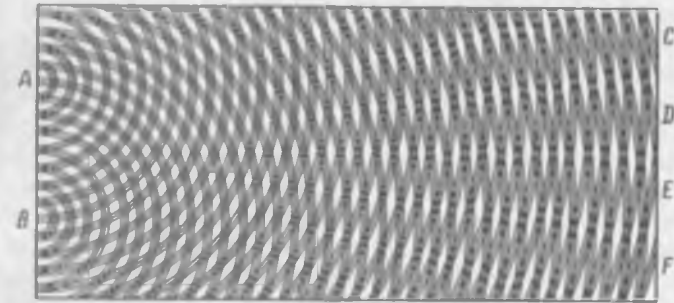


Рис. 74

сячной дюйма, а волнообразных движений, составляющих крайний фиолетовый свет, — около одной 60-тысячной; средняя [ширина] по всему спектру с учетом интенсивности света равна примерно одной 45-тысячной [дюйма]. Из этих величин следует, если вести расчет по известной скорости света, что за одну секунду в глаз должны попадать почти 500 миллионов миллионов самых медленных из таких колебаний. Комбинация двух частей белого, или смешанного, света, когда она рассматривается на большом расстоянии, дает несколько белых и черных полос, соответствующих этому интервалу. При более внимательном рассмотрении оказывается, что складываются вместе отчетливые эффекты бесконечного числа полос различной ширины, так что создается красивое разнообразие оттенков, постепенно переходящих один в другой. Центральная белизна сначала сменяется желтизной, а затем темно-желтым цветом, за которым следует темно-красный, синий и голубой, которые оба кажутся, если смотреть с большого расстояния, темной полосой. Затем появляется зеленый цвет и за ним — темная область, имеющая темно-красный оттенок. Следующие светлые области все более или менее зеленоватые, а темные — пурпурные и красноватые. Красный цвет, по-видимому, настолько доминирует во всех этих эффектах, что красные или пурпурные полосы занимают почти



Рис. 75



то же место в смешанных полосах, как если бы их свет воспринимался отдельно.

Сравнение результатов этой теории с данными экспериментов полностью устанавливает их общее совпадение; оно, однако, указывает на небольшие поправки в части измерений, вызванные какой-то неизвестной причиной, возможно, связанной с внутренней природой дифракции, которая постоянно заставляет части света, проходящие в направлении, очень близком к прямолинейному, делиться на полосы или зоны, немного более широкие, чем внешние полосы, образованные светом, изгибающимся сильнее [рис. 75]. <...>

Комментарий

Перевод с английского отрывков из работ Т. Юнга выполнен С. Р. Филоновичем. Первый отрывок взят из работы: On the theory of light and colours (Bakerian lecture, 1801), «Philosophical Transactions», 1802, vol. 92, Pt. 1, p. 12—48.

Второй отрывок взят из издания: Young T. A course of lectures on natural philosophy and mechanical arts. London, 1807, vol. 1.

¹ Речь идет о работе Юнга «Очерки экспериментов и исследований относительно звука и света».

² Половина ширины волнообразного движения в современной терминологии — это половина длины волны ($\lambda/2$), полная ширина — λ Т. е. разных длин волн.

³ Далее по существу следует описание результатов опытов с дифракционной решеткой.

⁴ Предложение IV гласит: когда волнообразное движение доходит до поверхности, которая является границей сред с различными плотностями, имеет место частичное отражение, по силе пропорциональное разности этих плотностей.

⁵ Отметим, что у Юнга ничего не говорится о способе формирования пучка света, падающего на две щели. Ясно, что без узкой щели — источника — невозможно добиться высокой пространственной когерентности излучения, необходимой для наблюдения интерференционной картины. Это дало основание некоторым историкам науки предположить, что Юнг лишь «придумал» опыт, но сам его не проводил; другие историки считают, что это предположение вряд ли справедливо (см. [3, p. 138]).

Литература

- [1] Собрание сочинений Т. Юнга: Miscellaneous Works of the Late Thomas Young. Ed. by G. Peacock and J. Leitch. Vols. 1—3. London, 1855.
- [2] Wood A. Thomas Young, Natural Philosopher, 1773—1829. Cambridge, 1954.
- [3] Cantor G. Optics after Newton. Theories of light in Britain and Ireland, 1704—1840. Manchester, 1983.
- [4] Кляус Е. М. Томас Юнг. — В кн.: Творцы физической оптики. М., 1973, с. 122—159.



О. Френель

1788 — 1827

О волновой оптике

После публикации работ Т. Юнга, в которых развивалась идея об интерференции света, в оптике установилось довольно странное положение. С одной стороны, волновые представления о свете продемонстрировали свою эффективность; процесс распространения света был осознан как явление, характеризующееся периодичностью. С другой стороны, корпускулярные представления сохраняли свои позиции — теория Юнга почти не нашла сторонников, поскольку не дала отчетливого объяснения прямолинейности распространения света. Кроме того, теория Юнга не смогла объяснить открытое в 1808 г. Малюсом явление поляризации света при отражении от диэлектриков и ряд других эффектов, связанных с поляризацией. Сторонникам корпускулярной теории казалось, что поляризационные эффекты можно объяснить на основе ньютоновской идеи об асимметрии световых частиц; они пытались это сделать, используя весьма изощренные математические средства. Математическая основа волновой теории была очень слабой. Большинство указанных недостатков элементарной волновой теории света было преодолено в работах О. Френеля.

Огюстен-Жан Френель родился 10 мая 1788 г. в местечке Брולי в Нормандии, в семье архитектора. Огюстен обладал слабым здоровьем и, по-видимому, поэтому не блистал сначала успехами в учебе. Однако склонности мальчика определились довольно рано — уже в школе он предпочитал точные науки. Высшее образование он получил в парижской Политехнической школе, а затем в Школе мостов и дорог. После получения звания инженера Френель в течение ряда лет работал в провинции. Рутинная деятельность провинциального инженера, связанная с хозяйственными и административными хлопотами, не могла удовлетворить Френеля, еще в Политехнической школе обратившего на себя внимание математическими исследованиями. Но и этой работы Френель лишился в 1814 г. вследствие политических событий, связанных со Ста днями — временным возвращением Наполеона из ссылки. Однако такое осложнение в жизни Френеля неожиданно обернулось удачей для науки. Молодой инженер получил возможность заняться научными исследованиями. Для приложения своих сил он выбрал оптику.

В это время оптика находилась на подъеме. Вслед за открытием Малюсом поляризации света при отражении (1808) было обнаружено множество интересных (и красивых) оптических явлений, связанных с поляризацией, что еще острее поставило вопрос о природе света. Корпускулярная теория постепенно все усложнялась, поскольку для объяснения новых эффектов приходилось вносить в нее дополнительные усовершенствования.

Интересно, что, приступая к работе, Френель имел очень слабое представление об оптике. В конце 1814 г. он просил брата прислать из Парижа сочинения, из которых он смог бы составить представление о поляризации света. Уже через восемь месяцев он получил результаты, заставившие обратить на молодого исследователя внимание научного мира. Большую роль в становлении Френеля как оптика сыграл секретарь Академии, талантливый экспериментатор Ф. Д. Араго, ставший впоследствии соавтором Френеля при проведении некоторых экспериментов.

В самом начале творческого пути Френеля постигло сильное разочарование. Совершенно не зная о работах Юнга (Френель не знал английского языка), он заново «открыл» закон интерференции, добавив к опытам английского физика лишь несколько новых, среди которых — опыт с «бизеркалами Френеля». Но молодой ученый не пал духом и продолжил свои исследования. В одном из писем Френель писал: «Я довольно философски принял неприятности, пришедшие из Англии. Конечно, они оставили несколько горький осадок, но они не могут заставить меня потерять вкус к физике. Я почувствовал, что на упрек в плагиате нужно отвечать новыми открытиями».

Успех пришел довольно скоро. В начале 1817 г. Академия наук Франции объявила конкурс на лучшую работу по дифракции. Энтузиасты этого конкурса Ж. Б. Био и П.-С. Лаплас — сторонники корпускулярной теории — надеялись, что с ее позиций удастся объяснить опыты Юнга и Френеля. Под давлением Араго и Ампера Френель согласился принять участие в конкурсе и приступил к интенсивным исследованиям, в которых ему помог брат. В результате родилась теория дифракции, основанная на принципе Гюйгенса—Френеля. Ученому удалось, исходя из волновых представлений, объяснить прямолинейность распространения света, т. е. преодолеть главную трудность прежних вариантов волновой теории.

Широкую известность получила история с его мемуаром, представленным комиссии. Один из членов комиссии, С. Д. Пуассон, исходя из представлений теории, сделал не замеченный самим Френелем вывод, что в центре тени, образуемой круглым экраном, должно быть светлое пятно. Араго сразу же поставил эксперимент, который подтвердил справедливость этого предсказания. Волновая теория одержала большую победу.

Успех окрылил Френеля, и дальнейшие опытные исследования и математические расчеты привели его к целому ряду откры-

тий. Это прежде всего вывод о поперечности световых волн, который он сделал в результате совместных с Араго опытов по интерференции поляризованных лучей. Френель не спешил с публикацией открытия, пока не получил новые опытные подтверждения этой революционной идеи, приводящей к сложной модели упругого и твердого эфира. Араго оказался не в состоянии признать поперечность световых волн, и Френелю пришлось в одиночестве отстаивать свою точку зрения.

Предвосхищая многие идеи теории упругости, Френель смог благодаря своей физической интуиции дать теорию явлений отражения, преломления и полного внутреннего отражения, объяснить эмпирически найденные законы Малюса и Брюстера. Он выдвинул фундаментальные идеи в области кристаллоптики, не потерявшие своего значения и сегодня и получившие лишь более строгое математическое обоснование. Развитие Френелем идей о «частичном увлечении эфира» сыграло важную роль в электродинамике движущихся тел и позволило объяснить все эффекты первого порядка относительно $\beta = v/c$ (где v — скорость среды, c — скорость света).

Постепенно к Френелю приходит мировая слава. В 1823 г. он единогласно избирается в Парижскую Академию наук, в 1825 г. становится иностранным членом Лондонского Королевского общества, которое в знак выдающихся открытий в области оптики награждает ученого медалью Румфорда.

Напряженная исследовательская работа окончательно подрывает и без того слабое здоровье Френеля. Уже будучи сильно больным, ученый занимался усовершенствованием системы маячного освещения и добился большого успеха, создав так называемые ступенчатые линзы. Умер Френель 14 июля 1827 г.

Мемуар о дифракции света, удостоенный премии Академии наук

Применение принципа Гюйгенса к явлениям дифракции

43. После того как я указал способ определения результирующей некоторого числа систем световых волн¹, я покажу, как при помощи этих формул и применения одного только принципа Гюйгенса можно объяснить и даже рассчитать все явления дифракции. Этот принцип, который я считаю строгим следствием основной гипотезы², может быть изложен следующим образом. Колебания световой волны в каждой из ее точек могут рассматриваться как сумма элементарных движений, которые были бы посланы в тот же момент всеми действующими изолированно

частями этой волны, рассматриваемой в каком-либо из своих предыдущих положений*.

Из принципа сосуществования малых движений вытекает, что колебания, произведенные в какой-либо точке упругой жидкости при помощи нескольких возмущений, равны результирующей всех возмущений, отправленных в один и тот же момент в эту точку различными центрами колебаний, независимо от их числа, взаимных положений, природы и времени различных возмущений. Будучи общим, этот принцип должен применяться ко всем частным случаям. Я предположу, что все эти возмущения в бесконечном числе имеют один и тот же вид, происходят одновременно, расположены рядом друг с другом в той же плоскости или на одной и той же сферической поверхности. Я сделаю еще одну гипотезу, относящуюся к природе этих возмущений. Я предположу, что скорости, сообщенные частицами, все одинаковым образом направлены именно нормально к сферической поверхности** и, кроме того, пропорциональны сгущениям. Таким образом, частицы не могут иметь обратного движения³.

Этим же путем я мог бы образовать производную волну при помощи совокупности всех этих частичных возмущений. Следовательно, правильно говорить, что колебания световой волны в каждой из ее точек могут рассматриваться как результирующая всех элементарных движений, которые были бы отправлены в один и тот же момент всеми действующими изолированно частями этой волны, рассматриваемой в каком-либо из своих предыдущих положений.

44. Если считать интенсивность первоначальной волны неизменной, то из этого теоретического допущения, как из всех других, вытекает, что эта неизменность будет сохраняться во время ее прохождения, если только ни одна часть волны не будет перехвачена или задержана относительно соседних частей; ибо результирующая элементарных движений, о которых я только что говорил, будет одной и той же во всех точках. Но если одна часть волны задержана путем постановки на ее пути непрозрачного тела, тогда интенсивность в каждой точке будет изменяться

* Я рассматриваю всегда последовательность бесконечного числа волн или общее колебание жидкости. Только в том смысле можно сказать, что две световые волны взаимно уничтожаются, когда они отличаются одна от другой на половину длины волны. Формулы интерференции, которые я только что дал, совершенно неприемлемы к случаю одной изолированной волны, которая, впрочем, и не встречается в действительности.

** Могут существовать производные волны, в которых направление абсолютных скоростей, сообщенных частицам, не будет нормальным к поверхности волны. Размышляя об особых законах интерференции поляризованных лучей, я убедился уже после редактирования этого мемуара, что световые колебания происходят перпендикулярно лучам или параллельно поверхности волны. Соображения и расчеты, содержащиеся в этом мемуаре, так же хорошо согласуются с этой новой гипотезой, как и с предыдущей, потому что они независимы от реального направления колебаний и предполагают лишь, что эти колебания происходят одинаковым образом у всех лучей, образованных одной и той же системой волн, которые совместно с другими участвуют в образовании каемок.

с ее расстоянием от края тени и эти изменения будут особенно заметны по соседству с касательными лучами.

Пусть C — световая точка, AG — непрозрачное тело, AME — волна, пришедшая в A и частично перехваченная телом [рис. 76]. Я предполагаю, что она разделена на бесконечное число маленьких дуг Am' , $m'm$, mM , Mn , nn' , $n'n''$ и т. д. Для того чтобы получить интенсивность света в точке P , в каком-нибудь из следующих положений волны BPD необходимо искать результирующую всех элементарных волн, которые были бы посланы туда каждой из частей первоначальной волны, если бы эта часть действовала изолированно.

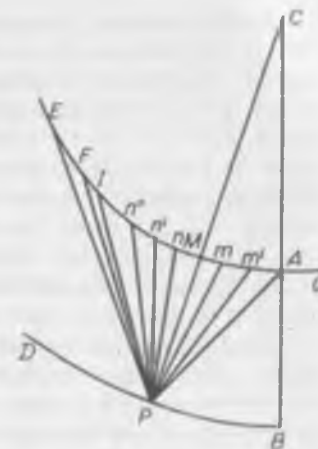


Рис. 76

Так как импульс, который был сообщен всем частям первоначальной волны, имел направление нормали, то движения, которые эти части стремятся передать эфиру, должны быть более интенсивными в этом направлении, чем в каком-либо другом; и лучи, которые были бы оттуда испущены, если бы они действовали изолированно, были бы тем более слабыми, чем более они отклонялись бы от этого направления.

45. Изыскание закона, согласно которому интенсивность лучей варьирует около каждого центра возмущения, представляло бы, безусловно, большие трудности; но, к счастью, нет необходимости знать этот закон, так как легко видеть, что эффекты, вызванные лучами, уничтожаются почти полностью, как только лучи заметно отклонятся от нормали. Таким образом, те лучи, которые заметно влияют на количество света, получаемое каждой точкой, могут рассматриваться как лучи, обладающие равной интенсивностью*.

* Когда центр возмущения испытал уплотнение, расширяющая сила стремится толкать молекулы во всех направлениях; и если они не имеют обратных движений, то это происходит только потому, что их начальные скорости, направленные вперед, уничтожают те скорости, которые расширение стремится придать им в обратном направлении. Но из этого не следует, что возмущение может распространяться лишь следуя направлению первоначальной скорости, так как, например, расширяющая сила в перпендикулярном направлении комбинируется с первоначальным импульсом без того, чтобы эффекты этой силы были этим ослаблены. Ясно, что интенсивность произведенной таким образом волны должна значительно изменяться в различных точках ее окружности не только по причине первоначального импульса, но еще и потому, что уплотнения около центра возмущенной части не следуют одному и тому же закону. Изменения в интенсивности производной волны неизбежно должны подчиняться закону непрерывности и по этой причине могут рассматриваться как незначительные в очень малом угловом интервале, особенно вблизи от нормали, породившей их волны; ибо составляющие первоначальных скоростей частиц по какому-либо направлению пропорциональны косинусу угла, который это направление образует с нормалью. (...)

Действительно, рассмотрим значительно наклоненные лучи EP , FP , IP , сходящиеся в точке P , которую я предполагаю находящейся от фронта волны BD на расстоянии, равном большому числу волн. Возьмем две дуги EF и FI такой длины, что разности $EP - FP$ и $FP - IP$ равны половине длины волны. Вследствие большого наклона лучей и малости половины длины волны сравнительно с длиной лучей эти две дуги будут почти равны между собой и лучи, которые они посылают в точку P , приблизительно параллельны. Таким образом, вследствие различия на половину длины волны, которое существует между соответствующими лучами двух дуг, их действия взаимно уничтожаются.

Следовательно, можно предположить, что все лучи, отправляющиеся различными части первоначальной волны AE в точку P , обладают равной интенсивностью, потому что единственные лучи, для которых эта гипотеза была бы неточной, не имеют заметного влияния на количество света, получаемого этой точкой. Исходя из этого же соображения можно также для упрощения расчета результирующей всех этих элементарных волн рассматривать их колебательное движение как происходящее в одном и том же направлении, учитывая малую величину углов, которые лучи образуют друг с другом. Таким способом вся проблема оказывается сведенной к той, которую мы уже разрешили: найти результирующую какого-либо числа систем параллельных волн равной длины, интенсивности и относительные положения которых известны.

В данном случае интенсивности пропорциональны длине освещающих дуг и относительные положения даны значениями разностей пройденных путей.

46. Собственно говоря, мы рассматривали лишь сечение волны, образованное плоскостью, перпендикулярной спроецированному в точку A краю экрана. Рассмотрим теперь волну во всем ее протяжении, представив себе ее разделенной на бесконечно узкие лунки равноотстоящими меридианами, перпендикулярными плоскости рисунка [рис. 76]. К ним можно было бы приложить те же рассуждения, которые мы только что сделали для одного сечения волны, и показать, что лучи с заметным наклоном взаимно уничтожаются.

Эти параллельные краю непрозрачного экрана лунки распространены на большое протяжение для рассматриваемого нами случая, когда световая волна перехватывается только с одной стороны. Интенсивность результирующей всех колебаний, которые лунки направляют в точку P , будет той же самой для каждого из них; ибо лучи, испускаемые этими лунками, должны рассматриваться как имеющие равную интенсивность, по крайней мере для весьма ограниченного участка порождающей их волны, который имеет заметное влияние на свет, направленный в точку P . Интенсивности лучей должны считаться равными вследствие чрезвычайно малой разности между пройденными путями. Более того, каждая элементарная результирующая бу-

дет, очевидно, отставать на одну и ту же величину по отношению к лучу, исходящему из точки лунки, наиболее близкой к точке P , т. е. из точки, в которой эта лунка пересекается с плоскостью рисунка. Таким образом, интервалы между этими элементарными результирующими будут равны разностям путей, пройденных лучами AP , $m'P$, mP и т. д., находящимися в плоскости рисунка, и интенсивности этих элементарных результирующих будут пропорциональны дугам Am' , $m't$, tM и т. д. Для того чтобы получить интенсивность общей результирующей, нужно, следовательно, произвести тот же самый подсчет, к которому мы пришли при рассмотрении только сечения волны плоскостью, перпендикулярной краю непрозрачного экрана*.

47. Прежде чем вычислить аналитическое выражение этой результирующей, я сперва выведу из принципа Гюйгенса те следствия, которые можно из него вывести при помощи простых геометрических соображений.

Пусть AG — непрозрачное тело, достаточно узкое, чтобы можно было видеть полосы внутри его тени на расстоянии AB . Пусть C — точка, освещающая тело, BD — белый картон, где получаются изображения каемок, или плоскость фокуса лупы, при помощи которой их наблюдают [рис. 77].

Предположим, что первоначальная волна разделена на маленькие дуги Am , mm' , $m'm''$, $m''m'''$, ..., Gn , nn' , $n'n''$, $n''n'''$, ... так, что лучи, проведенные из точки P , которую считают находящейся внутри тени, к точкам двух смежных делений, отличаются друг от друга на половину длины волны. Все маленькие волны, направляемые в точку P элементами каждой из этих дуг, будут в полном несовпадении с элементарными волнами, испускаемыми соответствующими частями двух дуг, между которыми заключена рассматриваемая дуга. Таким образом, если все эти дуги были бы равны, то лучи, направляемые ими в точку P , взаимно бы уничтожались, за исключением крайней дуги tA , лучи которой сохранили бы половину своей интенсивности, так как половина света, отправленного дугой mm' , с которой дуга tA находится в

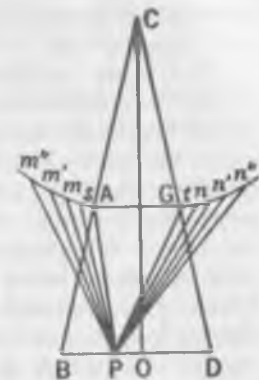


Рис. 77

* Поскольку край экрана прямолинеен, для определения положений темных и ярких полосок и их относительных интенсивностей достаточно рассмотреть сечение волны, образованное плоскостью, перпендикулярной краю экрана. Если же край экрана криволинеен или если он составлен из отрезков прямых, находящихся друг к другу под некоторыми углами, тогда необходимо интегрировать по двум перпендикулярным направлениям или по окружности около рассматриваемой точки. Этот последний метод более прост в нескольких частных случаях, например когда речь идет о вычислении интенсивности света в месте проекции центра какого-либо экрана или отверстия круглой формы.

полном несовпадении, уничтожается половиной света предыдущей дуги $m''m'$.

Эти дуги приблизительно равны, когда лучи, сходящиеся в точке P , достаточно наклонены относительно нормали. Тогда результирующая волна приблизительно соответствует середине mA единственной дуги, которая производит заметный эффект, и, таким образом, отличается на одну четверть длины волны от элементарной волны, исходящей от края A непрозрачного тела. То же самое справедливо относительно и другой части Gn падающей волны, причем степень совпадения или несовпадения между световыми колебаниями, которая проявляется в точке P , определяется разностью длин двух лучей sP и tP , исходящих из середины дуг Am и Gn , или, что сводится к тому же, разностью между двумя лучами AP и GP , исходящими от самых краев непрозрачного тела. Таким образом, если рассматриваемые внутренние каемки являются достаточно удаленными от краев геометрической тени, то можно без заметной ошибки применить к ним формулу, основанную на гипотезе, что центры дифрагирующих волн находятся на самых краях непрозрачного тела. Но по мере того, как точка P приближается к B , дуга Am становится все более значительной по сравнению с дугой mm' , дуга mm' — по сравнению с дугой $m'm''$ и т. д.; точно так же в дуге mA элементы, прилегающие к точке A , становятся заметно больше тех, которые расположены около точки m , соответствуя равным разностям пройденных путей.

Отсюда следует, что эффективный луч sP^* не должен уже более быть средним между крайними лучами mP и AP , но должен больше приближаться к длине этого последнего.

Наоборот, на другой стороне непрозрачного тела разность между лучом GP и эффективным лучом tP тем более приближается к одной четверти длины волны, чем более точка P удаляется от D . Таким образом, разность в пройденных путях изменяется более быстро между эффективными лучами sP и tP , чем между лучами AP и GP . Следовательно, каемки, которые находятся вблизи точки B , должны быть немного менее удалены от центра тени, чем это указывается формулой, основанной на первой гипотезе. (...)

**Мемуар о действии, которое
оказывают друг на друга лучи
поляризованного света
(совместно с Ф. Араго)**

4. (...) Принцип интерференции показывает, что лучи, исходящие из двух световых фокусов, порожденных одним источником.

* После этих слов в рукописи добавлено: «Вариант, которым мы обязаны д-ру Юнгу».

образуют в точке встречи темные и яркие полосы, при этом нет необходимости пользоваться в опыте каким-либо непрозрачным телом.

Для разрешения вопроса было бы, таким образом, достаточно попробовать, не дали ли бы подобный результат два изображения, образованные путем помещения ромбоида из известкового шпата перед световой точкой. Поскольку, согласно теории двойного преломления, необыкновенный луч в углекислом кальции имеет большую скорость, чем обыкновенный, следовало до того, как осуществить встречу лучей, искусственно компенсировать этот излишек скорости. Для этого, основываясь на опыте г-на Араго, который был опубликован в *Анналах*, г-н Френель поместил на пути только необыкновенного пучка лучей стеклянную пластинку, толщина которой была определена расчетом таким образом, что, проходя через пластинку, при перпендикулярном падении этот пучок терял почти все то опережение по сравнению с обыкновенным пучком, которое он приобрел в кристалле; исходя из этого путем легкого наклона пластинки можно было получить полную компенсацию в указанном отношении. Несмотря на это, встреча двух пучков, поляризованных в противоположных направлениях, не вызывала образования каких-либо полос.

В другом опыте, чтобы компенсировать эффект разности скоростей двух лучей, г-н Френель заставлял оба луча падать на маленькое неамальгмированное стеклянное зеркало, толщина которого была рассчитана так, что необыкновенный луч, отражаясь перпендикулярно от второй стороны стекла, терял в скорости в результате своего двойного пути через стекло больше того, что он в ней выиграл, проходя через кристалл. Постепенное изменение наклона должно было в дальнейшем привести к полной компенсации. Несмотря на это, ни под каким углом падения обыкновенные лучи, отраженные первой поверхностью стекла, не образовывали заметных полос, смешиваясь с лучами (необыкновенными), отраженными второй поверхностью.

5. Г-ну Френелю удалось преодолеть недостаток, которым обладает предыдущий опыт, как опыт, основывающийся на теоретическом соображении, и, более того, сохранить у света всю его интенсивность при помощи следующего приема. Распилив пополам ромбоид исландского шпата, он поместил две половинки его, одну перед другой, так, чтобы главные сечения были перпендикулярны друг другу. При таком расположении обыкновенный пучок первого кристалла испытал необыкновенное преломление во втором кристалле; и обратно: пучок, который сначала распространялся по пути необыкновенного луча, преломлялся затем обыкновенным образом. Через этот аппарат было видно только двойное изображение световой точки. Каждый пучок последовательно испытывал два вида преломления. Суммы путей, пройденных каждым из них в обоих кристаллах вместе, должны были быть равными, поскольку, по предположению, оба эти кристалла

имели одну и ту же толщину. Таким образом, все, что относится к скоростям и к длине пройденных путей, оказывалось компенсированным. Несмотря на это, эти две системы поляризованных в противоположном смысле лучей⁴, интерферируя, не вызывали образования каких-либо сколько-нибудь заметных каемок. Добавим еще, что, опасаясь, что оба куска ромбоида, возможно, могли не иметь в точности той же самой толщины, мы считали нужным при производстве каждого опыта слегка и весьма медленно изменять угол, под которым падающие лучи встречались со вторым кристаллом.

6. Метод, который был, с другой стороны, разработан г-ном Араго для производства этого же самого опыта, был независим от двойного преломления. Уже давно известно, что если сделать в тонком листе две очень узкие щели, расположенные на небольшом расстоянии одна от другой, и осветить их светом из одной-единственной световой точки, то за этим листом образуются весьма яркие каемки, происходящие от того действия, которое оказывают лучи правой щели на лучи противоположной щели. Для того чтобы поляризовать в противоположных направлениях лучи, образуемые этими двумя отверстиями, г-н Араго хотел сначала использовать тонкий агат, распилить его посередине и поместить каждую половину перед одной из щелей, чтобы части агата, которые до того были смежными, оказались расположенными перпендикулярно друг другу. Это расположение должно было, очевидно, вызвать ожидаемый эффект, но, не имея в данное время под рукой подходящего агата, г-н Араго предложил заменить его двумя стопами из пластинок, придав им необходимую для успеха опыта тонкость путем составления их из листочков слюды.

Для этого мы выбрали пятнадцать таких листочков, по возможности наиболее чистых, и наложили их друг на друга. Затем при помощи острого инструмента эта стопа была разрезана пополам. Отсюда ясно, что обе полученные в результате рассеяния частичные стопы должны были иметь, с весьма большим приближением, ту же самую толщину, по крайней мере в тех частях, которые до этого соприкасались, даже если бы составляющие стопу пластинки были заметно призматическими. Эти стопы почти полностью поляризовали проходивший через них свет при угле падения 30° , считаемом от поверхности. Каждая из этих стоп была именно под этим углом помещена перед каждой из щелей в медном листике.

Когда обе плоскости падения были параллельны, т. е. когда обе стопы были наклонены в том же направлении (сверху вниз, например), четко были видны полосы, образованные интерференцией двух поляризованных пучков, совершенно такие же, как если бы заставляли действовать друг на друга два луча обычного света. Если же поворачивали одну из стоп около падающего луча, то обе плоскости падения становились перпендикулярными друг другу. Если, например, первая стопа оставалась

неизменно наклоненной сверху вниз, а вторая стопа была наклонена слева направо, то исходящие пучки, поляризованные при этом в противоположных направлениях, не образовывали большие в месте своей встречи никаких заметных полос.

Те предосторожности, которые были нами соблюдены для придания одинаковой толщины обоим стопам, повели к тому, что, помещая их перед щелями, мы обращали внимание на то, чтобы свет проходил через них в тех частях, которые до распиливания большой стопы соприкасались друг с другом. Впрочем, мы видели — и это обстоятельство устраняет все затруднения и возражения, которые можно было бы сделать в этом отношении, — что каемки появлялись, как обычно, когда лучи бывали поляризованы в одном и том же направлении. Тем не менее добавим, что медленное и постепенное изменение наклона одной из стоп никогда не вызывало появления полос в тех случаях, когда плоскости падения света были перпендикулярны друг другу. (...)

9. Вернемся теперь к аппарату из слюдяных стоп и предположим, что плоскости падения перпендикулярны, так что пучки света, прошедшие через обе щели, будут поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. Поместим между медным листом и глазом двоякопреломляющий кристалл, главное сечение которого образует угол 45° с плоскостями падения. Согласно известным законам двойного преломления, каждый из лучей, прошедших через слюдяные стопы, разделится в кристалле на два луча одинаковой интенсивности, поляризованные в двух перпендикулярных направлениях, одно из которых является направлением главного сечения.

Следовательно, в этом опыте можно было бы ожидать увидеть ряд каемок, образованных действием обыкновенного светового пучка справа на обыкновенный световой пучок слева, и второй, совершенно подобный ряд каемок, происшедших от интерференции двух необыкновенных пучков. Тем не менее не обнаруживается ни малейшего следа этих каемок, и все четыре световых пучка, встречаясь, дают только непрерывную полосу света*.

Этот опыт, идея которого принадлежит г-ну Араго, доказал нам, что два луча, которые были первоначально поляризованы в противоположных направлениях, могут быть затем приведены к одной и той же плоскости поляризации, не приобретая, однако, в результате этого способности влиять друг на друга. (...)

* Если бы пластинка, помещенная между медным листом и глазом, была тонкой и мало разделяла изображения, можно было бы объяснить отсутствие полос, предполагая, что те, которые являются результатом интерференции обыкновенных пучков, накладываются на другие, если еще допустить, что яркие полосы первой системы соответствуют темным полосам второй системы и наоборот.

Но недостаточность такой гипотезы для объяснения явления доказывается помещением ромбоида известкового шпата между глазом и указанным выше кристаллом. При известных положениях этот ромбоид должен был бы разделять для системы полос, так как они поляризованы в противоположных направлениях, однако, сделав именно это, нельзя заметить даже следов каких-либо полос.

10. (...) Опыты, которые мы только что описали, в конце концов приводят к таким следствиям.

1. В тех же условиях, в которых два луча обыкновенного света кажутся взаимно уничтожающими, два луча, *поляризованные в противоположных направлениях*, не оказывают друг на друга никакого заметного действия.

2. Лучи света, поляризованные в одном направлении, действуют друг на друга, как естественные лучи. Таким образом, для этих двух видов света явления интерференции являются абсолютно одинаковыми.

3. Два луча, *первоначально поляризованных в противоположных направлениях*, могут быть затем возвращены к одной плоскости поляризации, *не приобретая, несмотря на это, способности действовать друг на друга*.

4. Два луча, поляризованных в противоположных направлениях и возвращенных затем к одинаковым поляризациям, действуют друг на друга, как и естественные лучи, если они происходят от светового пучка, который первоначально был поляризован в одном-единственном направлении.

5. В явлениях интерференции, образованных лучами, испытывавшими двойное преломление, место каемок определяется не только разностью путей и разностью скоростей; при некоторых обстоятельствах, которые нами были указаны, необходимо, кроме того, учитывать разность в половине длины волны. (...)

Комментарий

Перевод с французского работ О. Френеля выполнен З. А. Цейтлинным. Орывки из работ воспроизводятся по изданию: Френель О. Избранные труды по оптике. М., 1955.

¹ Этот способ изложен в § 35—42 данного мемуара.
² Речь идет о волновой гипотезе.

³ Отсутствие обратной волны не обосновано Френелем достаточно строго; позднее это сделал Г. Кирхгоф.

⁴ Выражения «лучи, поляризованные в одном и том же смысле» или «в противоположном смысле» введены Малюсом и означают совпадение или взаимную перпендикулярность плоскостей поляризации.

Литература

- [1] Собрание сочинений О. Френеля: *Oeuvres complètes d'Augustin Fresnel. Publ. par H. de Senarmont, E. Verdet et L. Fresnel. B 3 t. Paris, 1866—1870.*
- [2] Boutry G. A. Augustin Fresnel: his time, life and work, 1788—1827. London, 1949.
- [3] Ландсберг Г. С. Огюстен Френель. Очерк жизни и деятельности. — В кн.: Френель О. Избранные труды по оптике. М., 1955, с. 7—69.
- [4] Верде Э. Труды Огюстена Френеля. — В кн.: Творцы физической оптики. М., 1973, с. 180—206.



Г. Х. Эрстед

1777—1851

О связи между электричеством и магнетизмом

В течение веков развитие учений об электричестве и магнетизме происходило практически независимо, хотя издавна было отмечено сходство электрических и магнитных взаимодействий: для обоих типов взаимодействий наблюдались как притяжение, так и отталкивание. Процесс формирования единого учения об электромагнетизме, завершившийся созданием теории электромагнитного поля Максвелла, начался с открытия датского ученого Г. Х. Эрстеда.

Ганс Христиан Эрстед родился 14 августа 1777 г. в г. Рудкебинге на о. Лангеланн (Дания) в семье аптекаря. Он учился в Копенгагенском университете, который окончил в 1797 г., получив диплом фармацевта.

Вся творческая жизнь Эрстеда прошла в стенах родного университета. Здесь в 1799 г. он защитил докторскую диссертацию, здесь же начиная с 1806 г. работал в качестве профессора.

Научные интересы ученого были разносторонними. Они охватывали физику, химию и философию. Большое влияние на формирование научного мировоззрения Эрстеда оказала философия Шеллинга. Эрстед глубоко проникся идеей о единстве сил природы и уже в 1812—1813 гг. высказал идею о возможной связи электрического тока и магнетизма. Однако обнаружить такую связь на опыте ему удалось лишь в 1820 г., когда во время лекционной демонстрации было отмечено действие тока на магнитную стрелку. Эрстед прекрасно понимал значение своего открытия и сообщил о нем, издав небольшую брошюру (всего четыре страницы текста) и разослав ее многим известным европейским ученым. Его неожиданные и удивительно простые опыты с отклонением магнитной стрелки вблизи проводника с током были сразу же проверены рядом ученых. Эта проверка принесла и новые результаты, которые в совокупности составили экспериментальную основу первой теории электромагнетизма — электро-

динамики Ампера. Поэтому работа Эрстеда стала крупнейшей вехой в истории физики, хотя объяснение обнаруженного эффекта, данное датским ученым, было ошибочным.

Эрстед и после главного открытия своей жизни занимался вопросами электромагнетизма. В 1821 г. он одним из первых высказал мысль о связи света с электрическими и магнитными явлениями. В 1822—1823 гг. Эрстед независимо от Фурье переоткрыл термоэлектрический эффект и создал первый термоэлемент. Эрстед занимался также проблемами акустики и молекулярной физики (он, в частности, изучал отклонения от закона Бойля — Мариотта, изобрел пьезометр).

Эрстед вел большую просветительскую деятельность. Многие годы он был директором копенгагенской Политехнической школы, а в 1824 г. организовал общество по распространению естествознания.

За научные заслуги Эрстед был избран членом многих академий европейских стран, в том числе Петербургской АН. Эрстед умер 9 марта 1851 г.

Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку

Первые опыты по вопросу, рассматриваемому в настоящем труде, связаны с лекциями об электричестве, гальванизме и магнетизме, читанными мною прошедшей зимой. Основной вывод из этих опытов состоит в том, что магнитная стрелка отклоняется от своего положения равновесия под действием вольтаического аппарата и что этот эффект проявляется, когда контур замкнут, и не проявляется, когда контур разомкнут. Именно потому, что контур оставался разомкнутым, не увенчались успехом попытки такого же рода, сделанные несколько лет тому назад известными физиками. Так как мои первые опыты производились с недостаточно мощным аппаратом и явления не обнаруживались со всей той четкостью, которая была желательна ввиду их важности, то я попросил моего друга г-на Эсмарха, советника Королевского суда, присоединиться ко мне, чтобы повторить опыты посредством более значительного аппарата. Г-н президент Влейгель, кавалер ордена Дании, любезно согласился ассистировать при этих экспериментах. Свидетелями были также известный г-н Рейнгардт, весьма искусный экспериментатор г-н Якобсен и, наконец, доктор философии Цейзе, профессор медицины и выдающийся химик.

Чаще всего я экспериментировал один, но всякий раз, когда мне удавалось наблюдать какое-нибудь замечательно явление, я повторял опыт в присутствии этих ученых.

В дальнейшем я совершенно не буду входить в подробности тех идей, которые руководили мной при моих исследованиях, так

как это не может содействовать уяснению полученного результата. Я ограничусь только фактами, которые делают этот результат очевидным.

Наш гальванический аппарат состоял из двадцати прямоугольных медных ящиков, имеющих в длину и высоту около 12 дюймов, а ширину $21\frac{1}{2}$ дюйма. Каждый ящик состоит из двух медных пластинок, одна из которых оканчивается отростком, поддерживающим цинковую пластинку в жидкости следующего ящика. Этой жидкостью служит вода, к которой прибавлены 1/60 по весу серной кислоты и 1/60 азотной кислоты. Опущенная в жидкость часть цинковой пластинки представляет собой квадрат со стороной около 10 дюймов. Можно, впрочем, пользоваться и менее мощными аппаратами: достаточно, чтобы они могли накаливать докрасна металлическую проволоку.

Противоположные концы гальванического аппарата соединяют при помощи металлической проволоки, которую мы будем называть для краткости проволокой-проводником или соединительной проволокой. Действия, которые происходят в этом проводнике и в окружающем его пространстве, мы назовем электрическим конфликтом.

Предположим, что прямолинейный участок этой проволоки протянут над подвешенной обычным способом магнитной стрелкой параллельно направлению последней. Проволоку оставляют достаточно гибкой, чтобы этот участок можно было по желанию перемещать.

В данном случае стрелка изменит свое положение и полюс, находящийся под той частью соединительной проволоки, которая ближе к отрицательному концу гальванического аппарата, отклонится к западу.

Если расстояние от проволоки до стрелки не превосходит $\frac{3}{4}$ дюйма, отклонение составляет около 45° . Если расстояние увеличивать, то угол пропорционально уменьшается. Впрочем, абсолютная величина отклонения изменяется в зависимости от мощности аппарата.

Перемещая соединительную проволоку к востоку или к западу, оставляя ее параллельной направлению стрелки, мы ничего не изменяем, кроме величины самого действия. Отсюда следует, что наблюдаемый эффект не может быть приписан притяжению, так как если бы отклонение стрелки зависело от притяжений или отталкиваний, то полюс, который приближается к проволоке, когда последняя находится к востоку, должен был бы приближаться к ней и тогда, когда эта проволока переходит к западу.

Проводник может быть образован из нескольких проволок или лент, соединенных в пучок. Природа металла безразлична, и если она имеет какое-либо значение, то, возможно, только в отношении величины производимого эффекта. Мы применяли с одинаковым успехом проволоку из платины, золота, серебра, латуни и железа, свинцовые и оловянные ленты и ртуть. Если в

проводник включить водяной столб, то эффект не исчезает полностью, по крайней мере если промежуток имеет всего лишь несколько дюймов в длину. Действие соединительной проволоки на магнитную стрелку передается сквозь стекло, металлы, дерево, воду, смолу, гончарные сосуды и камни. Пластины из стекла, металла или дерева, проложенные в отдельности и все вместе между проводником и стрелкой, по-видимому, не уменьшают заметным образом влияния последних друг на друга. То же самое относится к диску электрофора, к пластинке из порфира или к наполненной водой тарелке. Опыт показал, что тот же эффект получается, если стрелка помещена в латунный ящик, наполненный водой.

Вряд ли нужно указывать, что такая передача действий сквозь различные вещества не наблюдалась еще ни у обычного электричества, ни у электричества вольтаического¹. Таким образом, действия, которые проявляются при электрическом конфликте, весьма отличны от тех, которые могут произвести одно или другое из двух электричеств².

Если соединительная проволока расположена горизонтально под стрелкой, то эффект будет таким же, как и тогда, когда проволока расположена сверху, но действие будет направлено в обратную сторону. Иными словами, полюс стрелки, под которым находится та часть проволоки, которая ближе всего к отрицательному концу батарее, отклоняется в этом случае к востоку. Чтобы легче запомнить эти результаты, мы будем пользоваться следующей формулой: полюс, который видит отрицательное электричество входящим над собой, отклоняется к западу, а полюс, который видит его входящим под собой, отклоняется к востоку.

Если смещать соединительную проволоку в горизонтальной плоскости так, чтобы она образовывала все больший и больший угол с магнитным меридианом, отклонение стрелки увеличивается, если проволока смещается в ту же сторону, в какую происходит это отклонение. Оно уменьшается, если смещение проволоки производится в обратную сторону.

В том случае, когда соединительная проволока расположена точно в горизонтальной плоскости, в которой может двигаться уравновешенная надлежащим образом стрелка, и когда проволока параллельна направлению стрелки, она не отклоняет ее ни к западу, ни к востоку, а лишь стремится сместить ее в плоскости наклонения. Полюс, более близкий к концу, через который входит отрицательное электричество, опускается, когда он имеет проволоку к западу от себя, и поднимается, когда проволока находится к востоку от него.

Когда соединительная проволока расположена перпендикулярно меридиану выше или ниже стрелки, последняя сохраняет свое положение равновесия, если, однако, проволока не очень близка к одному из полюсов: он поднимается, когда вход происходит через западную часть проволоки, и опускается, когда вход происходит через восточную часть.

Если проволока помещена вертикально перед одним из полюсов стрелки и верхняя часть проволоки сообщается с отрицательным концом батареи, то полюс идет к востоку. Если проволока, оставаясь вертикальной, находится между полюсом и серединой стрелки, этот полюс обращается к западу. Если верхняя часть проволоки сообщается с положительным концом, действия имеют противоположные направления.

Если согнуть соединительную проволоку так, чтобы образовались две параллельные ветви, то такая система в различных случаях отталкивает или притягивает и тот и другой полюсы стрелки. Предположим, что система расположена против одного из полюсов, причем плоскость ветвей перпендикулярна магнитному меридиану, восточная часть сообщается с отрицательным полюсом батареи и западная — с положительным: более близкий полюс стрелки отталкивается к востоку или к западу в зависимости от положения плоскости. Если изменить направление соединения с батареей, полюс, наоборот, притягивается. Если плоскость ветвей пересекает стрелку между полюсом и серединой, происходят такие же явления, но обратного направления.

Латунная стрелка, подвешенная так же, как магнитная стрелка, совершенно не приводится в движение под влиянием соединительной проволоки. То же самое относится к стрелке из стекла или из гуммилака.

Рассмотрим вкратце на основании всех этих фактов, как можно представить себе это явление.

Электрический конфликт действует только на магнитные частицы вещества. Все немагнитные тела проницаемы для электрического конфликта. Однако магнитные тела или, лучше сказать, магнитные частицы этих тел сопротивляются прохождению этого конфликта, так что они оказываются увлеченными столкновением противоположных действий.

Согласно изложенным фактам, электрический конфликт, по-видимому, не ограничен проводящей проволокой, но имеет довольно обширную сферу активности вокруг этой проволоки.

Кроме того, из сделанных наблюдений можно заключить, что этот конфликт образует вихрь вокруг проволоки. Иначе было бы непонятно, как один и тот же участок проволоки, будучи помещен под магнитным полюсом, относит его к востоку, а находясь под полюсом, увлекает его к западу.

Именно вихрям свойственно действовать в противоположных направлениях на двух концах одного диаметра.

Вращательное движение вокруг оси, сочетающееся с поступательным движением вдоль этой оси, обязательно дает винтовое движение. Однако, если я не заблуждаюсь, такое винтовое движение, по-видимому, не является необходимым для объяснения какого-либо из явлений, наблюдавшихся до сих пор.

Все действия, которые наблюдаются по отношению к северному полюсу и были описаны нами выше, легко объясняются, если предположить, что отрицательная электрическая сила или мате-

рия описывает спираль слева направо и действует на северный полюс, не влияя на южный. Действия на южный полюс объясняются подобным же образом, если допустить, что положительная электрическая материя движется в противоположном направлении и обладает свойством действовать на южный полюс, не влияя на северный. Чтобы ясно представить себе этот закон и видеть, как он согласуется с фактами, повторение опытов лучше всяких объяснений. Весьма полезно для лучшей ориентировки в опытах как-нибудь отметить на самой проволоке направление электрических сил.

• Я добавляю только еще одно слово: в работе, опубликованной семь лет тому назад³, я доказал, что теплота и свет являются результатом электрического конфликта.

Из наблюдений, которые я привел, можно заключить, что этот конфликт создает, кроме того, вихревые движения; я убежден, что в этих движениях будет найдено объяснение явлений, известных под названием *поляризации света*.

Комментарий

Перевод с латинского работы Г. Х. Эрстеда выполнен Я. Г. Дорфманом. Перевод воспроизводится по изданию: Ампер А.-М. Электродинамика. М., 1954

Одно из названий электрического тока во времена Эрстеда.

Утверждение неверно. Именно электрический ток («вольтаическое электричество») и есть источник магнитного действия.

Эрстед подразумевает свою работу «Исследования тождества электрических и химических сил», опубликованную в 1813 г. в Париже.

Литература

- [1] Собрание сочинений Г. Х. Эрстеда: Oersted Hans Christian Aanden in naturen. Kobenhavn.
- [2] Dübner B. Oersted and the discovery of electromagnetism. N. Y. — London, 1962.
- [3] Цагарова Г. К. Основоположник электромагнетизма К 200-летию со дня рождения Ханса Христиана Эрстеда // Электросвязь. 1977. № 9. С. 63—66.
- [4] Явелов Б. Е. Случайное и закономерное в истории физических открытий. М., 1982, гл. «От Вольты до Эрстеда».



А.-М. Ампер

1775—1836

Об электродинамике

Незамысловатые опыты Эрстеда, обнаружившего влияние электрического тока на магнитную стрелку, произвели на ученых всего мира неизгладимое впечатление. Это объяснялось теми возможностями, которые открывались перед физикой на пути объединения двух ее больших разделов — учений об электричестве и магнетизме. Первая попытка построения единой теории электрических и магнитных явлений была предпринята французским ученым А.-М. Ампером, который дал имя новой области физической науки — электродинамике.

Андре-Мари Ампер родился 22 января 1775 г. в Лионе в семье коммерсанта. Мальчик очень рано проявил выдающиеся способности. Он очень рано научился читать, к двенадцати годам самостоятельно разобрался в дифференциальном исчислении. Чтобы читать в подлиннике классиков математики и механики, таких, как Л. Эйлер и Д. Бернулли, он быстро овладел латинским языком. В четырнадцать лет он уже проштудировал все двадцать томов «Энциклопедии» Дидро и Даламбера. Целыми днями Ампер просиживал над книгами и получил всестороннее образование, не посещая никаких учебных заведений.

В 1793 г. в жизни Ампера произошло трагическое событие — по обвинению в контрреволюционной деятельности был казнен его отец, а имущество семьи конфисковано. Юноше пришлось давать частные уроки, чтобы обеспечить средства к существованию. В 1801 г. он стал преподавателем физики и химии в центральной школе г. Бурга. В это время он написал свой первый труд, посвященный теории вероятностей, который привлек внимание Даламбера и Лапласа. Благодаря ходатайству этих ученых Ампера сначала перевели в Лионский лицей, а затем сделали репетитором по математике в знаменитой Политехнической школе в Париже (с 1809 г. он заведовал там кафедрой высшей математики и механики). В 1814 г. Ампера избирают членом Института Франции (Академии наук) на место умершего

Ж. Л. Лагранжа. Однако и после этого ученому приходилось вести большую преподавательскую деятельность, отвлекавшую его от занятий наукой.

Научные интересы Ампера отличались большим разнообразием. Он интересовался оптикой и ботаникой. Независимо от А. Авогадро Ампер сформулировал важнейший химический закон, а также дал одну из первых в истории химии классификацию элементов, основанную на сходстве их свойств. В конце жизни ученый много занимался сравнительной зоологией живых организмов. Амперу принадлежит и оригинальная классификация наук, а также исследования, которые позволяют считать его одним из предтеч кибернетики.

Ампер пользовался большим авторитетом в научных кругах не только Франции, но и других стран. Он был награжден орденом Почетного легиона, избран почетным иностранным членом Петербургской Академии наук. А.-М. Ампер умер 10 июня 1836 г.

Основные научные достижения Ампера — его работы по электродинамике. Он занимался исследованиями в этой области сравнительно недолго — с 1820 по 1827 г. Причиной его обращения к электромагнетизму стали опыты Эрстеда.

Летом 1820 г. О. де ля Рив продемонстрировал опыты датского физика в Женеве на съезде естествоиспытателей. Приехавший из Женевы в Париж Ф. Араго 4 сентября сообщил о них на заседании Академии, а 11 сентября на очередном еженедельном заседании показал эти опыты. Уже через неделю Ампер сделал первое сообщение о своих экспериментах с параллельными токами и выводе об электрическом происхождении магнетизма. Далее последовали новые доклады Ампера об опытах, которые он проводил с построенными на собственные средства приборами. Основной труд Ампера «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта», в котором он подытожил свои электродинамические исследования за шесть лет, вышел в 1826 г. В учение об электричестве и магнетизме ученый внес множество новых идей.

Ампер разграничивал электростатические и электродинамические явления, ввел современное правило направления тока и современную терминологию, связанную с током (электродинамика, электродвижущая сила, напряжение, гальванометр и др.). Проводя опыты с катушкой с током (он назвал ее соленоидом, и слово это также вошло в обиход физики), Ампер показал эквивалентность его магнитного поля полю постоянного магнита. Исследования магнитного поля кругового тока привели его к мысли, что «постоянный» магнетизм объясняется существованием элементарных круговых токов, обтекающих частицы, из которых состоят магниты. В итоге он отказался от господствовавшей ранее идеи о магнитных жидкостях и сделал вывод о том, что магнетизм представляет собой одно из проявлений электричества.

Теория Ампера была создана по образу и духу «Начал» Ньютона, что позволило Максвеллу назвать французского ученого «Ньютоном электричества». Созданная Ампером электродинамика основывалась на представлении о мгновенной передаче электромагнитных взаимодействий и относится к так называемым теориям дальнего действия. После открытия Фарадея многие ученые пытались усовершенствовать теорию Ампера, включив в нее и явление электромагнитной индукции. Однако последовательную теорию электромагнитных явлений удалось построить лишь Максвеллу, который отказался от представления о дальнем действии и взял за основу идею о поле. Тем не менее историческое значение электродинамики Ампера очень велико: на протяжении нескольких десятилетий она играла ведущую роль в учении об электромагнетизме.

**Труд, представленный
Королевской Академии наук
2 октября 1820 г. и содержащий
резюме докладов,
прочитанных в Академии
18 и 25 сентября 1820 г.,
относительно действий
электрических токов**

1. О взаимодействии двух электрических токов. 1. Электродвижущее действие проявляется в двоякого рода эффектах, которые я считаю нужным сначала разграничить путем точного определения.

Я назову первый из этих эффектов *электрическим напряжением*, а второй — *электрическим током*.

Напряжение наблюдается, когда два тела, между которыми возникло электродвижущее действие, отделены одно от другого непроводниками* по всей своей поверхности, за исключением тех точек, где эта сила возникает. Ток возникает тогда, когда в проводящем контуре создано сообщение между телами, притом в точках, отличных от точек возникновения электродвижущей силы**. В первом случае результатом этого действия является приведение двух тел или двух систем тел, между которыми это действие происходит, в особое состояние напряжения. Разность между этими напряжениями есть величина постоянная, если действие постоянно, например если она вызвана контактом

* При простом удалении двух проводящих тел друг от друга разделяющим их проводником является воздух.

** Сюда входит и тот случай, когда оба тела или системы тел, между которыми возникла электродвижущая сила, полностью присоединены к общему резервуару, являющемуся тогда частью цепи.

двух разнородных веществ. Напротив, эта разность была бы переменной, если бы она зависела от переменной причины например от трения или от давления.

Этот первый случай является единственным, который реализуется, когда электродвижущее действие развивается между отдельными частями одного и того же непроводящего тела. Примером служит турмалин при изменении его температуры.

Во втором случае, когда тела соединены проводящим контуром, электрическое напряжение отсутствует, легкие тела заметным образом не притягиваются и обычный электрометр не может уже служить указателем того, что происходит в теле. Однако электродвижущее действие продолжается, так как вода, кислота, щелочь или соляной раствор, если они входят в контакт, разлагаются, как это уже давно известно, в особенности при постоянном электродвижущем действии.

Кроме того, когда электродвижущее действие вызвано контактом металлов, то происходит, как это недавно открыл Эрстед, отклонение магнитной стрелки, помещенной возле какого-либо участка контура, от ее нормального положения. Однако эти действия исчезают, прекращается разложение воды и отклонение магнитной стрелки, как только прерывается ток. Тогда напряжения восстанавливаются, а легкие тела вновь притягиваются. Это вполне доказывает, что указанные напряжения не служат причиной ни разложения воды, ни открытых Эрстедом изменений положения намагниченной стрелки. Данное явление очевидно, могло бы существовать самостоятельно, если бы электродвижущая сила возникала между отдельными частями одного и того же проводящего тела. Следствия, выведенные в настоящем труде из опытов Эрстеда, заставят нас признать существование этих токов в том единственном пока случае, при котором имеются для этого предположения достаточные основания.

2. Посмотрим теперь, от чего зависит различие между этими двумя рядами совершенно различных явлений: с одной стороны напряжение и давно известные притяжения и отталкивания, а с другой — разложение воды и многих других веществ, отклонение магнитной стрелки и притяжения и отталкивания особого рода, совершенно отличные от обычных электрических притяжений и отталкиваний, открытые мною, как я полагаю, впервые. В отличие от обычных я назвал их *притяжениями и отталкиваниями электрических токов*. Если нет проводящего соединения между телами или системами тел, между которыми возникает электродвижущее действие, и если сами тела являются проводниками, как в вольтовом столбе, то это действие можно мыслить лишь как вносящее постоянно положительное электричество в одно из тел, а отрицательное — в другое. В первый момент, когда ничто не препятствует проявлению этого действия, оба электричества накапливаются, каждое в соответствующей части системы. Но этот процесс останавливается в тот момент, когда

разность электрических напряжений* придает взаимному притяжению обоих электричеств, стремящемуся их соединить, силу, достаточную для уравнивания электродвижущего действия. Затем все остается в том же положении, если не считать утечки электричества, которая может мало-помалу происходить через непроводящие тела, например через воздух, разделяющий контур, так как, по-видимому, не существует абсолютно изолирующих тел. Поскольку такая утечка происходит, напряжение уменьшается. Но как только напряжение уменьшилось, нарушается равновесие между взаимным притяжением обоих электричеств и электродвижущим действием, и эта последняя сила, если она постоянна, вновь разносит положительное электричество в одну сторону, а отрицательное — в другую, и напряжения восстанавливаются. Такое состояние системы электродвижущих и проводящих тел я называю *электрическим напряжением*. Как известно, это состояние продолжает существовать в обеих половинах системы после их разделения или при их контакте после прекращения электродвижущего действия, если последнее было вызвано давлением или трением между телами, из коих хотя бы одно не проводник. В обоих случаях напряжения постепенно уменьшаются вследствие утечки электричества, о которой мы только что говорили.

Но пусть два тела или две системы тел, между которыми действует электродвижущая сила¹, соединены друг с другом посредством проводящих тел. Допустим, что между ними нет другой электродвижущей силы, равной и противоположной первой, которая поддерживала бы состояние электрического равновесия, а следовательно, и возникающие при этом напряжения. В таком случае эти последние исчезают или, во всяком случае, становятся весьма малыми и возникающие указанные выше характерные для второго случая явления. Но так как в остальном ничего не изменилось в расположении тел, между которыми развивалось электродвижущее действие, то последнее несомненно продолжает существовать. Однако взаимное притяжение обоих электричеств, измеряемое разностью напряжений, ставшей равной нулю или весьма малой, не может более уравновесить электродвижущее действие. Поэтому обычно соглашались с тем, что в этом случае электродвижущее действие продолжает, как и прежде, переносить оба электричества в тех же направлениях. Так возникает двойной ток, один положительного, а другой отрицательного электричества, вытекающих в противоположных направлениях из точек, где существует электродвижущее действие, и воссоединяющихся в противоположной этим точкам части контура. Токи, о которых я говорю, продолжают уско-

* Когда столб изолирован, эта разность равна сумме обоих напряжений — положительного и отрицательного. Когда один конец столба соединен с общим резервуаром нулевого напряжения, та же разность равна по абсолютной величине напряжению на другом конце.

ряться до тех пор, пока инерция электрических жидкостей и сопротивление, испытываемое ими вследствие несовершенства даже наилучших проводников, не уравновесят электродвижущую силу. После этого токи продолжают неопределенно долго с постоянной скоростью, покуда электродвижущая сила сохраняет свою прежнюю интенсивность, но они всегда прекращаются в тот момент, когда контур разрывается. Такое состояние электричества в цепи проводящих и электродвижущих тел я буду называть кратко *электрическим током*².

Так как мне пришлось бы постоянно говорить о двух противоположных направлениях, по которым текут оба электричества, то во избежание излишних повторений после слов *направление электрического тока* я буду всякий раз подразумевать слова *направление положительного электричества*. Так, например, в случае вольтова столба выражение *направление электрического тока внутри столба* будет обозначать направление от конца, на котором при разложении воды выделяется водород, к концу на котором выделяется кислород, а выражение *направление электрического тока в проводнике*, соединяющем концы столба, будет обозначать направление от конца, где выделяется кислород, к концу, где выделяется водород. Чтобы объединить оба эти случая в одном общем определении, можно сказать, что направлением электрического тока называется направление перемещения водорода и оснований солей при разложении током воды и соляных растворов, входящих в контур, независимо от того, составляют ли они в случае вольтова столба часть внешнего проводника или входят в состав пар, из которых состоит столб.

Исследования Гей-Люссака и Тенара над вольтовым столбом³ — этим богатым источником великих открытий почти во всех областях физических знаний — показали, что разложение воды, солей и т. п. ни в какой мере не происходит вследствие разности напряжений на концах столба, а лишь вследствие того, что я называю электрическим током. Это видно из того, что при погружении концов проводников в чистую воду разложение почти равно нулю, но если, ничего не изменив в остальном расположении, прибавить к воде кислоту или соляной раствор, разложение пойдет очень быстро, так как в первом случае чистая вода является плохим проводником, а во втором она хорошо проводит электричество.

Однако совершенно очевидно, что во втором случае электрическое напряжение концов проволок, погруженных в жидкость, не могло увеличиться, оно могло лишь уменьшиться, по мере того как жидкость становится лучшим проводником. Во втором случае в действительности возрастает лишь ток. Единственно ему мы обязаны разложением воды и солей. Легко также показать, что только ток действует на магнитную стрелку в опытах Эрстеда. Для этого достаточно поместить стрелку над горизонтальным вольтовым столбом, расположенным приблизительно

плоскости магнитного меридиана. Покуда концы столба разъединены, стрелка сохраняет свое нормальное направление. Если же к одному из концов столба прикрепить металлическую проволоку и коснуться ею другого конца столба, стрелка сразу меняет свое направление и продолжает оставаться в этом новом положении до тех пор, пока длится контакт и столб сохраняет свою энергию. Лишь по мере того, как столб теряет энергию, стрелка постепенно приближается к своему нормальному направлению. Однако при разрыве тока размыканием контакта возврат стрелки происходит мгновенно. Но ведь тот же контакт вызывает прекращение или значительное уменьшение электрических напряжений. Следовательно, не эти напряжения, а единственно лишь ток влияет на направление магнитной стрелки. Когда частью контура является чистая вода и ее разложение едва заметно, магнитная стрелка, помещенная над или под каким-либо другим участком этого контура, отклоняется также слабо. Прибавление же к воде азотной кислоты, без внесения других каких-либо изменений в аппаратуру, увеличивает отклонение стрелки, одновременно ускоряя разложение воды. (...)

4. Таковы те различия, которые были установлены до меня между действиями электричества в вышеописанных двух его состояниях. Одним из этих состояний является если не покой, то по меньшей мере медленное движение электричества, которое исключительно вследствие трудности вполне изолировать тела, на которых проявляется электрическое напряжение, вызывает двойной ток положительного и отрицательного электричества вдоль непрерывного контура из проводящих тел. Согласно обычной теории, обе жидкости, из которых, как считают, состоит электричество, беспрерывно разделяются в одной части контура и быстро переносятся в противоположных направлениях в другую часть того же контура, где они постоянно воссоединяются. Отвечающий такому определению электрический ток может быть получен и с помощью обычной машины, если она дает электричество обоих знаков и если соединить проводником соответствующие части машины. Однако, не прибегая к машинам очень больших размеров, невозможно получить ток достаточной энергии, какой получается при помощи вольтова столба. Причина лежит в том, что количество электричества, производимое за данный промежуток времени машиной трения, остается постоянным и не зависит от проводящей способности остального контура, а количество электричества, приводимое в движение за известный промежуток времени вольтовым столбом, неограниченно возрастает, чем лучше проводники, соединяющие концы столба друг с другом.

Но различия, о которых я напоминал выше, не являются единственными отличительными признаками двух состояний электричества. Я открыл еще более замечательные отличия, расположив параллельно прямолинейные участки двух проводящих проволок, соединяющих концы двух вольтовых столбов.

Одна из проволок была неподвижной, а другая, подвешенная на остриях и снабженная для увеличения подвижности протиковесом, могла приближаться и удаляться от первой, оставаясь ей параллельной. Я наблюдал тогда при одновременном пропускании тока через каждую из проволок, что они притягивались друг к другу, когда оба тока были одинаково направлены и отталкивались друг от друга, когда направление токов было взаимно противоположным.

Но эти притяжения и отталкивания электрических токов существенно отличаются от тех, которые вызываются электричеством в состоянии покоя. Во-первых, они прекращаются, как и процесс химического разложения, в тот момент, когда размыкается проводящий контур. Во-вторых, при обычных электрических притяжениях и отталкиваниях разноименные электричества притягиваются, а одноименные отталкиваются. В случае же электрических токов как раз наоборот: притяжение наблюдается, когда две проводящие проволоки расположены параллельным таким образом, что одноименные концы находятся с одной стороны и очень близко один возле другого, а отталкивание — когда в параллельных проводниках токи имеют взаимно противоположные направления, так что одноименные концы находятся на возможно большем расстоянии один от другого. В-третьих, когда имеющееся притяжение достаточно сильно, чтобы привести в соприкосновение подвижный проводник с неподвижным проводником, они остаются притянутыми друг к другу как два магнита, а не разделяются тотчас же, подобно двум соприкоснувшимся вследствие взаимного притяжения разноименно наэлектризованным — одно положительно, другое отрицательно — проводящим телам. Наконец — и, по-видимому, это последнее обстоятельство зависит от той же причины, что и предыдущие, два электрических тока притягиваются и отталкиваются в пустоте так же, как и в воздухе, что опять противоречит тому, что наблюдается при взаимодействии двух проводников, наэлектризованных обычным образом. Здесь не идет речь о том, чтобы объяснить эти явления. Притяжения и отталкивания двух параллельных токов, смотря по тому, как они направлены, одинаково или противоположно, являются фактами, полученными из эксперимента, который легко может быть повторен. Чтобы избежать во время этого опыта колебаний неподвижного проводника, вызываемых легким движением воздуха, прибор необходимо поместить под стекло, пропустив через подставку участки проводника, ведущие к концам вольтова столба. Наиболее удобным является следующее расположение проводников: один из них закрепляется горизонтально на двух опорах, другой подвешивается при помощи двух металлических проволок, составляющих с ним одно целое, к стеклянной оси, расположенной выше первого проводника и опирающейся очень тонкими стальными остриями на две другие металлические опоры. К остриям припаяны упомянутые выше две металлические проволоки, так что электр

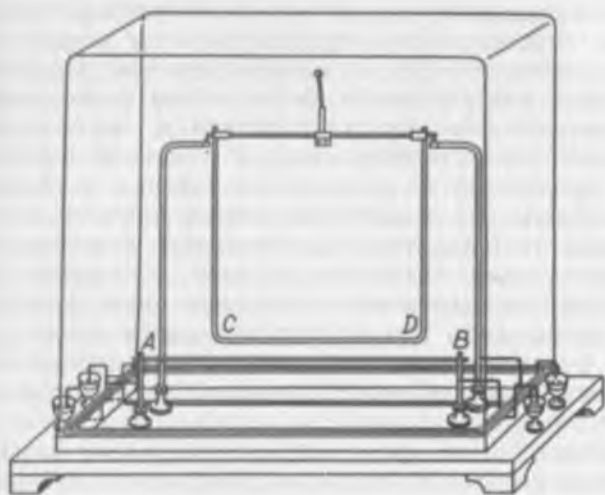


Рис. 78

ческое соединение устанавливается через опоры при помощи этих остриев [рис. 78].

Оба проводника расположены взаимно параллельно один возле другого и в одной горизонтальной плоскости. Один из них может совершать колебания вокруг горизонтальной линии, проходящей через концы стальных остриев, и в этом своем движении он остается параллельным неподвижному проводнику.

Над серединой стеклянной оси установлен противовес, который увеличивает подвижность колеблющейся части прибора, повысив ее центр тяжести.

Сначала я думал, что электрический ток должен быть установлен в каждом из проводников с помощью отдельного вольтова столба, но это не обязательно. Достаточно, если оба проводника являются частями одного и того же контура, так как электрический ток существует в нем повсюду с одинаковой интенсивностью. Из этого наблюдения следует, что в рассматриваемых явлениях не играют никакой роли электрические напряжения концов столба, ибо в остальном контуре напряжение, конечно, отсутствует. Это подтверждается еще и тем, что на большом расстоянии от вольтова столба можно заставить отклоняться магнитную стрелку при помощи очень длинного проводника, середина коего огибает стрелку сверху и снизу в направлении магнитного меридиана. Этот опыт был мне указан знаменитым ученым⁴, которому физико-математические науки особенно обязаны великим прогрессом, достигнутым в наши дни. Опыт удался полностью.

Обозначим через *A* и *B* концы неподвижного проводника, через *C* — конец подвижного проводника, близкий к *A*, и через *D* — конец того же проводника, близкий к *B*. Если один конец столба соединить с *A*, затем соединить *B* с *C*, а *D* присоединить

к другому концу столба, то ясно, что электрический ток в обоих проводниках будет одного направления, и мы увидим, что проводники притягиваются. Если же, наоборот, *В* соединить с *D* а *С* — с другим концом столба, токи в обоих проводниках будут взаимно противоположного направления и проводники будут отталкиваться. Так как притяжения и отталкивания электрических токов происходят во всех точках контура, то понятно, что одним неподвижным проводником можно притягивать и отталкивать сколько угодно других проводников и изменять направление скольких угодно магнитных стрелок. Я намерен устроить прибор с одним неподвижным и двумя подвижными проводниками, так чтобы либо оба проводника одновременно притягивались или отталкивались, либо один притягивался, а другой в то же время отталкивался в зависимости от способа соединения их друг с другом.

Ввиду успеха опыта, указанного мне маркизом де Лапласом, можно было бы, взяв столько проводников и магнитных стрелок, сколько имеется букв, и помещая каждую букву на отдельной стрелке, устроить своего рода телеграф с помощью одного вольтова столба, расположенного вдали от стрелок. Соединяя поочередно концы столба с концами соответствующих проводников, можно было бы лицу, которое наблюдало бы за буквами на стрелках, передавать сведения со всеми подробностями и через какие угодно препятствия. Если установить со стороны столба клавиатуру с буквами и производить соединения нажатием клавиш, то этот способ сообщения мог бы применяться достаточно просто и не требовал бы больше времени, чем необходимо для нажатия клавиш на одной стороне и чтения каждой буквы на другой*.

Вместо того чтобы давать подвижному проводнику перемещаться параллельно неподвижному, можно дать ему возможность лишь вращаться в плоскости, параллельной неподвижному проводнику вокруг общего перпендикуляра, проходящего через середины обоих проводников. Тогда, как следует из установленного выше закона притяжения и отталкивания электрических токов, будет происходить одновременное притяжение или отталкивание каждой половины обоих проводников в зависимости от того, будут ли токи направлены в одну сторону или взаимно противоположно. Подвижный проводник будет при этом поворачиваться до тех пор, пока он не станет параллельным неподвижному, так что токи в обоих проводниках будут одинаково направлены. Отсюда вытекает, что при взаимодействии двух электрических токов направляющее действие и притяжение или отталкивание имеют в основе тот же принцип и являются лишь

* После редактирования настоящего труда я узнал от Араго, что подобный телеграф был уже предложен Земмерингом, с той лишь разницей, что вместо отклонения магнитной стрелки, тогда еще неизвестного, автор предлагал наблюдать разложение воды в стольких сосудах, сколько имеется букв^а.

различными проявлениями одного и того же действия; поэтому нет надобности устанавливать различие между этими двумя эффектами. Однако такое различие весьма важно, как мы сейчас увидим, если речь идет о взаимодействии между электрическим током и магнитом, который обычно рассматривают относительно его оси, так как в этом последнем случае оба тела стремятся встать перпендикулярно друг другу.

Перейдем теперь к изучению взаимодействия электрического тока и магнита, а также двух магнитов друг на друга. Мы увидим, что оба эти случая подчиняются закону взаимодействия двух электрических токов, если считать один из этих токов имеющим место в каждой точке линий, проведенных на поверхности магнита, от одного полюса до другого в плоскостях, перпендикулярных оси магнита. На основании простого сопоставления фактов мне кажется несомненным, что эти токи вокруг оси магнита реально существуют или, скорее, что намагничивание является операцией, посредством которой частицам стали сообщается свойство возбуждать для этих токов такое же электродвижущее действие, какое имеется в вольтовом столбе, окиси цинка минералогов⁶, в нагретом турмалине и даже в столбике, составленном из влажного картона и дисков одного и того же металла при двух разных температурах. Но в случае магнита эта электродвижущая сила, возникая между отдельными частицами одного и того же хорошо проводящего тела, никогда не может вызвать, как мы отметили выше, никакого электрического напряжения, а лишь постоянный ток электричества, подобный тому, какой возник бы в вольтовом столбе, если его устроить в виде замкнутой кривой, соединив конец с началом. Совершенно очевидно из сказанного выше, что подобный столбик не мог бы вызвать ни в одной из своих точек ни напряжений, ни обычных электрических притяжений или отталкиваний, ни химических явлений, так как в контур невозможно было бы включить жидкость. Однако ток, который тотчас же возник бы в таком столбе, оказывал бы направляющее, притягивающее или отталкивающее действия как по отношению к другому электрическому току, так и по отношению к магниту, который является, как мы увидим, ничем иным, как совокупностью электрических токов.

Итак, мы приходим к тому неожиданному результату, что магнитные явления вызываются исключительно электричеством и что нет никакой иной разницы между двумя полюсами магнита, чем их положение относительно токов, из которых этот магнит состоит. Южный полюс* — это тот, который находится справа от этих токов, а северный — находится слева от них.

* Т. е. полюс, которым магнитная стрелка обращается к северу; этот полюс лежит справа от токов, из которых состоит магнит, так как он находится слева от внешнего тока, одинаково направленного и обращенного «лицом» к первым токам.

Перевод с французского работы А.-М. Ампера выполнен Я. Г. Дорфманом. Отрывки воспроизводятся по изданию: Ампер А.-М. Электродинамика. М., 1954.

- ¹ Под «электродвижущей силой» Ампер понимает буквально силу, движущую электрические жидкости.
- ² Здесь впервые в истории физики появляется термин «электрический ток».
- ³ Ж. Л. Гей-Люссак и Л.-Ж. Танар исследовали электрохимическое действие электрического тока в 1809 г. в работе «О химическом действии гальванической жидкости».
- ⁴ Речь идет о П.-С. Лапласе.
- ⁵ С.-Т. Земмеринг предложил свой электролитический телеграф в 1809 г. Магнитный телеграф, наподобие предлагаемого здесь Ампером, был построен в 1832 г. П. Л. Шиллингом в России.
- ⁶ Речь идет, очевидно, о кремнецинковой соли или кремнекислом цинке $ZnSiO_4 \cdot 2H_2O$, кристаллы которого, подобно турмалину, обладают пьезоэлектрическими свойствами.

Литература

- [1] Сочинения А.-М. Ампера:
а) Mémoires sur l'électromagnétisme et l'électrodynamique. Par Andre-Marie Ampère. Paris, 1921.
б) Correspondence du Grand Ampère. Publ. par L. de Launay. T. 1—3. Paris, 1936—1943.
- [2] Launay L. de. Le Grand Ampère. Paris, 1925.
- [3] Белькинд Л. Д. Андре Мари Ампер. М., 1968.



С. Карно

1796 — 1832

Об эффективности тепловых машин

Интенсивное развитие промышленности в Англии и Франции в конце XVIII — начале XIX вв., основанное на широком использовании паровых машин, происходило в условиях, когда теория тепловых явлений находилась в зачаточном состоянии. На рубеже веков вновь обострились дискуссии о природе тепла, что привело к постановке ряда важных экспериментальных исследований (Б. Румфорд, Г. Дэви, Дж. Дальтон, П. Дюлонг и А. Пти и др.). Тем не менее в первой четверти XIX в. наука о тепловых явлениях и теплотехника развивались фактически независимо друг от друга. Первым исследователем, попытавшимся разрушить этот барьер, был французский инженер С. Карно.

Никола Леонард Сади Карно родился 1 июня 1796 г. в Париже. Он был старшим сыном выдающегося военачальника, политического деятеля и ученого Л. Карно, бывшего в то время членом Директории. Когда Сади был еще ребенком, его отец в результате изменения политической ситуации был отстранен от дел и таким образом у него появилось свободное время для занятий с сыновьями. Сади получил прекрасное домашнее воспитание и образование и некоторое время учился в лицее Карла Великого, по окончании которого поступил в знаменитую Политехническую школу. Во время учебы в Политехнической школе (1812—1814) Карно не только слушал лекции Пуассона, Гей-Люссака, Ампера, Араго, но и активно участвовал в политической жизни. Он окончил школу в числе лучших и был направлен для завершения образования в инженерную школу в Метце. Там молодой инженер готовит свои первые научные работы, оставшиеся, правда, неопубликованными.

В конце 1816 г. Карно получает чин лейтенанта и в течение нескольких лет, переезжая из гарнизона в гарнизон, выполняет рутинные обязанности военного инженера. Неудовлетворенный своей деятельностью и, главное, невозможностью вести научные исследования, Карно участвует в конкурсе на замещение вакантной должности в штабе корпуса в Париже. Выиграв этот конкурс, он переезжает в столицу, где продолжает учиться, посещая

лекции в Сорбонне, Коллеж де Франс, Консерватории искусств и ремесел. В Консерватории Карно познакомился с молодым физиком Н. Клеманом, который в это время занимался исследованием свойств газов. Общение с Клеманом, а также посещение заводов и фабрик возбудили у Карно интерес к проблеме совершенствования паровых машин.

В 1812 г. Сади посетил в Магдебурге отца, высланного из Франции. Обсуждение с ним научно-технических проблем (сам Л. Карно также в свое время занимался теорией машин, правда, с позиций механики), вероятно, послужило толчком к исследованию эффективности тепловых машин, завершившемуся изданием в 1824 г. сочинения «Размышления о движущей силе огня». Это сочинение, написанное очень ясно (Карно при подготовке книги заставлял своего брата читать и критиковать отдельные части рукописи, стремясь добиться максимальной доступности изложения), было благосклонно принято в Академии наук, где был зачитан его реферат. Однако этим дело и ограничилось. Очень скоро о книге молодого ученого забыли.

В 1827 г. Карно был снова отозван из Парижа для службы в провинции. Вскоре он вышел в отставку в чине капитана. По семейной традиции Карно принимал участие в политической жизни и приветствовал июльскую революцию 1830 г. Однако он не принял программу нового правительства и отказался войти в палату депутатов. Получив отставку, Карно с еще большей активностью занялся научными исследованиями. У него были обширные планы экспериментального изучения свойств паров и газов. Однако реализовать эти планы не удалось. 24 августа 1832 г. Карно умер от холеры. По законам того времени все его имущество, в том числе и рукописи, было уничтожено.

Спустя десять лет после выхода в свет «Рассуждений» Карно, уже после смерти автора, к его идеям было привлечено внимание ученых. Французский физик Б. Клапейрон изложил и развил теорию Карно, придав ей математическое оформление. Благодаря Клапейрону представления Карно о тепловых процессах стали известны другим ученым и послужили основой развития классической термодинамики в трудах У. Томсона (Кельвина), Р. Клаузиуса и др.

В своей работе Карно ввел в научный обиход множество понятий, сохранившихся в термодинамике до наших дней. Это и понятия идеальной тепловой машины, идеального цикла, обратимости процесса как условия его предельной эффективности и т. д. Однако главной заслугой ученого является выдвижение идеи о необходимости перепада температур для создания циклически действующей тепловой машины, которая лежит в основе второго начала термодинамики.

Карно построил свою теорию, основываясь на представлении о существовании особой материи тепла — теплорода, которое было впоследствии отвергнуто наукой. Следует, однако, отметить, что сам Карно сознавал трудности теории теплорода. В отрыв-

очных записках, чудом уцелевших после смерти ученого, можно найти свидетельства того, что в конце жизни он склонялся к отказу от этой теории. На это указывает, например, такое суждение Карно: «Теплота есть не что иное, как движущая сила или, скорее, движение, которое изменило свою форму», — а также проекты экспериментов, по замыслу близкие к тем, что были впоследствии проведены Джоулем. Возможно, что, излагая принципиально новые взгляды на принцип действия тепловых машин, Карно не хотел затенять их дискуссией о природе теплоты и поэтому сформулировал их на старом языке теории теплорода. Этот недостаток теории Карно был убран уже в середине XIX в., большинство же ее выводов осталось справедливым и после победы кинетической теории теплоты.

Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу

Никто не сомневался, что теплота может быть причиной движения, что она даже обладает большой двигательной силой: паровые машины, ныне столь распространенные, являются этому очевидным доказательством.

Теплоте должны быть приписаны те колоссальные движения, которые поражают наш взгляд на земной поверхности; она вызывает движения атмосферы, поднятие облаков, падение дождя и других осадков, заставляет течь потоки воды на поверхности земного шара, незначительную часть которых человек сумел применить в свою пользу; наконец, землетрясения и вулканические извержения также имеют причиной теплоту.

Из этих огромных резервуаров мы можем создавать движущую силу, нужную для наших потребностей; природа, повсюду предоставляя горючий материал, дала нам возможность всегда и везде получать теплоту и сопровождающую ее движущую силу. Развивать эту силу и применять ее для наших нужд — такова цель тепловых машин. (<...>)

Часто поднимали вопрос: ограничена или бесконечна движущая сила тепла^{*}, существует ли определенная граница для возможных улучшений, граница, которую природа вещей мешает перешагнуть каким бы то ни было способом, — или, напротив, возможны безграничные улучшения? Также долгое время искали и ищут теперь, не существует ли агентов, предпочтительных водяному пару, для развития движущей силы огня; не представляет ли, например, атмосферный воздух в этом отношении больших

^{*} Мы употребляем здесь выражение «движущая сила», чтобы обозначить полезное действие, которое может дать двигатель. Это действие всегда можно свести к поднятию груза на определенную высоту: оно измеряется, как известно, произведением веса груза на высоту, на которую груз поднят.

преимуществ. Мы ставим себе задачу подвергнуть здесь эти вопросы внимательному рассмотрению.

Явление получения движения из тепла не было рассмотрено с достаточно общей точки зрения. Его исследовали только в машинах, природа и образ действия которых не позволяли ему принять того полного развития, на которое оно способно. У подобных машин это явление сказывается в извращенном и неполном виде; поэтому трудно узнать его основы и изучить его законы.

Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо его изучить независимо от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента; надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам*, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него ни производилось воздействие.

Машины, не получающие движения от тепла, а имеющие двигателем силу человека или животных, падение воды, поток воздуха и т. д., могут быть изучены до самых мелких деталей посредством теоретической механики. Все случаи предвидены, все возможные движения подведены под общие принципы, прочно установленные и приложимые при всех обстоятельствах. Это характерное свойство полной теории. Подобная теория, очевидно, отсутствует для тепловых машин. Ее нельзя получить, пока законы физики не будут достаточно расширены и достаточно обобщены, чтобы наперед можно было предвидеть результаты определенного воздействия теплоты на любое тело.

Мы будем в последующем предполагать знание, хотя бы приблизительное, различных частей, составляющих обычную паровую машину. Поэтому мы считаем излишним объяснять, что такое топка, паровой котел, паровой цилиндр, поршень, холодильник и т. д.

Получение движения в паровых машинах сопровождается одним обстоятельством, на которое мы должны обратить внимание. Это обстоятельство есть восстановление равновесия теплорода, т. е. переход теплорода от тела, температура которого более или менее высока, к другому, где она ниже. В самом деле, что происходит в паровой машине, находящейся в движении? Теплород, полученный в топке благодаря горению, проходит через стенки котла, дает рождение пару и с ним как бы соединяется. Пар увлекает его с собой, несет в цилиндр, где он выполняет некоторую службу, и оттуда в холодильник, где, соприкасаясь с холодной водой, пар сжимается. Холодная вода холодильника поглощает в конечном счете теплород, полученный от сгорания. Она согревается паром, как если бы была поставлена непосредственно на топку. Пар здесь только средство переноса теплорода; он

* Мы различаем здесь паровые машины и тепловые машины вообще: последние могут употреблять любой агент, например водяной пар или что-нибудь другое для развития движущей силы.

выполняет ту же роль, что и при отоплении бань паром, с той только разницей, что здесь его движение становится полезным.

В процессах, которые мы описали, легко узнать восстановление равновесия теплорода, его переход от тела более или менее нагретого к телу более холодному. Первое из этих тел — сожженный в топке воздух, второе — вода холодильника. Восстановление равновесия теплорода происходит между ними если не полностью, то, во всяком случае, отчасти, так как, с одной стороны, сожженный воздух, выполнив свою роль, побыв в соприкосновении с котлом, уйдет в трубу с температурой более низкой, чем та, которую он получил при сгорании, и, с другой — вода холодильника, оживив пар, удалится из машины с температурой более высокой, чем она была первоначально.

Возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода², а его переходу от горячего тела к холодному, т. е. восстановлению его равновесия — равновесия, которое было нарушено некоторой причиной, будь то химическое действие, такое, как горение, или что-нибудь иное. Мы увидим, что этот принцип приложим ко всем машинам, приводимым в движение теплотой.

Согласно этому принципу, недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезной³. В самом деле, если бы вокруг нас были тела только такие же горячие, как и топка, каким образом можно было сконденсировать пар? Куда бы его деть, раз он получен? Не следует думать, что его можно, как это практикуется в некоторых машинах*, выбросить в атмосферу: атмосфера не приняла бы его. Она принимает его в обычных условиях, потому что выполняет роль большого холодильника, потому что она находится при более низкой температуре; иначе она была бы им вскоре заполнена или, вернее, была бы насыщена им еще раньше**. Повсюду, где существует разность температур, повсюду, где возможно восстановление равновесия теплорода, возможно получение движущей силы. Водяной пар есть одно из средств обнаружения этой силы, но не единственное: все тела природы могут быть применены для этого; все тела способны к изменению

* Некоторые машины высокого давления выбрасывают пар в атмосферу вместо того, чтобы его конденсировать: их употребляют главным образом там, где трудно получить достаточный приток холодной воды для конденсирования.

** Существование воды в жидком состоянии, обязательно предполагаемое здесь, так как без нее паровые машины не могли бы действовать, возможно только при давлении, способном мешать воде испаряться, а именно при давлении, равном или превосходящем упругость пара при данной температуре. Если подобное давление не производилось бы атмосферным воздухом, то в одно мгновение развился бы водяной пар в количестве, достаточном, чтобы производить то же давление, и все время нужно было бы преодолевать это давление, чтобы выбрасывать пар из машины в новую атмосферу. Это равносильно преодолению упругости, которая остается у пара после конденсирования в обычном способе.

Если бы на поверхности земного шара царствовала очень высокая температура, какая, без сомнения, существует внутри него, то все воды океанов были бы в виде пара в атмосфере и не имелось бы ни одной капли в жидком состоянии.

объема, к сжатию и расширению при действии тепла и холода; все способны при изменении своего объема побеждать некоторые сопротивления, и, таким образом, развивать движущую силу.

Здесь уместно задать себе следующий, одновременно любопытный и важный вопрос: неизменна ли по величине движущая сила тепла или она меняется вместе с агентом, с помощью которого она развивается, с промежуточной средой, выбранной как орудие действия теплоты?

Ясно, что этот вопрос может быть задан только для определенного количества теплоты и для заданной разности температур. Например, пусть тело *A* поддерживается при температуре 100°C , а другое тело *B* — при температуре 0°C . Спрашивается, какое количество движущей силы может быть получено при переносе определенного количества теплорода (например, того, которое необходимо, чтобы расплавить 1 кг льда) от первого из этих тел ко второму; спрашивается, будет ли это количество движущей силы обязательно ограниченным, меняется ли оно с веществом, употребляемым для ее проявления, представляет ли водяной пар в этом отношении более или менее значительные преимущества перед парами спирта, ртути, перед постоянным газом или каким-либо другим веществом.

Мы попытаемся ответить на эти вопросы с помощью установленных выше понятий.

Очевидно или по крайней мере становится очевидным после размышления о расширении, производимом теплотой, следующее: повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение движущей силы. Обратно: повсюду, где можно затратить эту силу, возможно образовать разность температур и нарушить равновесие теплорода. Удар, трение тел — разве это не суть средства поднять их температуру, привести их в более теплое состояние, чем окружающие предметы, нарушить равновесие теплорода там, где это равновесие прежде существовало? То, что температура газообразных жидкостей повышается при сжатии и понижается при расширении, есть результат опыта. Вот верное средство изменять температуру тел и нарушать равновесие теплорода столько раз, сколько вздумается, посредством одного и того же тела. Водяной пар, употребляемый обратным образом, чем его применяют в паровых машинах, можно рассматривать как средство нарушения равновесия теплорода⁴. Чтобы в этом убедиться, достаточно внимательно продумать, каким образом получается движущая сила действием теплоты на водяной пар.

Представим себе два тела *A* и *B*, поддерживаемые оба при постоянной температуре, причем температура *A* выше температуры *B*. Эти два тела, которым можно отдавать теплоту и брать ее не меняя их температуры, будут служить двумя бесконечными резервуарами теплорода. Мы назовем первое нагревателем, второе — холодильником.

Если мы хотим получить движущую силу, перенося опреде-

ленное количество теплоты от тела A к телу B , то можно поступать следующим образом.

1. Отнять теплород от тела A для образования пара, т. е. заставить это тело выполнить роль топки или, вернее, металла, из которого сделан котел в обыкновенных машинах; мы предполагаем, что пар образуется как раз при температуре тела A .

2. Впустить пар в расширяющийся сосуд, например цилиндр с поршнем; объем сосуда увеличится, а вместе с тем увеличится объем и пара. Расширившийся пар понизит свою температуру, как это случается со всеми упругими жидкостями⁶; предположим, что это разрежение длилось до тех пор, пока температура не стала равной температуре тела B .

3. Сконденсировать пар, приводя его в соприкосновение с телом B и производя на него одновременно постоянное давление, покуда он окончательно не превратился в жидкость. Тело B выполнит здесь роль воды холодильника, с той только разницей, что оно конденсирует пар, не смешиваясь с ним и не меняя своей температуры⁷.

Операции, которые здесь описаны, могут быть проведены в одном направлении или в обратном. Ничто не препятствует образованию пара с помощью теплорода тела B и при температуре этого тела сжатие его так, чтобы он нагрелся до температуры тела A , и, наконец, конденсации его в соприкосновении с этим телом и продолжению сжатия до полного ожидения.

Нашими первыми операциями одновременно получалась движущая сила и производился перенос теплорода от тела A к телу B ; обратными операциями одновременно затрачивалась движущая сила и возвращался теплород от тела B к телу A . Но если действовать тем и другим образом и тем же количеством пара, и нет никаких потерь ни в движущей силе, ни в теплороде, то количество движущей силы, произведенной в первом случае, будет равно тому, которое было затрачено во втором, и количество теплорода, прошедшее в первом случае от тела A к телу B , будет равно количеству теплорода, возвратившегося во втором случае от тела B к телу A . Можно делать бесконечное число операций этого рода, так что в конце концов не будет ни производственной движущей силы, ни перехода теплорода от одного тела к другому.

Значит, если бы существовали средства, более выгодные для использования тепла, чем те, которыми мы пользовались, т. е. если бы было возможно каким бы то ни было методом получить от теплорода большее количество движущей силы, чем мы получили первой серией наших операций, то стоило бы только употребить часть этой силы для возвращения указанным методом теплорода от тела B к телу A , от холодильника к нагревателю, как

⁶ Можно было бы удивиться, что тело B , будучи при той же температуре, что и пар, может его ожидить; строго говоря, это, конечно, невозможно; но так как малейшая разность в температуре вызовет конденсацию, то этого достаточно, чтобы сохранить правильность наших рассуждений (...)

первоначальное состояние было бы восстановлено. Можно было бы возобновить подобную операцию и действовать так и далее.

Это было бы не только вечным движением, но и беспредельным созданием движущей силы без затрат теплорода или каких-либо других агентов. Подобное создание совершенно противоречит общепринятым идеям, законам механики и здравой физике. Оно недопустимо*. Необходимо заключить, что *максимум движущей силы, получаемый употреблением пара, есть также максимум движущей силы, получаемой любым средством*. Мы дадим, кроме того, скоро второе, более точное доказательство этой теоремы. Предыдущее следует рассматривать как предварительное рассуждение.

Справедливо задать нам по поводу выведенного результата следующий вопрос: какой смысл имеет слово «максимум»? Чем можно обнаружить, что максимум достигнут? Как мы узнаем, что пар употреблен самым выгодным образом для развития движущей силы?

Всякое восстановление равновесия теплорода может быть причиной возникновения движущей силы, поэтому всякое восстановление равновесия, происходящее без образования этой силы, можно считать за настоящую потерю: отсюда, немного подумав, увидим, что во всякое изменение температуры, происходящее не от изменения объема тел, не может быть ничем иным, как бесполезным восстановлением равновесия теплорода**. Отсюда необходимое условие максимума будет: *в телах, употребляемых для развития движущей силы тепла, не должно быть ни одного изменения температуры, происходящего не от изменения объема*.

Обратно: всякий раз, когда это условие будет выполнено, максимум будет достигнут.

Этот принцип никогда не следует терять из виду при конструкции тепловых машин; это основное условие. Если его нельзя выполнить точно, то следует как можно меньше удаляться от него.

Всякое изменение температуры, обязанное не изменению объема или химическим действиям (которые мы здесь впредь исклю-

* Могут здесь спросить: если доказана невозможность *perpetuum mobile* для чисто механических действий, то имеет ли это место при употреблении тепла или электричества; но разве возможно для явления тепла и электричества придумать иную причину, кроме какого-либо движения тел, и разве эти движения не должны подчиняться законам механики? Кроме того, разве неизвестно, что все попытки какими бы то ни было методами осуществить *perpetuum mobile* остались бесплодными; что никогда не удастся получить настоящий *perpetuum mobile*, т. е. движение, которое продолжается вечно, без изменения употребляемых тел? (..)

** Мы здесь не предполагаем никаких химических действий между телами, взятыми для получения движущей силы теплоты. Химическое действие, происходящее в топке, есть в некотором роде предварительное действие, предназначенное не для непосредственного получения движущей силы, но для нарушения равновесия теплорода, для создания разности температур, которая уже затем дает возникновение движущей силы.

чаем), обязательно происходит от непосредственного перехода теплорода от более или менее нагретого тела к более холодному. Этот переход имеет главным образом место при соприкосновении тел с различной температурой; такие соприкосновения должны быть уменьшены насколько возможно. Конечно, они не могут быть исключены совершенно; но, по крайней мере, следует стремиться к тому, чтобы соприкасающиеся тела мало разнились друг от друга по температуре.

В нашем предыдущем рассуждении, употребляя теплород тела A для образования пара, мы полагали, что пар образуется при температуре самого тела A . Таким образом, соприкосновение имелось только между телами с одинаковой температурой; изменения температуры, происшедшие затем с паром, были обязаны расширению, т. е. изменению объема; наконец, конденсация производилась также без соприкосновения тел с различной температурой. Она происходила при приложении постоянного давления к пару, приведенному в соприкосновение с телом той же температуры, что и пар. Условия максимума выполнены. На самом деле явления не могут точно происходить так, как мы это предполагали. Чтобы обусловить переход теплорода от одного тела к другому, первое из них должно иметь более высокую температуру; но разность температур можно взять сколь угодно малой; в теории ее можно считать за нуль без того, чтобы рассуждения потеряли в точности.

Против нашего доказательства можно привести более серьезное возражение, а именно.

Когда мы отнимали тепло от тела A , чтобы получить пар, и затем конденсировали пар, присоединяя к телу B , то вода, служившая для его образования и первоначально бывшая при температуре тела A , в конце операции будет находиться при температуре тела B ; она охладится. Если мы хотим возобновить операцию, подобную первой, получить новое количество движущей силы с тем же прибором и с тем же паром, то нужно сперва восстановить первоначальное состояние, воде нужно придать ту температуру, которую она имела сначала. Это можно безусловно сделать, приводя ее прямо в соприкосновение с телом A , но тогда будет соприкосновение между телами с различной температурой и потеря движущей силы*: станет невозможным провести обрат-

* Эта потеря встречается во всех паровых машинах; в самом деле, вода, вводимая в котел, всегда холоднее находящейся там воды; между ними происходит бесполезное восстановление равновесия теплорода. Легко а posteriori убедиться, что это выравнивание действительно представляет потерю в движущей силе, если принять во внимание, что воду, подаваемую в котел, можно сначала согреть, употребляя ее как воду для конденсации пара в маленькой побочной машине, питаемой паром из того же котла, что и большая, и имеющей в холодильнике температуру, среднюю между температурой котла и главного холодильника.

Работа, производимая малой машиной, не вызывает никакой затраты тепла, так как все употребленное тепло возвращается в котел с водой из холодильника.

ную операцию, т. е. вернуть телу A теплород, употребленный для повышения температуры жидкости.

Эту трудность можно уничтожить, полагая разность температур между телами A и B бесконечно малой; количество теплоты, необходимое для приведения жидкости к ее начальной температуре, будет также бесконечно малым, и им можно будет пренебречь по сравнению с теплотой, нужной для образования пара, — величиной всегда конечной.

Заключение, выведенное для случая бесконечно малой разности температур между двумя телами, может быть легко распространено на общий случай. В самом деле, если требуется получить движущую силу от переноса теплорода от тела A к телу Z , причем температура последнего сильно отличается от температуры первого тела, то следует представить себе ряд тел B, C, D и т. д. с температурами, средними между температурами тел A и Z и выбранными таким образом, что разности от A до B , от B до C и т. д. все бесконечно малы. Теплород, взятый от A , дойдет до Z только пройдя через тела B, C, D и т. д. и развив при каждом из своих переходов максимум движущей силы. Обратные операции также будут все возможны, и рассуждения с. 331 станут точно приложимы.

После установленных выше положений можно с достаточным основанием сравнить движущую силу тепла с силой падающей воды: обе имеют максимум, который нельзя превзойти, какая бы ни была в одном случае машина для использования действия воды, и в другом — вещество, употребленное для развития силы тепла. Движущая сила падающей воды зависит от высоты падения и количества воды; движущая сила тепла также зависит от количества употребленного теплорода и зависит от того, что можно назвать и что мы на самом деле и будем называть высотой падения*, т. е. от разности температур тел, между которыми происходит обмен теплорода. При падении воды движущая сила строго пропорциональна разности уровней в верхнем и нижнем резервуарах. При падении теплорода движущая сила без сомнения возрастает с разностью температур между горячим и холодным телами; но мы не знаем, пропорциональна ли она этой разности. Мы не знаем, например, образует ли падение теплорода от 100 до 50 °C больше или меньше движущей силы, чем падение того же самого теплорода от 50 до 0 °C. Этот вопрос мы предлагаем разобрать несколько ниже.

Здесь мы дадим второе доказательство основного положения, выведенного на с. 332, и выскажем его в более общем виде, чем это было сделано до сих пор.

Когда газообразная жидкость быстро сжижается, то ее температура повышается; наоборот, она понижается при быстром раз-

* Так как предмет, о котором здесь идет речь, совершенно нов, то мы вынуждены употреблять выражения, еще не принятые и, может быть, не обладающие всей желаемой ясностью.

режении. Это одно из наиболее хорошо установленных следствий опыта; мы его возьмем в основу нашего доказательства*.

Если температура газа повысилась благодаря сжатию и мы хотим привести ее к первоначальному значению, не производя новых изменений объема, то надо отнять у газа теплород. Это же количество теплорода можно было бы отнять у газа во время самого сжатия так, чтобы температура газа оставалась все время постоянной.

Разрежая газ, можно уничтожить понижение его температуры, подводя к нему определенное количество теплорода. Мы будем называть теплород, употребленный в тех случаях, когда он не производит никакого изменения температуры, теплородом от изменения объема. Это выражение не значит, что теплород принадлежит объему, он принадлежит ему не более, чем принадлежит давлению; его также можно было бы назвать теплородом от изменения давления. Мы не знаем, какому закону он следует в зависимости от изменения объема; возможно, что его количество меняется с природой газа, с его плотностью, с его температурой. Опыт нам ничего не дал относительно этого; опыт дал только, что теплород развивается в более или менее значительных количествах при сжатии упругих жидкостей.

Сделав это предварительное замечание, вообразим упругую жидкость, например атмосферный воздух, заключенный в цилиндрический сосуд *abcd* [рис. 79], закрытый подвижной диафрагмой или поршнем *cd*; кроме того, предположим так же, что имеется два тела *A* и *B*, поддерживаемые при постоянной температуре, причем *A* при более высокой, чем *B*; затем вообразим следующий ряд операций⁶.

1. Тело *A* приводится в соприкосновение с воздухом, заключенным в сосуде *abcd*, или со стенкой сосуда, которая, мы предполагаем, легко пропускает теплород. Благодаря этому соприкосновению воздух находится при температуре тела *A*; *cd* — положение поршня в данный момент.

2. Поршень непрерывно поднимается и принимает положение *ef*. Все время имеет место контакт между телом *A* и воздухом, находящимся при постоянной температуре во время разрежения.

* Опыт, доказывающий наилучшим образом изменение температуры газа со сжатием или расширением, суть следующие:

1. Падение термометра, помещенного в колокол воздушного насоса, в котором производится разрежение. Это понижение очень заметно на термометре Бреге, оно может превысить 40 или 50 °С. Туман, получающийся в этом случае, кажется, происходит от сгущения пара благодаря охлаждению воздуха.

2. Воспламенение трута в так называемых пневматических огнях, представляющих собой, как известно, маленькие цилиндры с поршнем, где воздух подвергается быстрому сжатию.

3. Падение термометра, помещенного в сосуд, из которого первоначально сжатый воздух выпускается через кран.

4. Результаты опытов над скоростью звука. Лаплас показал, что для точного согласования его результатов с теорией и вычислениями следует допустить нагревание воздуха при внезапном сжатии. (...)



Рис. 79

Тело *A* дает теплород, необходимый для поддержания постоянной температуры.

3. Тело *A* удалено, и воздух больше не находится в соприкосновении с телом, способным снабжать его теплородом; поршень же продолжает свое движение и переходит из положения *ef* в положение *gh*. Воздух разрежается, не получая теплорода, и его температура падает. Предположим, что она падает до тех пор, пока не достигнет температуры тела *B*; в этот момент поршень останавливается и занимает положение *gh*.

4. Воздух приведен в тепловой контакт с телом *B*; он сжимается движением поршня, который переходит из положения *gh* в положение *cd*. Но воздух остается при постоянной температуре благодаря контакту с телом *B*, которому он отдает свой теплород.

5. Тело *B* удалено, сжатие воздуха продолжается; воздух, будучи изолирован, повышает свою температуру. Сжатие продолжается до тех пор, пока воздух не достигнет температуры тела *A*. Поршень при этом переходит из положения *cd* в положение *ik*.

6. Воздух приведен в соприкосновение с телом *A*; поршень возвращается из положения *ik* в положение *ef*; температура остается неизменной.

7. Период, описанный в п. 3, повторяется, затем следуют п. 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5 и т. д.

В различных положениях поршень испытывает давления более или менее значительные со стороны воздуха, находящегося в цилиндре; упругая сила воздуха меняется как от изменения объема, так и от изменения температуры, но необходимо заметить, что при равных объемах, т. е. для подобных положений поршня, при разрежении температура будет более высокой, чем при сжатии. Поэтому в первом случае упругая сила воздуха будет больше, а отсюда движущая сила, произведенная движением от расширения, будет больше, чем сила, нужная для сжатия. Таким образом, получится излишек движущей силы, излишек, который можно на что-нибудь употребить. Воздух послужит нам тепловой машиной; мы использовали его даже наиболее выгодным образом, так как не происходило ни одного бесполезного восстановления равновесия теплорода.

Все операции, здесь описанные, могут быть проведены как в одном направлении, так и в обратном. Пусть после шестого периода, т. е. когда поршень придет в положение *ef*, его заставят вернуться в положение *ik*, и в то же время воздух поддерживается в соприкосновении с телом *A*. Теплород, отданный этим телом за шестой период, возвращается к источнику, т. е. к телу *A*, и все тела возвращаются в то состояние, в каком они находились в конце пятого периода. Если теперь убрать тело *A* и заставить поршень перейти от положения *ik* к *cd*, то тем

температура воздуха опустится на столько градусов, на сколько она повысилась за пятый период, и станет равной температуре тела *В*. Очевидно, можно продолжать ряд операций, обратных описанным выше: достаточно каждый раз исходить из прежних условий и для каждого периода выполнять движение разрежения вместо движения сжатия, и наоборот.

Результатом первых операций было получение определенного количества движущей силы и перенос теплорода от тела *А* к телу *В*. Результатом обратных операций будет затрата полученной движущей силы и возвращение теплорода от тела *В* к телу *А*: все операции уничтожают друг друга. (...)

Невозможность заставить теплород развить большее количество движущей силы, чем мы получили нашей первой серией операций, теперь легко доказать. Она будет доказана рассуждениями, совершенно подобными рассуждениям на с. 333. Они здесь даже будут иметь большую точность: воздух, которым мы пользуемся для получения движущей силы, приводится в конце каждого цикла операций точно к прежнему состоянию, в то время как это было не совсем так для водяного пара, что и было отмечено*.

Мы выбрали атмосферный воздух как средство для развития движущей силы тепла; очевидно, рассуждения были бы прежние для всякого другого газообразного вещества и даже для всех других тел, способных менять температуру благодаря сжатию и расширению, что охватывает все тела природы или по крайней мере все те, которые способны развивать движущую силу тепла. Таким образом, мы пришли к следующему выводу

Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество определяется исключительно температурами тел, между которыми в конечном счете производится перенос теплорода.

Здесь предполагается, что каждый из методов получения движущей силы достигает полного совершенства, на которое он способен. Это условие, как мы заметили выше, будет выполнено, если в телах не будет происходить ни одного изменения температуры, обусловленного не изменением объема, или, что то же, только иначе выраженное, нигде не будет соприкосновения между телами с заметной разностью температур. (...)

* В наших доказательствах мы полагали, что если тело, испытав любые изменения и ряд превращений, возвращается в прежнее положение относительно плотности, температуры и агрегатного состояния, то оно будет обладать тем же количеством теплоты, какое имело первоначально, т. е., другими словами, поглощаемые и развиваемые при различных превращениях количества теплоты взаимно компенсируются. Это положение никогда не подвергалось сомнению; оно было сначала принято без рассуждений и затем подтверждено многочисленными калориметрическими измерениями.

Отрицать это — значит разрушить всю теорию тепла, основывающуюся на этом положении. Впрочем, заметим мимоходом, основные положения, на которые опирается теория тепла, требуют внимательного исследования. Некоторые данные опыта представляются необъяснимыми при современном состоянии теории⁷.

Перевод с французского работы С. Карно выполнен С. Ф. Фришем. Отрывки из нее воспроизводятся по изданию: Второе начало термодинамики. Сб. // Под ред. А. К. Тимирязева. М.—Л., 1934, в котором дан ее полный перевод. Название работы в оригинале: *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.*

Под термином «движущая сила» Карно понимает то, что в настоящее время принято называть работой, что следует из определения этого понятия, данного в примечании.

Это ошибочное с современной точки зрения утверждение было очевидным в старой теории тепла, в рамках которой полагалось, что при всех тепловых процессах количество теплоты во взаимодействующих телах остается постоянным, что и приводит к взгляду на теплоту как на особое неуничтожимое вещество — теплород. Вторая же часть предложения есть ясная и точная формулировка основной идеи, последовательно проведенной через все сочинение и в той или иной формулировке лежащей в основе второго начала термодинамики.

Далее по существу формулируется утверждение о невозможности существования вечного двигателя второго рода. Следует отметить, что Карно в своих рассуждениях подразумевает периодически действующую машину.

Здесь идет речь о принципе работы холодильной машины.

«Упругими» жидкостями раньше называли газы и пары; их отличали от обычных жидкостей, характеризующихся ничтожной сжимаемостью.

Далее следует описание обратимого кругового цикла Карно, широко используемого при рассмотрении задач термодинамики и в наши дни.

Это примечание Карно свидетельствует о том, что уже при подготовке этого сочинения он испытывал сомнения в правильности теории теплорода.



Г. Ом

1789—1854

О законе постоянного тока

Создание А. Вольтой первого гальванического элемента открыло перед физиками новую область исследований. В течение четверти века интенсивно изучались разнообразные эффекты, связанные с протеканием электрического тока (тепловые, химические и др.). При этом, однако, почти не делалось попыток установить общие закономерности протекания постоянного тока в электрических цепях. Между тем без их выяснения было невозможно серьезное расширение практического использования электричества. Важнейший шаг на пути создания теории электрических цепей был сделан немецким физиком Г. Омом в середине 20-х годов XIX в.

Георг Симон Ом родился 16 марта 1789 г. в Эрлангене в семье слесаря. Отец Ома придавал большое значение образованию детей. Хотя семья постоянно нуждалась в средствах, Георг учился сначала в гимназии, а затем в Эрлангенском университете. Однако по воле отца, считавшего, что сын слишком много времени уделяет развлечениям, Ому пришлось прервать учебу и начать преподавать математику в одной из частных школ в Швейцарии. Лишь в 1811 г. ему удалось сдать экзамены в университете и получить степень доктора философии. После окончания университета Ом в течение некоторого времени работал в своей alma mater приват-доцентом, но это не давало ему необходимых средств, и он был вынужден вернуться к преподаванию в школе. В 1817 г. Ом становится старшим преподавателем иезуитской коллегии (гимназии) в Кельне. В этом учебном заведении царил дух стремления к знаниям и преподаватели имели достаточно свободного времени для занятий своим предметом. Именно после переезда в Кельн Ом начинает активно заниматься физикой. (Этому способствовало также наличие в коллегии хорошо оборудованного физического кабинета.) Он начал с ремонта приборов и изучения научной литературы и лишь в 1820 г., вероятно, под впечатлением открытия Эрстеда, приступил к самостоятельным исследованиям в области электромагнетизма. Только через пять лет, в 1825 г., Ом решился представить научному миру плоды своего труда в виде статьи, которую озаглавил «Предварительное сообщение о законе, по кото-

Литература

- [1] Современное комментированное издание сочинения Карно: *Réflexions sur la puissance motrice du feu. Ed. critique par R. Fox. Paris, 1978.*
- [2] Sadi Carnot, *biographie et manuscrit. Paris, 1927.*
- [3] Кошманов В. В. Карно, Клапейрон, Клаузиус. М., 1985

рому металлы проводят контактное электричество». Уже в этой первой работе Ом использовал установку, во многом напоминающую ту, с помощью которой он провел решающие эксперименты. Однако в первой работе имелись и существенные методические погрешности. В частности, по неясным причинам Ом исследовал не силу взаимодействия между магнитной стрелкой и током, протекавшим в цепи, а «убыль» этой силы при изменении полного сопротивления цепи. Однако главным препятствием на пути к успеху оказалось применение в качестве источника тока элемента Вольты, стабильность которого была недостаточной. Кроме того, в опытах, где в качестве сменных проводников использовались не слишком длинные куски проволоки из различных металлов (золота, серебра, цинка и др.), сравнительно большое внутреннее сопротивление элемента отрицательно сказывалось на точности опытов. Следует отметить, что первая работа Ома была чисто эмпирической: он стремился подобрать формулу, которая наилучшим образом описывала бы экспериментальные результаты.

После публикации первой работы известный немецкий физик И. Х. Поггендорф предложил использовать вместо элемента Вольты термоэлемент Зеебека. Это, во-первых, позволяло стабилизировать значение ЭДС и сделать его регулируемым, во-вторых, внутреннее сопротивление термоэлемента много меньше, чем у элемента Вольта. В-третьих, наличие в цепи небольшой термо ЭДС приводило к возникновению слабых токов, что препятствовало сильному нагреву проводов, который мог искажать результаты экспериментов. Ом прислушался к совету более опытного специалиста. Кроме того, во второй работе он исследовал уже не изменение силы, действующей на магнитную стрелку со стороны тока, а саму силу. Все эти изменения способствовали успеху второй работы Ома «Определение закона, по которому металлы проводят контактное электричество...» (1826).

Ученый не ограничился установлением эмпирического закона постоянного тока. Он попытался построить теорию электрических цепей. При этом он опирался на аналогию между электрическим током и явлением теплопроводности и использовал результаты теоретических исследований французского ученого Ж. Фурье, изложенные им в работе «Аналитическая теория тепла» (1822). Свои выводы Ом обобщил в обширной монографии «Гальванические цепи, обработанные математически», изданной в 1827 г.

Открытие Ома было скептически воспринято в немецких научных кругах. Этот факт нашел отражение, в частности, в том, что лишь в 1852 г. ему была предоставлена кафедра в университете. До этого Ом был вынужден преподавать в военных школах в Берлине, а затем в Политехнической школе в Мюнхене. Лишь в конце 30-х годов заслуги Ома перед наукой получают признание. В 1839 г. его избирают членом-корреспондентом Берлинской Академии наук. Позднее он был избран в Туринскую и Баварскую академии наук. После переезда в Мюнхен (1849) Ом заве-

довал физическим кабинетом Баварской Академии. В 1841 г. ему была присуждена высшая награда Лондонского Королевского общества — медаль Копли. Он умер 6 июля 1854 г.

Определение закона, по которому металлы проводят контактное электричество, вместе с наброском теории вольтаического аппарата и мультипликатора Швейггера

(...) И поэтому я обратился к использованию термоэлектрической батареи, пригодность которой для моих целей была указана г-ном Поггендорфом¹; и поскольку полученные на этом пути результаты отчетливо дают закон проводимости, я думаю, что не будет чрезмерным подробное описание моего прибора, чтобы степень доверия к полученным с его помощью результатам могла быть оценена с большей легкостью.

Кусок висмута был отлит в форме прямоугольной скобы $abb'a'$ [рис. 80], длинная сторона которой равна $6\frac{1}{2}$ дюйма, а короткие ножки ab и $a'b'$ были по $3\frac{1}{2}$ дюйма. Она была рассчитана в 9 линий шириной и 4 линии толщиной. К каждой из ножек с помощью двух винтов я прикрепил медные полоски $abcd$, $a'b'c'd'$, которые имели ширину 9 линий, толщину 1 линию, а их общая длина составляла 28 дюймов. Полоски были изогнуты так, что их свободные концы cd , $c'd'$ погружались в ртуть, находившуюся в двух чашечках m , m' , стоявших на деревянном основании $fghi$.

На верхней пластине основания помещался крутильный подвес, в описании которого я буду немного более распространенным, поскольку его конструкция несколько отличается от обычной. Стекланный цилиндр, на котором установлен подвес, имел 6 дюймов в высоту и $4\frac{1}{2}$ дюйма в ширину. Сам подвес состоял из двух частей, одна из которых, *пор*, снабжена гнездом, сделанным слегка на конус, и накрепко приклеена к верхней пластинке стеклнного цилиндра. вторая часть, *к*, с коническим выступом толщиной 8 дюймов, плотно

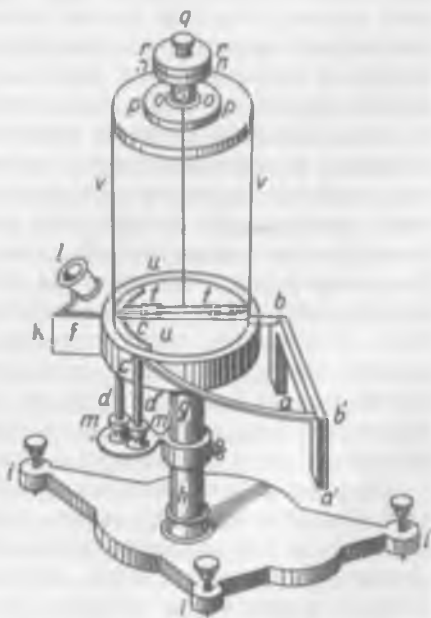


Рис. 80

входящим в гнездо, и с пластинкой *rr* шириной 3 дюйма покоилась на пластинке *л* той же ширины. В средней точке выступа *qs* на токарном станке с большой тщательностью было сделано небольшое конусообразное углубление, которое затем было заполнено металлом на $\frac{1}{2}$ дюйма своей длины так, что плоские поверхности, образованные таким образом, придавали коническому углублению вид полного треугольника. С помощью специальных приспособлений нить, на которой подвешивалась игла, прикреплялась к выступу, причем так, что средняя точка иглы попадала в точности под вершину треугольника.

Магнитная игла *ll* была сделана из стальной проволоки толщиной 0,8 линии и имела длину около 2 дюймов. Ее концы были вставлены в цилиндры из слоновой кости, к одному из которых прикреплялась латунная проволока, заостренная и слегка загнутая вниз. Этот латунный указатель, служащий индикатором, расположен вблизи латунной дуги *ии*, покоящейся на деревянном основании и разделенной на градусы. Сначала я сделал магнит столь длинным, что его конец двигался непосредственно над градуированной шкалой. Однако затухающий характер его движения, на что указывает малое число совершаемых им колебаний, напомнил мне об экспериментах, недавно проведенных Араго², и заставил меня избрать другую схему.

Таким образом, изготовленная игла подвешивалась на полоске из расплюсненной золотой проволоки 5 дюймов длиной, которая прикреплялась к крутильному подвесу в точности по оси вращения. Такие резиноподобные металлические полоски, на мой взгляд, гораздо лучше подходят для экспериментов с крутильным подвесом, чем цилиндрические проволоки. Полоска, которую я использовал в своих крутильных весах, не говоря о ее малой длине, которая, по моему мнению, весьма желательна, в столь высокой степени отвечает всем требованиям, [предъявляемым] к исследованиям с крутильными весами, что после того, как полоска подвергалась усилию, соответствующему более чем трем полным оборотам, при освобождении нагрузки она принимала свое первоначальное положение. Тем не менее после каждого опыта я определял положение равновесия иглы, чтобы убедиться, что в приборе не произошло никаких изменений. Более того, я полагаю, стоит отметить, что опыты, проведенные с похожей латунной иглой, убедили меня, что малые и большие колебания (я исследовал их от двух полных оборотов до нескольких градусов) происходят в точности за одно и то же время, так что в этом отношении здесь нечего опасаться.

Крутильный подвес был приклеен к верхней пластинке основания так, что прямая линия, проведенная поперек латунной полоски *bc* в направлении центральной точки градуированной дуги и простой шелковой нити, натянутой перпендикулярно этой дуге, лежала в плоскости магнитного меридиана, так же как и магнитная игла, когда ее указатель был направлен на нуль шкалы. На выступе основания *k* находилась выпуклая линза с фокусным

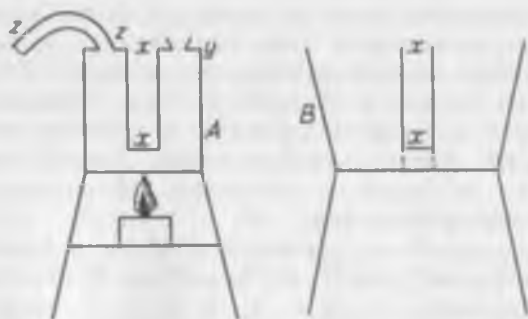


Рис. 81

расстоянием в один дюйм, установленная таким образом, чтобы [с ее помощью] могла наблюдаться нижняя градуированная шкала. Для того чтобы избежать параллакса, глаз в процессе наблюдения всегда помещался так, чтобы шелковая нить и средняя точка шкалы совпадали. Наблюдения проводились следующим образом. Как только игла отклоняется под действием электрического тока в приборе, полоска закручивается в противоположную сторону с помощью вращающейся части подвеса до тех пор, пока латунный указатель иглы не встанет за шелковой нитью напротив средней точки шкалы. Затем закручивание считается по верхней шкале с точностью до сотых долей оборота, число которых, как известно, дает силу, которая действует на иглу.

Концы проводников, использовавшихся в эксперименте, были опущены в чашечки с ртутью m , m' , над которыми для большей уверенности располагалось простое устройство, гарантировавшее, что концы каждого проводника всегда одинаково находились в контакте со ртутью. Вдобавок концы проводников, когда имелась какая-либо причина опасаться контакта со ртутью, покрывались канифолью, а торцевые поверхности начисто стачивались напильником и постоянно обновлялись. Совершенный металлический контакт различных частей — необходимое условие в исследованиях этого рода, поскольку в противном случае наблюдения не будут согласовываться между собой.

Наконец, для того чтобы придать частям прибора, где в контакте находятся висмут и медь, нужную разность температур, я изготовил два оловянных сосуда, сечения которых в увеличенном масштабе показаны на рис. 81. Каждый из них имел в своей средней части пространство xx , открытое сверху, а в других частях полностью закрытое для вставления в него ножек ab , $a'b'$. В сосуде A вода постоянно поддерживалась в состоянии кипения. Этот сосуд имел отверстие yy , которое могло закрываться пробкой и через которое в него наливалась вода; с другой стороны находилась трубка zz , через которую выходил пар. В сосуд B помещался снег или кусочки льда. Ножки ab , $a'b'$ зашивались

в тонкий, но плотного плетения шелк, а затем вставлялись в выемки xx , которые вслед за этим наполнялись до высоты примерно в один дюйм мелкой дробью, их верхняя часть заполнялась после этого толченым стеклом. В этих условиях все точки контакта висмута и меди находились в области, заполненной свинцом, который хорошо проводит тепло, а слой стекла защищал эту область от быстрых изменений температуры, обусловленных окружающим воздухом.

После этого подробного описания прибора я перехожу к экспериментам, которые провел с его помощью. Я изготовил восемь различных проводников 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, имевших длину соответственно 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 дюймов и толщину $\frac{7}{8}$ линии, вырезанных из одного куска полоскового медного провода, приготовленного описанным выше способом. После того как вода кипела на протяжении получаса, эти провода один за другим включались в цепь. Между любыми двумя сериями экспериментов, которые длились от 3 до 4 ч, всегда делался часовой перерыв, когда некоторое количество уже подогретой воды доливалось [в сосуд A]; вскоре эта вода начинала кипеть. Затем проводники вновь последовательно включались в цепь, но в обратном порядке. Таким образом я получил следующие результаты.

Оказывается, что сила ощутимо уменьшается день ото дня. Я не осмеливаюсь решить, следует ли искать причины этого [различия] в изменении площади контактов или в том факте, что 8 и 15 января были очень холодными днями и коробка со льдом стояла на окне слабо обогреваемой и защищенной комнаты. Думаю, что необходимо добавить, что начиная с 15 января я больше не наблюдал подобных различий.

Специально следует отметить тот факт, что нельзя заметить никаких следов колебаний, подобных возникшим при наличии в цепи гидроэлектрической батареи. Когда игла приходила в состояние покоя, она оставалась на своем месте без дальнейшего движения. Я часто следил за ней в течение получаса после проведения серии наблюдений и не отметил ни малейшего изменения ее положения. Вообще, когда игла при подключении проводника приходила в равновесие и удерживалась в этом положении стопором, помещавшимся по одну сторону от нее, то после замыкания цепи этим же проводником (вслед за его удалением на некоторое время из цепи) не наблюдалось ни малейшего движения [иглы] в противоположную сторону. Это подтверждает вывод, что колебания имели своим источником изменения в жидкости, которая обуславливает электрический ток сам по себе и поднимается и спадает вместе с ним. Кажется, как будто движущимся электричеством осуществляется разделение определенных составляющих жидкости, которое происходит в соответствии с теми же в точности законами, что и те, которые были определены для действия покоящегося электричества. Увеличение силы проявляется в возросшем разделении составляющих, уменьшение силы допускает частичное объединение, которое становится пол

Время наблюдения	Серия опытов	Проводники							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Янв. 8	I	$326\frac{3}{4}$	$300\frac{3}{4}$	$277\frac{3}{4}$	$238\frac{1}{4}$	$190\frac{3}{4}$	$134\frac{1}{2}$	$83\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$
Янв. 11	II	$311\frac{1}{4}$	287	267	$230\frac{1}{4}$	$183\frac{1}{2}$	$129\frac{1}{4}$	80	46
	III	307	284	$263\frac{3}{4}$	$226\frac{1}{4}$	181	$128\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
Янв. 15	IV	$305\frac{1}{4}$	$281\frac{1}{2}$	259	224	$178\frac{1}{2}$	$124\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
	V	305	282	$258\frac{1}{4}$	$223\frac{1}{2}$	178	$124\frac{3}{4}$	78	44

ным, когда сила исчезает. Весьма вероятно, и мы позднее найдем подтверждение этой точке зрения, что разделение жидкости током создает изменение не только в возбуждающей силе цепи, но также и в проводимости жидкости, и именно эта изменчивость в контурах с гидроэлектрическими элементами делает законы проводимости в них такими путанными и столь трудно раскрываемыми. Как только мы пытаемся определить лишь влияние металлов на проводимость электрического тока, то сразу же становится ясно, что цепи с гидроэлектрическими элементами не подходят для этой цели, поскольку они порождают множество нерегулярностей; в то же время термоэлектрическая цепь полностью годится для этой цели. Сейчас мы увидим, что она дает.

Уже приведенные числа могут быть весьма удовлетворительно представлены уравнением

$$X = \frac{a}{b+x},$$

где X — это сила магнитного действия, возникающая при использовании проводника, x , а a и b — постоянные величины, завися-

Серия	Проводники							
	1	2	3	4	5	6	7	8
I	328	$300\frac{1}{2}$	$277\frac{1}{2}$	$240\frac{3}{4}$	$190\frac{1}{2}$	$134\frac{1}{2}$	$84\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$
II	313	$287\frac{1}{4}$	$265\frac{1}{3}$	$230\frac{1}{4}$	182	$128\frac{1}{3}$	$80\frac{3}{4}$	$46\frac{1}{3}$
III	$309\frac{1}{2}$	284	$262\frac{1}{3}$	228	180	127	$79\frac{3}{4}$	$45\frac{3}{4}$
IV	$305\frac{1}{2}$	$280\frac{1}{2}$	259	$224\frac{3}{4}$	$177\frac{3}{4}$	$125\frac{1}{4}$	79	45
V	$305\frac{1}{2}$	$280\frac{1}{2}$	259	$224\frac{3}{4}$	$177\frac{3}{4}$	$125\frac{1}{4}$	79	45

шие от возбуждающей силы и сопротивления остальной части контура.

Если, например, мы положим b равным $20^{1/4}$ и a в различных сериях равным 7285, 6965, 6885, 6800, 6800, то путем расчетов получим следующие результаты [см. табл.].

Если мы сравним эти числа, найденные посредством расчета, с предыдущей последовательностью чисел, найденной из опыта, то окажется, что разности очень малы и имеют порядок, который можно ожидать в исследованиях такого рода. Я не буду откладывать рассмотрение этого вопроса, но перейду к доказательству формулы в крайних случаях. Этот метод наиболее продуктивен для установления общей применимости закона, который был выведен из ограниченного числа случаев.

Для этого я сделал четыре проводника a , b , c , d соответственно 2, 4, 8, 16 дюймов длины из латунной проволоки толщиной 0,3 линии, которую я использовал в моих предшествующих исследованиях с гидроэлектрическими цепями; они дают в цепи числа $111^{1/2}$, $64^{3/4}$, 37 , $19^{3/4}$, когда проводник l дает 305. Из приведенного выше уравнения можно определить длины, соответствующие этим числам. Мы нашли, что они равны $40^{3/4}$, $84^{3/4}$, $163^{1/2}$, 324 . Эти значения в целом согласованно указывают, что 1 дюйм латунного провода эквивалентен $20^{1/2}$ дюймам расплющенного медного провода. После этой предварительной работы я ввел в цепь проводник из той же латуни длиной 23 фута (который в этой серии я обозначаю как номер 5); он дал $1^{1/4}$. И действительно, мы получаем почти в точности это значение, если для x в уравнении возьмем величину $23 \cdot 12 \cdot 20^{1/2} = 5658$. На этом примере мы видим, что уравнение очень точно согласуется с опытом почти до того состояния, когда сопротивление проводников подавляет силу.

Далее я поддерживал один конец пары медь — висмут при температуре 0°R , используя лед, в то время как другой конец находился при комнатной температуре, которая, как показал термометр, висевший во время наблюдений рядом с прибором, оказалась стабильно равной $7^{1/2}{}^{\circ}\text{R}$. Проводники, включенные в контур в последовательности 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, дали такие числа: 27, 25, $23^{1/3}$, 20, $15^{1/2}$, $10^{3/4}$, $6^{1/2}$, $3^{2/3}$, $6^{1/2}$, $10^{3/4}$, $15^{1/2}$, 20, $23^{1/3}$, $25^{1/4}$, $27^{3/4}$. Если мы подставим в наше уравнение $b = 20^{1/4}$ и так определим a , что $a/22^{1/4} = 27^{3/8}$, то путем расчета мы получим значения, которые ни в одном случае не отличаются от приведенных выше более чем на половину деления, откуда следует, что уравнение справедливо для любых значений возбуждающей силы. Из этого последнего исследования становятся очевидными еще два важных момента. Во-первых, примечательное обстоятельство заключается в том, что величина b остается неизменной, в то время как сила уменьшается более чем в 10 раз; так что a , по-видимому, зависит только от возбуждающей силы, а b — только от неизменяемой части цепи. Во-вторых, из этого эксперимента, видимо, следует, что сила термоэлектрического

контура в точности пропорциональна разности температур его двух концов.

В заключение этого исследования я не могу удержаться от упоминания об одном наблюдении, которое в более непосредственной форме подтверждает вывод Дэви³ о том, что проводимость металлов возрастает с понижением температуры. Я брал 4 дюйма медного провода и включал его в цепь; он давал 159 делений. Когда я нагревал провод в его средней части пламенем спиртовки, сила постепенно падала на 20 делений и более и таким же было действие, когда я сдвигал пламя к одному или другому концу проводника; но когда я поместил его на слой снега, сила возросла на два деления. Температура в комнате была $8\frac{1}{4}$ °R. Этот факт не кажется здесь не относящимся к делу, поскольку он может вызывать небольшие аномалии. <...>

Комментарий

Перевод с немецкого отрывков из работы Г. Ома выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektricität leitenbst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaischen Apparates und Schweigerschen Multipliers. «Journal für Chemie und Physik», 1826, Bd. 46, s. 137.

В начале работы Ом объясняет, с какими трудностями при проведении опытов связано использование в качестве источника тока элемента Вольты.

Речь, по-видимому, идет о работе Араго «Замечание, касающееся магнитных явлений, в которых порождается движение».

Имеется в виду работа Дэви «Дальнейшие исследования магнитных явлений, порождаемых электричеством; с описанием нескольких новых опытов над свойствами наэлектризованных тел в отношении их проводимости и температуры».

Литература

- [1] Собрание работ Г. Ома: Gesammelte Abhandlungen von G. S. Ohm. Hrsg. von E. Lommel. Leipzig, 1892.
- [2] Denerlein E. G. Georg Simon Ohm 1789—1854. Leben und Wirken des grossen Physikers. Erlangen, 1954.
- [3] Кошманов В. В. Георг Ом. М., 1980.



М. Фарадей

1791—1867

Об электромагнетизме

Открытие Г. Х. Эрстедом взаимодействия проводника с током и постоянного магнита вызвало всплеск исследований в области электромагнетизма в 20-е годы XIX в. Ими занимались крупнейшие физики: А. М. Ампер, Х. Дэви, Ф. Араго и др. В ходе этих исследований было сделано множество интересных наблюдений, установлены некоторые закономерности. Однако до формирования целостной картины электромагнитных явлений было еще далеко. Накопленный материал требовал дополнения и обобщения. Удивительно, но эта нелегкая задача была решена практически одним ученым, который не только обогатил физику рядом важнейших экспериментальных открытий, но и сформировал общий, хотя и сугубо качественный, подход к описанию основных явлений электромагнетизма. Этим ученым был М. Фарадей.

Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 г. в Лондоне в семье кузнеца. Мальчик смог получить лишь начальное образование. С двенадцати лет он сначала работал разносчиком газет, а затем был подмастерьем в переплетной мастерской. Недостаток знаний Фарадей компенсирует самообразованием. Благодаря счастливой случайности любознательный юноша попадает в поле зрения известного химика Х. Дэви, который делает Фарадея своим ассистентом в Королевском институте (1813).

Первая научная работа Фарадея была посвящена химическому анализу едкой тосканской извести (1816). Кроме нее Фарадей опубликовал еще ряд заметок по химии. Его наивысшее достижение в этой области — оживление газов (аммиака, азота, углекислого газа и др.). Опыты, проведенные Фарадеем в 1823 г., положили начало целому научному направлению — физике низких температур, немыслимой без жидких газов.

В 1821 г. Фарадей сделал свое первое открытие в области электромагнетизма, осуществив вращение магнита вокруг проводника с током и проводника с током вокруг магнита. Однако прошли долгие десять лет, пока Фарадей сделал следующий, еще более важный шаг в изучении электромагнетизма — открытие явления электромагнитной индукции. За эти десять лет положи-

ние Фарадея в научном мире упрочилось: в 1824 г. он был избран членом Лондонского Королевского общества, а через год стал директором лаборатории Королевского института, сменив на этом посту Дэви.

Внешне жизнь Фарадея не богата событиями. В 1833 г. он стал профессором химии Королевского института и оставил этот пост в 1862 г. в связи с ухудшением здоровья. Известность получили публичные лекции, которые читал Фарадей. Он был истинным мастером научной популяризации. Фарадею не раз предлагали почетные должности, которые гораздо лучше могли бы обеспечить его материально, но он был верен своей страсти — научным исследованиям.

Фарадей избирался почетным членом многих научных обществ и академий, в том числе Петербургской Академии наук. Фарадей умер 25 августа 1867 г.

Все основные работы по электричеству и магнетизму Фарадей представлял в Лондонское Королевское общество в виде докладов-серий на протяжении двадцати четырех лет. Впоследствии эти доклады были опубликованы отдельным изданием, в котором наблюдения и выводы имеют единую нумерацию. О фундаментальности труда Фарадея дает представление простое перечисление полученных им результатов: открытие явления электромагнитной индукции (1831); открытие законов электролиза (1834); обнаружение поляризации диэлектриков и введение понятия диэлектрической проницаемости (1837); предсказание существования электретов как электростатических аналогов постоянных магнитов (1839, получены в 1919); экспериментальное доказательство закона сохранения электрического заряда (1843); открытие диамагнетизма и обнаружение явления вращения плоскости поляризации света в веществе, помещенном в магнитное поле (1845); выдвижение идеи об электромагнитной природе света (1846); открытие парамагнетизма (1847).

На основе огромного собранного экспериментального материала Фарадей доказал тождественность различных видов электричества. Обнаруженные Фарадеем законы электролиза были свидетельством дискретности электрического заряда.

Начиная с 30-х годов у Фарадея начинает формироваться идея о передаче электромагнитных взаимодействий посредством поля, которая находит окончательное оформление в начале 50-х годов. По мнению А. Эйнштейна, идея поля была самым важным открытием со времен Ньютона. Он писал, что «надо иметь могучий дар научного предвидения, чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между зарядами и частицами».

Особенностью творчества Фарадея являлось практически полное отсутствие математических выкладок в его работах. Это объяснялось слабостью его математического образования и во многом препятствовало широкому восприятию его новаторских идей.

жизни (умер ученый 10 февраля 1865 г.) — и ректора Петербургского университета, руководил научными исследованиями студентов и аспирантов.

Ленц заложил основы первой в России научной школы физиков-электротехников, из которой вышли впоследствии такие ученые, как А. С. Попов, Ф. Ф. Петрушевский, В. Ф. Миткевич, М. А. Шателен и др.

Экспериментальные исследования по электромагнетизму Ленц начал в 1831 г. в академической лаборатории, перешедшей к нему от первого русского электротехника, открывшего и описавшего электрическую дугу, академика В. В. Петрова. Ленц сконструировал чувствительный гальванометр (мультипликатор — прибор, оценивающий силу тока по отклонению магнитной стрелки, расположенной вблизи катушки с током) и магнитной стрелки, расположенной вблизи катушки с током) и проверил справедливость закона Ома. Он одним из первых в Европе широко применял этот закон в своих исследованиях и немало способствовал признанию закона научной общественностью.

В 1843 г. Ленц после проведения тонких экспериментов независимо от Дж. Джоуля приходит к установлению закона теплового действия тока. На основании выполненных 16 серий измерений Ленц в статье «О законах выделения тепла гальваническим током» сделал следующий вывод: нагревание проволоки гальваническим током пропорционально сопротивлению проволоки и квадрату силы тока.

Ленц также изучал зависимость сопротивления металлов от температуры.

Особым этапом в творчестве Ленца стала его совместная исследовательская работа с другим петербургским академиком, электротехником Б. С. Якоби. Они впервые разработали методы расчета электромагнитов в электрических машинах и установили существование в этих машинах так называемой «реакции якоря». Все это сыграло важную роль в развитии теоретических основ электротехники.

Сразу же после открытия Фарадеем явления электромагнитной индукции Ленц приступил к поискам общего правила определения направления индукционного тока. 29 ноября 1833 г. он докладывает о найденном правиле в Академии наук. Вскоре его доклад перепечатывают многие европейские журналы, и правило Ленца становится общепризнанным, а его автор приобретает мировую известность. Но открытие Ленца давало не только удобное правило для определения направления индукционного тока, была найдена закономерность, важная как для теоретической электродинамики, так и для развития электротехники.

В 1846 г. Ф. Нейман первым указывает на энергетический смысл открытия Ленца, а годом позже Г. Гельмгольц в мемуаре «О сохранении силы» показывает, что правило Ленца представляет собой следствие закона сохранения энергии применительно к электромагнитным явлениям. Сходное устройство динамомашины

и электромоторов (что называется в электромашиностроении принципом эквивалентности или обратимости) также является следствием правила Ленца.

Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией

Доложено 29 ноября 1833 г.

В своих «Экспериментальных исследованиях по электричеству» Фарадей¹ определяет направление гальванических токов, вызываемых индукцией, следующим образом: 1) гальванический ток вызывает в приближаемой к нему параллельной проволоке ток противоположного направления, а в удаляемой — ток того же направления; 2) магнит вызывает в перемещающемся около него проводнике ток, зависящий от направления, в котором проводник при своем движении пересекает магнитные линии. Однако помимо того, что здесь даются два совершенно различных правила для одного и того же явления (так как, по изящной теории Ампера, магнит можно себе представить как систему круговых гальванических токов), это правило является еще и недостаточным, по крайней мере непосредственно, так как оно не охватывает ряда случаев, например того, когда проводник, расположенный перпендикулярно току, перемещается вдоль него. Наконец, второй пункт правила, по моему убеждению, не обладает такой степенью простоты, чтобы его можно было применять к отдельным [конкретным] случаям. Я думаю, что и другие читатели этого, вообще говоря, превосходного произведения согласятся в этом со мной, если вспомнят п. 116, где Фарадей пытается сделать это правило более отчетливым, пользуясь [в качестве проводника] лезвием ножа, перемещаемым по магниту; да Фарадей и сам упоминает о том, как трудно хорошо объяснить направление токов.

Нобили исходит из первого положения Фарадея, а именно, что при приближении проводника к параллельному ему гальваническому току в проводнике возбуждается ток противоположного направления, а при удалении — того же направления, и пытается только этим правилом объяснить все явления электродинамической индукции и направления возбуждаемых ею токов. Однако эта работа, вообще говоря очень ценная, в ряде пунктов не имеет для меня той степени очевидности, которой мы вправе ожидать в физических статьях; сюда относится пункт, содержащий объяснение [появления] токов, которые возникают в проводнике, перпендикулярном гальваническому току и перемещающемся вдоль него.

Фарадей, конечно, прав, когда он против всей теории итальянского физика выдвигает то возражение, что при вращении магни-

та вокруг его собственной оси и при надлежащем наложении на него проводов также возбуждается гальванический ток, хотя здесь никакого приближения или удаления [амперовых] токов магнита относительно последнего нет; напротив, все в нем сохраняет свое относительное положение.

Сейчас же по прочтении статьи Фарадея я пришел к мысли, что все опыты по электродинамической индукции могут быть легко сведены к законам электродинамических движений, так что если эти последние считать известными, то можно определить и первые. Так как это мое представление оправдалось на ряде опытов, то я и изложу его в последующем, проверяя отчасти на уже известных и отчасти на нарочно для этой цели поставленных опытах.

Положение, посредством которого магнитоэлектрическое явление сводится к электромагнитному, заключается в следующем.

Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что [если бы данный] проводник был неподвижным, то мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону. При этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться только в направлении движения или в противоположном направлении.

Поэтому, для того чтобы ясно представить себе направление тока, возбуждаемого в подвижном проводнике посредством электромагнитной индукции, надо сообразить, куда по электромагнитным законам должен быть направлен тот ток, который вызвал бы это движение [проводника]; направление тока, возбужденного в проводнике, будет ему противоположно. Для примера рассмотрим известный фарадеевский опыт с вращением, в котором через вертикально висящий подвижный проводник пропускается гальванический ток сверху вниз. Следовательно, этот проводник обвивает северный полюс находящегося как раз под ним магнита в направлении от севера через восток к югу. Если мы теперь не будем пропускать ток через подвижный проводник, а сообщим проводнику только что упомянутое движение какими-нибудь механическими способами, то, по нашим законам, в нем будет возбуждаться ток, который, будучи направлен в сторону, противоположную предыдущему случаю, пойдет по подвижному проводнику снизу вверх. Он может быть и обнаружен в нем, если соединить его верхний и нижний концы через мультипликатор.

Если мы теперь отчетливо представим себе этот закон, то сможем вывести из него следствие, что каждому явлению электромагнитного движения должен соответствовать случай электродинамической индукции. Нужно только движение, вызываемое электромагнитным путем, осуществлять каким-нибудь другим способом. Тогда в подвижном проводнике будет возбуждаться ток, противоположный по направлению тому, который проходил в электромагнитном опыте. В дальнейшем я приведу несколько

таких соответствующих друг другу явлений, и притом так, что тотчас после электромагнитного явления будет следовать соответствующее ему магнитоэлектрическое. Первое я буду обозначать большими буквами латинского алфавита, а второе — соответствующими малыми. Таким образом, мы одновременно наилучшим образом осветим правильность нашего закона. Еще большую ясность внесут рисунки [рис. 86—88], в которых схемы опытов приведены с теми же обозначениями, как в тексте ($A, a — F, f$). Относительно них я замечу следующее: как направление движения, так и направление тока обозначены стрелками, но стрелки в этих двух случаях имеют различную форму. Стрелка с кружком на конце относится к движению, а стрелка без кружка на конце — к току; стрелки, вычерченные сплошной линией, обозначают осуществляемое в опыте движение или пропущенный ток, а стрелки пунктирные — того же вида движение, или ток, полученные в результате опыта. Помня эти обозначения, можно без труда разобратся в рисунках. Итак, я перехожу к самим опытам.

A. Прямолинейный проводник, через который проходит гальванический ток, притягивает параллельный ему подвижный проводник, когда через него пропущен ток, имеющий одинаковое направление с током в первом проводнике [рис. 86]. Но он его отталкивает, если направление тока в подвижном проводнике противоположно направлению в неподвижном (Ампер).

a. Если через один из двух прямолинейных параллельных друг другу проводников проходит гальванический ток и если второй проводник приближается к первому в *параллельном направлении*, то в подвижном проводнике во время перемещения возбуждается ток, противоположный току в неподвижном проводнике; но если его удалять, то возбуждаемый ток имеет то же направление, что и возбуждающий (Фарадей). (...)

D. Если прямолинейный ток проходит над свободно висящей магнитной стрелкой, ориентируемой силой земного магнетизма в направлении с юга на север и притом параллельно стрелке, то северный полюс магнитной стрелки отклонится к западу [рис. 87]. Если же ток идет с севера на юг, то стрелка отклоняется на восток. Если проволока расположена под стрелкой, то в первом случае стрелка отклоняется на восток, а во втором — на запад (Эрстед).

d. Если над магнитом, ориентированным в его естественном положении с юга на север, расположить параллельно ему проводник, а затем магнит внезапно повернуть вокруг его средней точки северным полюсом на запад, то в проводнике возбуждается ток, идущий с севера на юг; если магнит повернуть на восток,

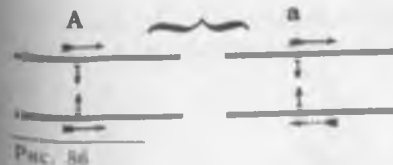


Рис. 86



Рис. 87

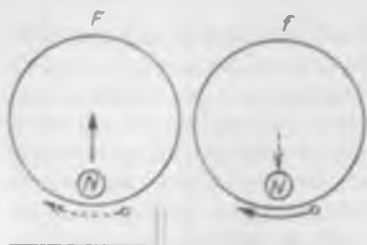


Рис. 88

то ток пойдет с юга на север. Если проводник находится под магнитом, то ток в первом случае идет с юга на север, а во втором — с севера на юг (Ленц). Для этого опыта я взял в качестве проводника сторону квадрата длиной 1 фут, состоящую из нескольких витков оплетенной шелком медной проволоки. Эту сторону я располагал на таком расстоянии от магнита длиной 5 дюймов, чтобы можно было пренебречь электродинамическим действием его на другие три стороны по сравнению с действием на эту сторону. Для того чтобы определить направление возникающего в проводнике тока по вышеприведенному правилу, надо себе представить, что магнит неподвижен и что проводник поворачивается в первом случае на восток, а во втором — на запад, что, очевидно, одно и то же, так можно легко ориентироваться. (...)

F. Если столь известное в электромагнитных опытах колесо Барлоу² расположить в плоскости меридиана, пропустить через него ток *от окружности к центру* и так установить у его нижнего конца подковообразный магнит, чтобы северный полюс был расположен к западу от колеса, а южный — к востоку, то колесо будет вращаться вокруг своей оси в направлении стрелки часов, циферблат которых обращен на запад [рис. 88]. Если ток идет *от центра к периферии*, то движение происходит в противоположном направлении. Если магнит повернуть так, чтобы его северный полюс был расположен на восток, то и направления вращения в обоих случаях также меняются на обратные (Барлоу).

f. Если насадить медный диск на ось, вокруг которой он мог бы вращаться, и поднести к диску подковообразный магнит так, чтобы его северный полюс приходился над диском, а южный — под ним, и поворачивать затем диск по направлению стрелки часов, циферблат которых обращен кверху, то в диске возникает ток, идущий *от центра к окружности*. Если вращение происходит против направления стрелки часов, обращенных кверху, то ток идет *от окружности к центру*. При перемене полюсов меняются также направления токов во вращающемся диске (Фарадей).

Соответствие этих двух опытов станет совершенно очевидным, если представить себе, что колесо Барлоу расположено горизонтально своей западной частью кверху, что и показано на рисунке (рис. 88). (...)

Я надеюсь, что на основании вышеизложенного можно считать достаточно доказанным совпадение вышеуказанного закона в его следствиях с опытом.

Комментарий

Перевод с немецкого статьи Э. Х. Ленца, опубликованной в журнале «Annalen der Physik und Chemie» (1834, Bd. 31, s. 483—494), выполнен М. В. Савостьяновой. Статья с незначительными сокращениями воспроизводится по изданию: Ленц Э. Х. Избранные труды. М., 1950.

¹ Ленц цитирует здесь те работы Фарадея об электромагнитной индукции, которые вышли в свет ранее 20 ноября 1833 г., т. е. первую и вторую серии.

² «Колесо Барлоу» — одна из первых моделей электромотора постоянного тока (1820). По традиции это устройство в XIX в. описывалось практически во всех учебниках физики.

Литература

- [1] Ленц Э. Х. Избранные труды. М., 1950.
- [2] Лежнев О. А., Ржонсинский Б. Н. Эмилий Христианович Ленц. М. — Л., 1952.
- [3] Шателен М. А. Русские электротехники XIX века. М. — Л., 1955.



Р. Майер

1814—1878

О сохранении и превращении энергии

Открытие закона сохранения и превращения энергии, одно из величайших, по мнению Ф. Энгельса, достижений науки XIX в., явилось естественным следствием развития всех областей физики. Важную роль в истории этого открытия сыграли и запросы практики: в условиях все расширяющегося машинного производства особенно остро встал вопрос об эффективности различных машин и механизмов. Закономерность установления закона сохранения энергии подтверждается тем, что три исследователя: Р. Майер, Дж. Джоуль и Г. Гельмгольц — независимо друг от друга почти одновременно пришли к сходным выводам. Хронологически первыми были публикации немецкого врача и естествоиспытателя Р. Майера.

Юлиус Роберт Майер родился в Хейльбронне 25 ноября 1814 г. в семье аптекаря. Высшее медицинское образование он получил в Тюбингенском университете, который окончил в 1838 г. Решающее значение в научной карьере Майера имело его участие в качестве судового врача в плавании на голландском судне на остров Яву в 1840—1841 гг., во время которого и были сделаны первые наблюдения, приведшие Майера к открытию закона сохранения энергии.

К идее превращения и сохранения различных форм энергии Майер пришел в 1841 г. Тогда же он отослал в редакцию журнала «Annalen der Physik» свою первую научную статью под названием «О количественном и качественном определении сил». Уже в этой статье можно найти общую формулировку закона: «Движение, теплота и, как мы намерены показать в дальнейшем, элетричество представляют собой явления, которые могут быть сведены к одной силе [надо читать — энергии; Майер и в дальнейшем энергию обозначает термином «сила»], которые изменяются друг другом и переходят друг в друга по определенным законам». Однако в статье было много неясных мест и ошибочных утверждений, противоречащих ньютоновской механике, и, возможно, поэтому редакция не напечатала статью начинающего исследователя и даже не ответила ему.

Не дождавшись ответа, Майер вскоре пишет вторую статью, которая появилась в мае 1842 г. под названием «Замечания о силах неживой природы» в специальном химико-фармацевтическом журнале «Annalen der Chemie und Pharmacie», куда физики заглядывали редко, и это обстоятельство сыграло в дальнейшем определяющую роль в творческой судьбе ученого. Статья содержала не только отчетливую формулировку закона сохранения и превращения энергии, но и глубокий анализ экспериментальных фактов, полученных предшественниками Майера англичанами Б. Румфордом и Х. Дэви, а также самим Майером, доказавшим несостоятельность представления о теплоте как особой невесомой материи. Вместе с тем, увлекшись чисто феноменологическим (термодинамическим) подходом к проблеме, Майер даже не пытался объяснить природу теплоты, вследствие чего Майер вынужден был обосновывать свое открытие методом аналогии, ссылаясь на закон сохранения материи (массы) в химии. В статье выдвигается в качестве конкретной физической проблемы опытное определение механического эквивалента теплоты и предлагается идея такого эксперимента. (Подобный эксперимент поставил в 1847 г. Дж. Джоуль, не знавший о работе Майера.) В этой же статье Майер изложил результаты своих вычислений (подробные расчеты он приводит в письмах к друзьям), основанных на подсчете работы, совершаемой газом при изобарическом расширении, которая оказывается равной разности теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме. Позднее уравнение $C_p - C_v = R$ — одно из основных термодинамических соотношений — было названо уравнением Майера.

Статья Майера не привлекла внимания ученых. Интерес к закону сохранения энергии возник у физиков лишь после публикации работ Джоуля и Гельмгольца. В связи с этим Майеру пришлось отстаивать свой приоритет. Однако немецкое научное сообщество не поддержало его в этом. Майер подвергается травле и насмешкам в родном Хейльбронне; родные относятся к нему без уважения и открыто считают его маньяком. В 1850 г. ученый в порыве отчаяния делает попытку покончить с собой, выбросившись из окна своего дома. Через год родственники помещают его в дом для душевнобольных, хотя сам Майер не считал себя таковым. Выходит он из больницы в 1853 г. физически и морально сломленным и вплоть до 1862 г. остается в полной неизвестности; в Германии его даже считают умершим. Лишь постепенно работы Майера начинают получать признание. Однако это признание не может вернуть Майеру здоровье и силы. Р. Майер умер 20 марта 1878 г.

Целью следующих строк является попытка ответить на вопрос о том, что мы должны понимать под «силами»¹ и как таковые относятся между собой. В то время как обозначением «материя» предмету приписываются очень определенные свойства, например свойство тяжести или способность заполнения пространства, с названием силы связывается преимущественно понятие чего-то неизвестного, непостижимого, гипотетического. Попытка уразуметь понятие силы столь же точно, как и понятие материи, и тем обозначить только объекты действительного исследования не может не приветствоваться, вместе с вытекающими отсюда последствиями, друзьями ясного, свободного от гипотез мировоззрения².

Силы суть причины; следовательно, к ним имеет полное применение аксиома: *causa aequal effectum* (причина равна действию)³. Если причина c вызывает действие e , то $c=e$; если e является снова причиной некоторого другого действия f , то $e=f$ и т. д.: $c=e=f=\dots=c$. В цепи причин и действий не может когда-либо один член или часть какого-либо члена сделаться нулем, как это вытекает из природы уравнения. Это первое свойство всех причин мы называем их *неразрушимостью*.

Если данная причина c вызвала равное ей действие e , то как раз вместе с тем c перестало существовать; превратилось в e , если бы после произведения e с целиком или частью еще осталось существовать, то этой остаточной причине должно было бы соответствовать еще дальнейшее действие; действие c вообще было бы более e , что противоречит предположению, что $c=e$. Так как c переходит в e , а e — в f и т. д., то мы должны рассматривать эти величины как различные формы проявления одного и того же объекта. Способность принимать различные формы есть существенное свойство всех причин. Принимая во внимание оба свойства вместе, мы говорим: причины суть (количественно) *неразрушимые* и (качественно) *способные к превращениям* объекты.

В природе имеется два рода причин, между которыми эмпирически не существует никакого перехода. Одну группу образуют причины, которым присуще свойство весомости и непроницаемости — материи, другая группа — это причины, у которых это свойство отсутствует, — силы, называемые благодаря этому характеристическому свойству также *невесомыми*. Силы суть неразрушимые, способные к превращениям, невесомые объекты⁴.

Мы используем прежде всего в качестве примера причин и действий вещества. Гремучий газ $H+O$ и вода HO относятся друг к другу, как причина и действие; следовательно, $H+O=HO$ ⁵. Если из $H+O$ происходит HO , то кроме воды образуется еще теплота *cal*. Эта теплота также должна иметь некоторую

причину x . Следовательно, $H+O+x=HO+cal$. Теперь спрашивается, действительно ли $H+O=HO$ и $x=cal$, а не $H+O=cal$ и $x=HO$, что можно было бы заключить из приведенного выше уравнения. Приверженцы теории флогистона⁶ установили уравнение между cal и x , которое они называли флогистоном, и это был большой шаг вперед. Но они, в свою очередь, запутались в системе ошибок вследствие того, что вместо O поставили $-x$, т. е. примерно получили $H=HO+x$.

Химия, предметом которой является установление уравнений, выражающих существующую между веществами причинную связь, учит нас, что некоторому веществу как причине соответствует некоторое (другое) вещество в качестве действия. Но с равным основанием можно также сказать, что некоторой силе как причине соответствует некоторая (другая) сила как действие. Так как $c=e$ и $e=c$, то будет противоестественным называть в уравнении один член силой, другой — действием или явлением силы и связывать с выражениями «сила» и «явление» различные понятия. Следовательно, если причиной является вещество, то и в качестве действия получается таковое же; если же причиной является некоторая сила, то в качестве действия будет также некоторая сила.

Причина, которая обуславливает поднятие груза, есть сила; ее действие, *поднятый* груз, есть, следовательно, также *некоторая сила*. Это значит: *пространственная разность весовых объектов есть сила*. Так как эта сила обуславливает падение тел, то мы ее называем силой падения⁷. Сила падения и падение, а еще общее — сила падения и движение суть силы, которые относятся между собой как причины и действие, которые переходят друг в друга и являются двумя различными формами проявления одного и того же объекта. Пример: покоящийся на земле груз не есть сила; он не является причиной ни движения, ни поднятия другого груза и делается силой лишь в той мере, в какой он оказывается поднятым над землей. Причина — расстояние груза от земли — и действие — произведенное количество движения — находятся, как известно в механике, в постоянном равенстве.

Рассматривая тяжесть как причину падения, говорят о силе тяготения и спутывают, таким образом, понятия силы и свойства⁸. Как раз то, что должно быть существенно присуще каждой силе, — единство неразрушимости и способности к превращениям — отсутствует у всякого свойства. Между свойством и силой, между тяжестью и движением не может быть поэтому установлено также и необходимое при правильно понимаемом причинном отношении уравнение. Если же называют тяжесть силой, то вместе с тем представляют себе причину, которая, не убывая сама по себе, производит действие, и тем самым питают неправильные представления о причинной связи вещей. Для того чтобы тело могло падать, его поднятие необходимо не менее, чем его тяжесть, поэтому не следует только одной последней приписывать падение тел.

Предметом механики является установление уравнений, имеющих место между силой падения и движением, движением и силой падения и между самими движениями. Мы напомним здесь лишь об одном пункте. Величина силы падения находится, принимая поперечник Земли равным бесконечности, в прямом отношении к массе m и к ее понятию $d: v = md^9$. Если поднятие $d=1$ массы m переходит в движение этой массы с конечной скоростью $c=1$, то $v=mc$, но из известных, имеющих место между d и c отношений получается для других значений d или c в качестве меры силы величина mc^2 ; следовательно¹⁰, $v = md = mc^2$. Мы получаем закон сохранения живых сил на основе общего закона неразрушимости причин.

Мы видим в бесконечном числе случаев, как исчезает движение без того, чтобы им было произведено другое движение или поднятие груза. Но имеющаяся однажды налицо сила не может превратиться в нуль, она может только перейти в другую форму. Спрашивается: какую дальнейшую форму способна принять сила, которую мы познали как силу падения или движения? Разъяснение этого нам может дать только опыт. Чтобы целесообразно экспериментировать, мы должны избрать инструменты, которые приводили бы к уничтожению движения и по возможности мало изменялись бы подлежащими исследованию объектами. Если, например, тереть две металлические пластинки одна о другую, то мы будем наблюдать, как исчезает движение и, наоборот, возникает тепло, и вопрос теперь может быть только о том, является ли *движение* причиной тепла. Чтобы удостовериться в этом, мы должны обсудить вопрос: не имеет ли движение в бесчисленном числе случаев, в которых при применении движения налицо оказывается тепло, другое действие, чем тепло, и тепло — другую причину, чем движение?

Еще никогда не был поставлен серьезно опыт обнаружения действия прекращающегося движения; не опровергая заранее возможные гипотезы, мы обратим внимание лишь на то, что это действие не может быть, как правило, отнесено на счет изменения агрегатного состояния движущихся, трущихся тел. Если мы примем, что некоторое количество движения v применяется для того, чтобы трущееся вещество m превратилось в n , то должно было бы быть $m+v=n$ и $n=m+v$ и при обратном переведении в m , v должно было бы обнаружиться в какой-либо форме. При посредстве очень долго продолжавшегося трения двух металлических пластинок мы можем заставить исчезнуть мало-помалу огромное количество движения. Но пришло ли бы нам на ум снова найти в собранной металлической пыли хотя бы след исчезнувшей силы и стремиться ее из таковой восстановить? Мы повторяем, движение не может превратиться в ничто, и противоположные или положительные и отрицательные движения могут считаться равными нулю столь же мало, как могут возникнуть из нуля противоположно направленные движения или груз может сам себя поднять.

Сколько мало можно дать себе какой-либо отчет об исчезнувшем движении без признания причинной связи между движением и теплом, столь же мало без такого признания может быть объяснено и происхождение тепла от трения. Последнее не может быть выведено из уменьшения объема трущихся тел. Можно, как известно, расплавить посредством трения друг о друга в безвоздушном пространстве два куска льда; теперь делают попытки превратить в воду лед посредством неслыханно большого давления. Вода испытывает (как нашел автор) после сильного встряхивания повышение температуры. Нагретая вода (12°C и 13°C) занимает после встряхивания больший объем, чем до такового. Откуда же теперь получается это количество теплоты, которое может быть произведено посредством встряхивания в том же самом аппарате? Вибрационная гипотеза теплоты склоняется в пользу положения, что тепло есть действие движения, но не оценивает этого причинного отношения в полном объеме и переносит центр тяжести на однообразные колебания.

Но если теперь установлено, что для исчезающего движения во многих случаях (а «*exceptio confirmat regulam*» — исключение подтверждает правило) не может быть найдено никакого другого действия, кроме тепла, а для возникшего тепла — никакой другой причины, кроме движения, то мы предпочитаем допущению существования причины без действия и действия без причины допущение, что тепло возникает из движения, подобно тому как химик вместо не критического допущения исчезновения Н и О и возникновения необъяснимым образом воды устанавливают связь между Н и О, с одной стороны, и водой — с другой.

Естественную связь, существующую между силой падения, движением и теплом, мы можем представить следующим образом. Мы знаем, что тепло обнаруживается, если сближаются отдельные части массы какого-либо тела, например сгущение производит тепло. То, что справедливо теперь для мельчайших частиц массы и для их мельчайших пространственных промежутков, должно ведь найти свое применение также и к большим массам и измеримым пространствам. Отпускание груза есть действительное уменьшение объема Земли и, следовательно, должно безусловно стоять в связи с обнаруживающимся при этом теплом. Это тепло должно быть точно пропорционально массе груза и его (первоначальному) расстоянию. Эта точка зрения приводит к уравниванию силы падения, движения и тепла.

Между тем сколько мало оснований из имеющейся связи между силой падения и движением делать вывод, что сущность силы падения есть движение, столь же малое значение этот вывод имеет 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.

Если сила падения и движение равны теплу, то, естественно, и тепло должно быть равно движению и силе падения. Как воз-

никает тепло в качестве действия при уменьшении объема и прекращающемся движении, так же исчезает тепло в качестве причины при появлении его действий — движения, увеличения объема, поднятия груза.

В водяных силовых установках возникающее в результате уменьшения объема, которое постоянно испытывает Земля благодаря падению воды, и снова исчезающее движение непрерывно доставляет значительное количество теплоты; и наоборот, паровые машины служат снова для превращения тепла в движение или поднятие груза. Локомотив с его поездом может быть сравнен с перегонным аппаратом; тепло, разведенное под котлом, превращается в движение, а оно снова осаждается на осях колес в качестве тепла.

Мы заключим наши тезисы, которые следуют из аксиомы *causa aequal effectum* и находятся в совершенном соответствии со всеми явлениями природы, одним практическим выводом: для решения уравнений, существующих между силой падения и движением, посредством эксперимента должен быть определен путь, который приходится при падении в определенное время, например в первую секунду. Аналогично для решения уравнений, имеющих место между силой падения и движением, с одной стороны, и теплом — с другой, необходимо ответить на вопрос, как велико соответствующее определенному количеству силы падения или движения количество теплоты. Например, мы должны были бы определить, как высоко должен быть поднят определенный груз над поверхностью земли, чтобы его сила падения была эквивалентна нагреванию равного ему по весу количества воды от 0 до 1°C. То, что такое равенство действительно основывается на том, что существует в природе, может быть рассматриваемо как резюме всего сказанного выше.

Применяя установленные положения к тепловым и объемным отношениям разных газов, найдем, что опускание сжимающего газ столба ртути численно равно развиваемому в результате сжатия количеству теплоты. Отсюда получается, что если принять отношение коэффициентов теплоемкости атмосферного воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме равным 1,421, то опусканию единицы веса с высоты около 365 м соответствует нагревание равного веса воды от 0 до 1°C. Если с этим результатом сравнить полезное действие наших лучших паровых машин, то увидим, что лишь очень малая часть разводимого под котлом тепла действительно превращается в движение или поднятие груза. Это могло бы служить оправданием для попыток представить себе выгодный путь получения движения иным способом, чем посредством использования химической разности между С и О, а именно посредством превращения в движение электричества, полученного химическим путем.

Перевод с немецкого статьи Р. Майера «Замечания о силах неживой природы» выполнен А. А. Максимовым. Статья публикуется по изданию: Майер Р. Законы сохранения и превращения энергии. Четыре исследования 1841—1851. М., 1933.

- ¹ Вместо общепринятого в наши дни термина «энергия» Майер использует термин «сила».
- ² Под «гипотезой» автор подразумевает натурфилософские домыслы, противопоставляя последним «действительные исследования», т. е. физический эксперимент.
- ³ «Причины» и «действия» у Майера означают одно-смысловые объекты — материю или энергию. Поэтому приводимая аксиома означает следующее: если «причиной» является энергия, то и «действием» будет равное количество другого вида энергии. Аналогично, для понятия «материя» (массы) Майер выражает эту мысль цепочкой уравнений: $c = e = f = \dots = e$.
- ⁴ Понятию «весомой» материи Майер противопоставляет понятие «невесомой» энергии. Диалектика взаимосвязи таких понятий, как масса, энергия, материя, вещество и поле, получила правильную интерпретацию лишь в XX в.
- ⁵ Реакция соединения водорода и кислорода, записанная Майером в виде $H + O = HO$, в современной химии, как известно, имеет вид $2H_2 + O_2 = 2H_2O$. Не следует забывать, что во времена Майера не были известны ни точный состав молекул газа, ни правильная формула воды.
- ⁶ Сторонники флогистона (особой материи огня) полагали, что вода — это простое вещество, а водород — смесь воды с флогистоном.
- ⁷ В современной терминологии «сила падения» означает разность потенциальной энергии груза в начальной и конечной точках падения.
- ⁸ Майер указывает на отличие термина «сила» от ньютоновского (современного) понятия силы, называя последнюю «свойством».
- ⁹ Майер справедливо указывает на пропорциональность потенциальной энергии v массе m и высоте поднятия d , однако, не делая различия между весом и массой, дает формулу потенциальной энергии неверно: $v = md$.
- ¹⁰ Фактически здесь Майер пользуется мерой движения «живой силой», вдвое большей кинетической энергии тела.

Литература

- [1] Сочинения Р. Майера:
 - а) Mayer J. R. Erhaltung der Energie. Briefe an Wilhelm Griessinger nebst dessen Antwortschriften aus den Jahren 1842—1845. Berlin, 1889.
 - б) Mayer J. R. Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften. Stuttgart, 1893.
- [2] Schmolz H., Weckbach H. Robert Mayer. Sein Leben und Werk in Dokumenten. Wissenborn, 1964.
- [3] Франкфурт У. И. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1978.



Дж. Джоуль

1818—1889

Об определении механического эквивалента тепла

В сложной истории установления закона сохранения энергии важным элементом явились экспериментальные исследования, которыми была доказана возможность превращения одной формы энергии в другую. Однако длительное время эти исследования имели чисто качественный характер или проводившиеся измерения были очень грубыми. Решающую роль в переходе к точным количественным экспериментам в этой области сыграли исследования английского ученого Дж. Джоуля.

Джемс Прескотт Джоуль родился 24 декабря 1818 г. в местечке Санфорд близ Манчестера в семье владельца пивоваренного завода. Джоуль получил неплохое домашнее образование. Его в течение нескольких лет учил элементарной математике, натуральной философии (физике) и началам химии известный английский физикохимик Дж. Дальтон. Общение с Дальтоном оказало значительное влияние на формирование научных интересов Джоуля и его подхода к изучению физических явлений. Следует отметить, что Джоуль так и не получил формального образования, что впоследствии сказалось на его научной судьбе: слабое знание математики не позволило ему в полной мере принять участие в разработке теоретических основ термодинамики.

Экспериментальные исследования Джоуль начал рано — в двенадцать лет — под влиянием одного знакомого любителя естествознания. Занявшись изучением магнитных явлений, Джоуль в 1840 г. обнаружил эффект магнитного насыщения, а в 1842 г. открыл явление магнитострикции. Однако не эти исследования принесли Джоулю мировую известность. Параллельно с изучением магнитных явлений он занимался определением эффективности электрических машин. При проведении соответствующих опытов проявилось стремление Джоуля к постановке количественных исследований — впоследствии оно стало наиболее характерной чертой его научного творчества.

Поначалу Джоуль полагал, что электромагниты могут быть источником бесконечно большого количества механической ра-

боты. Однако очень скоро он убедился, что это не так, и пришел к пессимистическому выводу о превосходстве паровых машин над электрическими.

Под влиянием работ Фарадея в 1840 г. Джоуль обратился к изучению тепловых эффектов тока, результатом которого стало открытие закона, называющегося теперь законом Джоуля — Ленца (в 1842 г. независимо от Джоуля закон теплового действия тока был открыт русским физиком Э. Х. Ленцем). Интересно, что работа Джоуля с описанием этих опытов была первоначально без интереса воспринята Лондонским Королевским обществом, и Джоулю пришлось ее опубликовать в трудах Манчестерского литературного и философского общества. После завершения исследований тепловых эффектов тока в 1843 г. перед ученым встала новая проблема: доказательство существования количественного соотношения между «силами» различной природы, приводящими к выделению теплоты. Первые опыты Джоуля в этом направлении состояли в измерении нагрева жидкости, помещенной в постоянное магнитное поле, в которой под действием опускающегося груза вращался небольшой электромагнит. Так в 1843 г. Джоулю впервые удалось определить механический эквивалент теплоты (в современных единицах этот эквивалент был равен 4,5 Дж/кал). В последующие годы эта величина определялась и другими методами: путем измерения теплоты, выделявшейся при продавливании определенного количества жидкости сквозь узкие трубы (1844), на основе определения количества теплоты, выделявшейся при сжатии газа (1845), и, наконец, при сравнении механической работы, затраченной на вращение мешалки в сосуде, наполненном жидкостью, с теплотой, образовавшейся при трении и обусловившей нагревание этой жидкости (1847). Все эти многочисленные опыты привели Джоуля к убеждению, что «могучие силы природы, созданные велением творца, неразрушимы и что во всех случаях, когда затрачивается механическая сила, получается точно эквивалентное количество теплоты».

В 1847 г. Джоуль познакомился с У. Томсоном, который очень высоко оценил его экспериментальное искусство. Именно опыты Джоуля заставили Томсона окончательно перейти на позиции кинетической теории тепла. Результатом сотрудничества Томсона и Джоуля стало открытие эффекта изменения температуры газа при его адиабатическом протекании через пористую перегородку (1852—1854), называемого теперь эффектом Джоуля — Томсона.

К концу 40-х годов авторитет Джоуля в научном мире упрочился. В 1850 г. он был избран членом ЛКО. В 1867 г. комиссия Британской ассоциации содействия развитию науки, занимавшаяся разработкой эталона электрического сопротивления, предложила Джоулю провести особо точные измерения механического эквивалента теплоты. Опыты Джоуля, поставленные по предложенной У. Томсоном схеме, дали расхождение этой

величины, определенной с помощью предложенного эталона, со значением механического эквивалента, полученного из чисто механических опытов. Повторение экспериментов с мешалкой подтвердило правильность последнего значения, что заставило комиссию пересмотреть предложенный эталон сопротивления (1878). Таким образом, опыты Джоуля имели не только принципиальное, но и важное практическое значение для развития физики середины XIX в.

Следует отметить, что Джоуль не был чистым эмпириком и на протяжении всей жизни интересовался вопросами физической теории. Так, в 1848 г., после завершения цикла опытов по определению механического эквивалента теплоты, Джоуль выступил с докладом, в котором изложил свои теоретические представления о природе теплоты и физических свойствах газов. Основываясь на представлении о молекулах газа как упругих шариках, Джоуль рассматривал давление газа как результат ударов его молекул о стенки сосуда. Ученому удалось оценить скорость молекул водорода (≈ 1850 м/с), он попытался рассчитать теплоемкость этого газа. Не все в этой работе Джоуля оказалось правильным, но ее высоко оценили другие исследователи, в частности Р. Клаузиус, по инициативе которого она была напечатана в журнале ЛКО «Philosophical Transactions».

На первом этапе своей научной работы Джоуль ставил эксперименты на собственные средства. Однако, поскольку он никогда серьезно не занимался коммерческой деятельностью, постепенно его финансовое положение стало ухудшаться. К концу жизни он был вынужден пользоваться материальной помощью ряда научных организаций, а в 1878 г. благодаря усилиям друзей ему была назначена государственная пенсия. Джоуль никогда не отличался крепким здоровьем, а напряженная научная работа окончательно подорвала его силы. В последние годы жизни он тяжело болел и почти не мог работать. Ученый умер 11 октября 1889 г.

О механическом эквиваленте теплоты

(...) Из объяснения, данного графом Румфордом¹ относительно теплоты, происходящей от трения твердых тел, можно предвидеть, как нечто само собой разумеющееся, что превращение теплоты должно отмечаться и при трении жидких и газообразных тел. Более того, существует много фактов, таких, как, например, теплота моря после нескольких дней штормовой погоды, которые уже давно повсеместно приписываются трению жидкостей. Тем не менее научный мир, исповедующий преимущественно гипотезу, что теплота есть субстанция, и следующий выводам, полученным Пикте² из недостаточности тонких экспериментов, почти единодушно отрицает возможность генерации теплоты этим

путем. Насколько я знаю, первое замечание о преобразовании теплоты при трении жидкости было сделано в 1842 г. Майером³, который утверждал, что поднял температуру воды с 12 до 13°C путем ее перемешивания, однако без указания количества использованной силы или предосторожностей, соблюдавшихся для гарантии правильного результата. В 1843 г. я обнародовал факт, что «теплота выделяется при прохождении жидкости через узкие трубы»⁴ и что каждый градус теплоты на один фунт воды требуется для его преобразования этим способом механической силы, составляющей 770 футо-фунтов. Далее, в 1845 г.⁵ и 1847 г.⁶ для создания трения жидкости я применил гребное колесо и получил эквиваленты 781,5, 782,1 и 787,6 при перемешивании соответственно воды, семенного масла и ртути. Результаты, столь близко совпадающие между собой и с другими результатами, полученными ранее из экспериментов с упругими жидкостями и электромагнитной машиной, не оставляют, по моему мнению, сомнений в существовании соотношения эквивалентности между силой и теплотой; и все-таки представлялось чрезвычайно важным определить это соотношение с еще большей точностью. Это я попытался сделать в настоящей работе.

Описание прибора. Использувавшиеся термометры имели трубки, калиброванные и градуированные по методу, впервые указанному Реньо. Два из них, которые я буду обозначать *A* и *B*, сделаны Дэнсером из Манчестера; третий, обозначаемый *C*, был изготовлен Фастре из Парижа. Градуировка этих приборов была настолько совершенной, что при сравнении между собой их показания совпадали с точностью примерно до 1/100°F. Я также располагал другим точным прибором, изготовленным Дэнсером, шкала которого захватывала как точку замерзания, так и точку кипения. Последняя точка этого эталонного термометра была получена обычным образом, путем погружения шарика и ножки в поток пара, восходящего от значительного количества чистой воды, которая находилась в состоянии бурного кипения. Во время проведения опыта барометр стоял на 29,94 дюйма, а температура воздуха была 50°F; так что наблюдавшаяся точка требовала очень незначительной поправки для сведения ее к 0,760 м и 0°C, т. е. давлению, принятому во Франции и, я полагаю, повсюду на континенте для определения точки кипения, которое использовано мной ранее в связи с рядом точных термометрических исследований*. Значения шкал термометров *A* и *B* проверялись при погружении их вместе с эталонным термометром в большие объемы воды, которая поддерживалась при различной тем-

* Барометрическое давление в 30 дюймов ртутного столба при 60°F широко используется у нас в стране, и это, по счастью, почти в точности согласуется с континентальным стандартом. В «Докладе Комитета, назначенного Королевским обществом для рассмотрения наилучшего метода установления фиксированных точек термометров» рекомендуется барометрическое давление 29,8 дюйма, но не указана температура — удивительное упущение в работе, столь точной в других отношениях.

пературе. Значение шкалы *C* определялось сравнением с *A*. Было обнаружено, что число делений, соответствующих 1°F , в термометрах *A*, *B* и *C* было 12,951, 9,829 и 11,647 соответственно. И поскольку постоянная практика позволила мне считывать невооруженным глазом до $1/20$ деления, отсюда следует, что доступная оценке температура составляла $1/200^{\circ}\text{F}$.

На рис. 89 представлено вертикальное, а на рис. 90 — горизонтальное сечения прибора для создания трения воды, который состоял из латунного гребного колеса, снабженного восемью рядами вращающихся лопастей *a,a* и т. д., движущихся между четырьмя рядами неподвижных лопаток *b,b* и т. д., прикрепленных к раме, сделанной также из листовой латуни. Латунная ось гребного колеса свободно вращалась, без вибраций, на опорах *c,c*; в точке *d* она разделялась на две части куском самшита для предотвращения передачи теплоты в этом направлении.

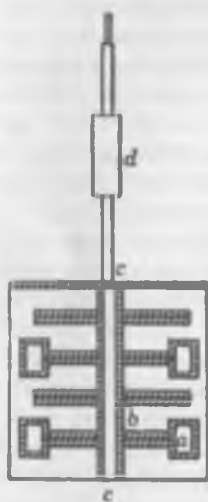


Рис. 89



Рис. 90

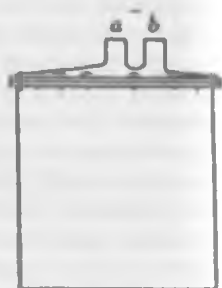


Рис. 91

На рис. 91 представлен медный сосуд, внутри него жестко устанавливалось вращающееся устройство. Сосуд имел медную крышку, край которой был покрыт очень тонкой кожаной шайбой, пропитанной свинцовыми белилами. Крышка могла герметически привинчиваться к краю медного сосуда. Она имела две трубки *a,b*. Первая была сделана для того, чтобы ось вращалась без касания, а вторая — для установки термометра. {...}

На рис. 92 показано устройство, использовавшееся для приведения в движение прибора трения. Здесь *aa* — деревянные блоки диаметром 1 фут и толщиной 2 дюйма, имевшие деревянные валы *bb*, *bb* диаметром 2 дюйма и стальные оси *cc*, *cc* диаметром в четверть дюйма. Блоки были хорошо подогнаны и равны друг другу. Их оси поддерживались латунными фрикционными колесами *dddd*, *dddd*, стальные оси которых вращались в отверстиях.

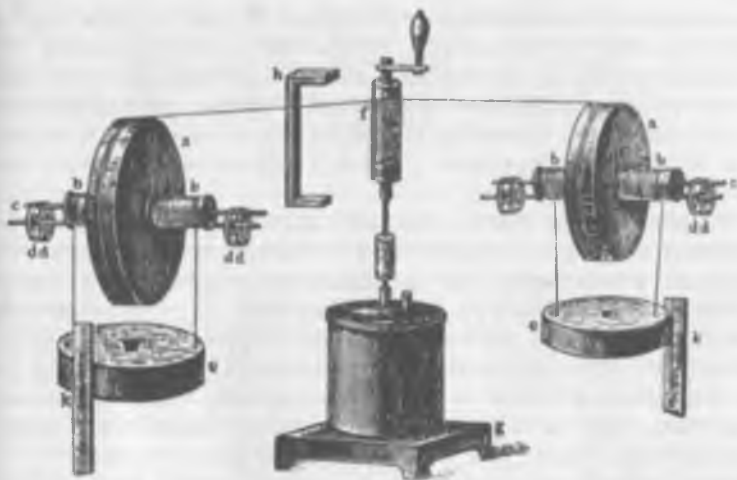


Рис. 92

высверленных в латунных пластинках, прикрепленных к очень массивной раме, которая жестко фиксировалась на стене помещения*.

В части нижеследующих экспериментов использовались свинцовые грузы *ee*, которые весили около 29 фунтов, а в других — вес грузов составлял около 10 фунтов каждый; они подвешивались на нитях, свисавших с валов *bb*, *bb*. Тонкий шпагат, прикрепленный к блокам *aa*, соединял их с центральным валом *f*, который с помощью шпильки мог легко присоединяться к оси прибора трения или отсоединяться от нее.

В деревянной скамейке *g*, на которой стоял прибор трения, был сделан ряд поперечных щелей, вырезанных так, чтобы лишь немногие точки дерева находились в контакте с металлом, в то время как воздух имел свободный доступ почти ко всем его частям. Таким способом предотвращалась передача теплоты веществу скамейки.

Большой деревянный экран (не показанный на рисунке) полностью исключал эффекты теплового излучения от тела экспериментатора.

Метод проведения опытов состоял в следующем. Определялась температура прибора трения, грузы удерживались в подвешенном состоянии с помощью подставки *h*, и вал прикреплялся к оси. Затем посредством узких деревянных градуированных полосок *k, k* определялось точное положение грузов над землей, вал освобождался и ему давали возможность вращаться до тех пор, пока грузы не достигали вымощенного плитами пола лабора-

* Это был просторный подвал, который обладал преимуществом однородности температуры, намного превышавшей однородность температуры любой другой лаборатории из тех, которыми я мог пользоваться.

тории, опускаясь примерно на 63 дюйма. Вслед за этим вал снова устанавливался на подставку, грузы снова поднимались и трение возобновлялось. После того как эта процедура повторялась, двадцать раз, эксперимент завершался новым наблюдением температуры прибора. Средняя температура лаборатории определялась в начале, в середине и при завершении каждого эксперимента.

Непосредственно перед каждым опытом или сразу после него я проводил проверку воздействия изучения или передачи теплоты телу из атмосферы или в обратном направлении, понижая или повышая температуру прибора трением. При этих проверках положение аппарата, количество содержащейся в нем воды, время проверки, метод наблюдения [показаний] термометров, положение экспериментатора — короче говоря, все условия, за исключением того, что аппарат покоился, были такими же, как и в экспериментах, в которых наблюдался эффект трения.

Первая серия экспериментов. Трение воды. Вес свинцовых грузов вместе с частью веса соединенных с ними нитей, служивший для увеличения давления, был равен 203066 и 203086 грамов. Скорость опускания грузов составляла 2,42 дюйма в секунду. Время, которое занимал каждый эксперимент, 35 минут. Для определения температуры воды служил термометр А. Температура воздуха регистрировалась термометром В.

Из различных экспериментов (см. табл.), где наблюдалось воздействие изучения, можно легко получить, что влияние температуры окружающего воздуха на прибор равно $0,0465^{\circ}\text{F}$ для каждого грудуса разности между средними температурами воздуха и прибора. Поскольку превышение температуры атмосферы над температурой прибора составляло в среднем в экспериментах с излучением $0,32295^{\circ}\text{F}$ и только $0,305075^{\circ}\text{F}$ в среднем в экспериментах с трением, то отсюда следует, что необходимо прибавить $0,000832^{\circ}\text{F}$ к разности между $0,57525^{\circ}\text{F}$ и $0,012975^{\circ}\text{F}$, и результат, равный $0,563107^{\circ}\text{F}$, будет приближенно эффектом нагрева от трения. Но к этой величине нужно сделать небольшую поправку, которая учитывает, что в качестве истинной средней температуры в каждом эксперименте с трением бралось среднее значение температуры в начале и по завершении опыта, что не соответствует действительности в точности, поскольку в конце эксперимента, когда вода уже стала теплее, повышение температуры шло несколько медленнее. Вследствие этого средняя температура прибора в опытах с трением должна считаться на $0,002184^{\circ}\text{F}$ выше, что уменьшает эффект нагрева за счет атмосферы на $0,000102^{\circ}\text{F}$. Эта величина, прибавленная к $0,563107^{\circ}\text{F}$, дает в качестве истинного среднего увеличения температуры благодаря трению воды величину $0,563209^{\circ}\text{F}$ *

* Следует заметить, что повышение температуры есть величина составная, зависящая частично от трения воды, а частично — от трения вертикальной оси прибора в ее опорах и трения в опорах [см. рис. 101]. Однако последний источник тепла составлял примерно $1/80$ первого. (...)

Номер опыта и причина изменения температуры	Общая высота падения тел в дюймах	Средняя температура воздуха	Разность между средним значением данных столбцов 5 и 6 и данных столбца 3	Температура прибора		Приобретение или потери теплоты в опыте
				начало опыта	конец опыта	
1	2	3	4	5	6	7
1 Трение	1256,96	57,698	2,252—	55,118	55,774	0,656 получено
1 Излучение	0	57,868	2,040—	55,774	55,882	0,108 »
2 Трение	1255,16	58,085	1,875—	55,882	56,539	0,657 »
2 Излучение	0	58,370	1,789—	56,539	56,624	0,085 »
3 Трение	1253,66	60,788	1,596—	58,870	59,515	0,645 »
3 Излучение	0	60,926	1,373—	59,515	59,592	0,077 »
4 Трение	1252,74	61,001	1,110—	59,592	60,191	0,599 »
4 Излучение	0	60,890	0,684—	60,191	60,222	0,031 »
5 Трение	1251,81	60,940	0,431—	60,222	60,797	0,575 »
5 Излучение	0	61,035	0,237—	60,797	60,799	0,002 »
6 Излучение	0	59,675	0,125+	59,807	59,795	0,010 потеряно
6 Трение	1254,71	59,919	0,157+	59,795	60,375	0,562 получено
7 Излучение	0	59,888	0,209—	59,677	59,681	0,004 »
7 Трение	1254,02	60,076	0,111—	59,681	60,249	0,568 »
8 Излучение	0	58,240	0,609+	58,871	58,828	0,043 потеряно
8 Трение	1251,22	58,237	0,842+	58,828	59,330	0,502 получено
9 Трение	1253,92	55,328	0,070+	55,118	55,678	0,560 »
9 Излучение	0	55,528	0,148+	55,678	55,674	0,004 потеряно
10 Излучение	0	54,941	0,324—	54,614	54,620	0,006 получено
10 Трение	1257,96	54,985	0,085—	54,620	55,180	0,560 »
40 Трение	1262,99	56,108	0,100+	55,929	56,488	0,559 »
40 Излучение	0	56,454	0,036—	56,488	56,492	0,004 »
Среднее для трения	1260,248	— — —	0,305075—	— — — — —	— — — — —	0,575250 »
Среднее для излучения	0	— — —	0,322950—	— — — — —	— — — — —	0,012975 »

[Таблица приводится в сокращении.]

Для оценки абсолютной величины выделенной теплоты необходимо было найти теплоемкость медного сосуда и латунного гребного колеса. Теплоемкость сосуда может быть легко найдена по данным Реньо относительно удельной теплоемкости меди. Таким образом, теплоемкость $25\ 541$ гранов меди $\times 0,09512 =$ — теплоемкости $2430,2$ грана воды. Серия из семи очень тщательных экспериментов с латунным гребным колесом после внесения всех необходимых поправок на теплоту, возникающую вследствие контакта воды с поверхностью металла и т. д., привела меня к значению его теплоемкости, соответствующей теплоемкости 1783 гранов воды. Однако из-за [большой] величины этих поправок, составлявших до одной тридцатой полной тепло-

* Шайба, весившая всего 38 гранов, в этих оценках принималась за медную.

емкости, я предпочел воспользоваться правилом Реньо, а именно: *теплоемкость металлических сплавов равна сумме теплоемкостей металлов, их составляющих*⁷. Анализ части колеса показал, что оно состоит из очень чистой латуни, содержащей 3933 грана цинка на 14 968 гранов меди. Следовательно,

теплоемкость 14 968 гранов меди	× 0,09515	= теплоемкости
		1424,2 грана воды
теплоемкость 3933 гранов цинка	× 0,09555	= теплоемкости
		375,8 грана воды

Общая теплоемкость латунного колеса = теплоемкости 1800 гранов воды

Теплоемкость латунной пробки, вставленной в горловину во избежание контакта воздуха с водой, равна теплоемкости 10,3 грана воды. Теплоемкость термометра не определялась, поскольку перед погружением ему всегда придавалась ожидаемая температура. Таким образом, общая теплоемкость прибора составляла:

Вода	93229,7
Медь, приведенная к воде	2430,2
Латунь, приведенная к воде	1810,3
Всего	97470,2

Итак, общее количество выделенной теплоты составило 0,563209°F в 97470,2 гранах воды, или, другими словами, 1°F в 7,842299 фунтах воды.

Оценка силы, приложенной при генерации этой теплоты, может быть выполнена следующим образом. Грузы в сумме составляли 406 152 грана, откуда нужно вычесть трение, возникающее в блоках, и жесткость нити, что делалось путем соединения двух блоков со шпагатом, проходящим вокруг валов, по диаметру равных тем, которые использовались в опытах. Оказалось, что в этих условиях вес груза, который необходимо добавить к одному из свинцовых грузов, чтобы привести их в равномерное движение, равен 2955 грамам. Тот же эффект (в противоположном направлении) был получен для другого свинцового груза при добавлении 3035 гранов. Вычитая 168 гранов (трение вала в его опорах) из 3005 (среднего значения приведенных выше чисел), мы получаем величину трения в опыте, равную 2837 грамам, которая при вычитании из веса свинцовых грузов составляет 403 315 гранов как действительно приложенное давление.

Скорость, с которой свинцовые грузы падают на землю, т. е. 2,42 дюйма в секунду, эквивалентна высоте 0,0076 дюйма. Эта величина, умноженная на 20 (столько раз в каждом опыте грузы подвешивались заново), дает 0,152 дюйма. Это значение при вычитании из 1260,248 дает в качестве исправленной средней высоты, с которой падает тело, 1260,096 дюйма.

Это падение вместе с упоминавшимся выше давлением представляет силу, эквивалентную 6050,186 фунта, перемещенных на один фут. Добавление к ней $0,8464 \cdot 20 = 16,928$ футо-фунтов, т. е. величины силы, развиваемой нитью после того, как грузы касаются земли, дает 6067,114 футо-фунтов в качестве среднего исправленного значения силы. Следовательно, $\frac{6067,114}{7,842299} = 773,64$ футо-фунтов будет силой, которая, согласно описанным выше экспериментам с трением, эквивалентна теплоте, поднимающей температуру одного фунта воды на 1°F. (...)

Комментарий

Перевод с английского отрывков из работы Джоуля выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: On the Mechanical Equivalent of Heat. «Philosophical Transactions», 1850, vol. 140, Pt. 1, p. 61—82.

¹ Имеется в виду знаменитое наблюдение Румфорда выделения значительного количества теплоты при сверлении пушечных стволов (1798).

² Речь идет, по-видимому, о работе швейцарского физика М. Пикте «О нагревании брошенных тел вследствие их трения о воздух» (1803).

³ В работе «Замечания о силах неживой природы».

⁴ В работе «О тепловых эффектах магнитоэлектричества и о механической величине теплоты».

⁵ В работе «О существовании отношения эквивалентности между теплотой и обычными формами механической силы».

⁶ В работе «О механическом эквиваленте теплоты, определенном по теплоте, выделяющейся при трении жидкостей».

⁷ Имеется в виду работа Реньо «Исследование удельной теплоемкости простых и составных тел. Мемуар 2-й: составные твердые и жидкие тела».

Литература

- [1] Собрание сочинений Джоуля: The Scientific Papers of James Prescott Joule. Vols. 1—2. London, 1884—1887.
- [2] Crowther J. C. British Scientists of the Nineteenth Century. London, 1935, ch. 3.
- [3] Франкфурт У. И. Закон сохранения и превращения энергии. М., 1978, гл. IV.



Г. Гельмгольц

1821—1894

О законе сохранения энергии

Близость по времени появления основополагающих работ Р. Майера, Дж. Джоуля и Г. Гельмгольца, в которых был сформулирован закон сохранения энергии, свидетельствует о том, что установление этого фундаментального физического закона было подготовлено всем ходом развития науки. Каждый из названных ученых пришел к выводу о сохранении энергии своим путем. В исследованиях Майера большую роль сыграло общепризнанное убеждение во взаимосвязи сил природы. В работах Джоуля особенно важен экспериментальный аспект. Немецкий ученый Г. Гельмгольц проанализировал закономерности превращения энергии с точки зрения физической теории.

Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц родился 31 августа 1821 г. в Потсдаме в семье преподавателя гимназии. Герман был с детства близок с отцом, который привил мальчику любовь к музыке, живописи и интерес к философии.

После окончания гимназии Гельмгольц, несмотря на интерес к физике, не смог из-за недостатка средств поступить в университет. Он получил государственную стипендию и, подписав обязательство прослужить восемь лет военным хирургом, поступил в Берлинскую военно-медицинскую академию. Во время учебы в академии Гельмгольц посещал и лекции в университете, самостоятельно изучал труды Д. Бернулли, Канта, Лапласа, Био. Следует отметить, что специального математического образования Гельмгольц не получил.

В 1841 г. началась работа Гельмгольца над докторской диссертацией по физиологии, которую он успешно защитил в 1842 г. После защиты он был назначен эскадронным хирургом в гусарский полк, расквартированный в Потсдаме. Однако исполнение обязанностей военного врача не увлекало Гельмгольца. В это время он интересуется различными физиологическими явлениями и вместе с двумя другими молодыми исследователями, Э. Дюбуа-Реймоном и Э. Брюкке, мечтает о преобразовании физиологии как науки путем введения в нее методов физики и химии.

С 1845 г. Гельмгольц участвует в работе вновь созданного

Берлинского физического общества. Этому способствует то обстоятельство, что в 1845 г. он получает возможность бывать в Берлине и проводить эксперименты в лаборатории Г. Магнуса. В 1845—1846 гг. формируются основные идеи ученого, положенные им в основу знаменитой работы «О сохранении силы», доложенной на заседании Физического общества в 1847 г.

В 1848 г. Гельмгольца освобождают от военной службы, и он занимает должность экстраординарного профессора физиологии и общей патологии в Кенигсберге. Там продолжают его занятия физиологией. Он проводит важное исследование скорости передачи нервного импульса, занимается физиологической оптикой и акустикой. В эти области он внес большой вклад: открыл комбинационные тоны, предложил резонансную теорию слуха, построил модель уха, развил теорию аккомодации глаза, теорию цветового зрения. Врачи-окулисты обязаны Гельмгольцу изобретением офтальмоскопа — прибора для исследования глазного дна (1851).

Постепенно к Гельмгольцу приходит известность. Он выполняет почетные поручения правительственных учреждений, совершает поездку в Англию, во время которой у него возникают дружеские отношения с В. Томсоном (Кельвином).

В 1855 г. Гельмгольц переходит в Боннский университет, а в 1858 г. становится профессором физиологии в Гейдельберге. Все это время, несмотря на переезды и печальные события в личной жизни (смерть жены), ученый напряженно работает. Выходит в свет первый том его «Физиологической оптики», он проводит важное исследование колебаний струн и акустических резонаторов (резонаторов Гельмгольца), занимается гидродинамикой вихрей, разрабатывает принцип механического подобия, позволивший объяснить ряд метеорологических явлений и механизм образования морских волн.

В 1870 г. Гельмгольца пригласили в Берлин, где возглавляемая им кафедра с лабораторией становится неформальным центром немецкой физики. В 1887 г. ученый стал президентом нового Физико-технического института, в котором, по замыслу создателей, должны были вестись как прикладные, так и фундаментальные исследования. Под руководством Гельмгольца институт стал крупным научным центром, куда приезжали работать и учиться молодые физики из многих стран, в том числе и из России.

В 70—80-е годы Гельмгольц много занимается проблемами электродинамики. Он сам ведет как экспериментальные, так и теоретические исследования, пытаясь найти критерий для выбора в пользу одной из существовавших в то время электродинамических теорий. Получила известность его полемика с В. Вебером, в которой Гельмгольц критиковал теорию Вебера как противоречащую закону сохранения энергии. В его лаборатории американец Г. Роуланд поставил опыт, с помощью которого доказал, что конвекционный ток в движущемся проводнике по своему магнитному действию эквивалентен току проводимости в неподвижном

проводнике. Гельмгольц стимулировал исследования своего ученика Г. Герца, приведшие к обнаружению электромагнитных волн. В 1881 г. Гельмгольц выдвинул идею атомарного строения электричества.

На протяжении всей жизни Гельмгольц живо интересовался вопросами теории познания. Он был стихийным, но непосредственным материалистом. Его суждение о том, что наши представления о внешнем мире являются набором символов, критиковали Ф. Энгельс и В. И. Ленин. В физике Гельмгольц в целом находился на позициях механицизма.

Благодаря тому что Гельмгольц внес вклад в развитие практически всех областей физики, он оказал огромное влияние на ее прогресс во второй половине XIX в. Его научные достижения были отмечены избранием действительным членом Берлинской, Парижской, Петербургской академий наук, других научных обществ. Гельмгольц умер 8 сентября 1894 г.

Работа Гельмгольца «О сохранении силы» была стимулирована его исследованиями процессов гниения и брожения, относящихся к физиологии. Успеху этой работы в значительной мере способствовало то обстоятельство, что ученый сочетал в себе таланты экспериментатора и теоретика. Он сумел связать воедино результаты многих исследований, относящихся к разным областям физики.

О сохранении силы

Введение

Предлагаемое сочинение предназначено в своей главной части для физиков, поэтому я предпочел развить основные положения, излагаемые в нем, независимо от философского их обоснования, в форме физического предположения. Далее, я считал нужным вывести следствия из этого допущения и сравнить их для различных областей физики с опытными законами естественных явлений. К выводу положений, установленных в настоящей работе, можно подходить с двух различных точек зрения: или исходя из аксиомы, что невозможно получить безграничное количество работы при действии любой комбинации тел природы друг на друга, или же допуская предположение, что все действия в природе можно свести на притягательные или отталкивательные силы, величина которых зависит только от расстояния действующих друг на друга точек. То, что оба положения являются тождественными, доказывается в самом начале сочинения. В то же время оба эти положения имеют еще более существенное отношение к главной основной задаче физических естественных наук, обрисовать которую я попытаюсь в настоящем введении.

Цель указанных наук заключается в отыскивании законов, благодаря которым отдельные процессы в природе могут быть сведены к общим правилам и могут быть снова выведены из этих

последних. Эти правила, к которым относятся, например, законы преломления или отражения света, законы Мариотта и Гей-Люссака для объема газов, являются, очевидно, ничем иным, как общим видовым понятием, которым охватываются все относящиеся сюда явления. Разыскание подобных законов является делом экспериментальной части наших наук. Теоретическая часть старается в то же время определить неизвестные причины явлений из их видимых действий. Она стремится понять их из закона причинности.

Мы вынуждены были так поступать и имеем на это право благодаря основному закону, по которому всякое изменение в природе должно иметь достаточное основание. Ближайшие причины, которым мы подчиняем естественные явления, могут быть, в свою очередь, или неизменными, или изменяющимися. В последнем случае тот же закон принуждает нас искать другие причины этого изменения и так далее до тех пор, пока мы не доходим до последних причин, которые действуют по неизменному закону и, следовательно, в каждое время при одинаковых условиях вызывают одно и то же действие. Конечной целью теоретического естествознания и является, таким образом, разыскание последних неизменных причин явлений в природе. (...)

Таким образом, задача физического естествознания в конце концов заключается в том, чтобы свести явления природы на неизменные притягательные или отталкивательные силы, величина которых зависит от расстояния. Разрешимость этой задачи есть в то же время условие для возможности полного понимания природы. Теоретическая механика не принимала до сих пор этого ограничения понятия движущей силы, во-первых, потому, что не выяснено было происхождение основных положений механики, во-вторых, потому, что для механики важно иметь возможность предвычислять действие системы движущих сил в таких случаях, когда разложение этих сил на простые составляющие еще не удалось произвести. Во всяком случае, большая часть общих принципов движения сложных систем масс выполняется в том случае*, когда последние связаны друг с другом при помощи неизменных притягательных или отталкивательных сил. К таким принципам относятся принцип возможных перемещений, принцип движения центра тяжести, принцип сохранения главной плоскости вращения и момента вращения свободной системы, принцип сохранения живой силы. Из этих принципов в земных условиях применяются по преимуществу только первый и последний принципы, так как остальные относятся только к совершенно свободным системам. Первый же принцип, как мы покажем, представляется частым случаем последнего, который поэтому является самым общим и важным следствием из сделанных выводов.

* Лучше сказать: «Доказана только для случая» (1881)

Мы дадим вышеуказанному закону для случая действия центральных сил еще более общее выражение.

Пусть φ — сила, которая действует по направлению r , считается положительной, если имеется притяжение, и отрицательной, если наблюдается отталкивание. Тогда

$$X = -\frac{x}{r}\varphi; Y = -\frac{y}{r}\varphi; Z = -\frac{z}{r}\varphi. \quad (1)$$

Согласно уравнению (2) предыдущего параграфа,

$$md(q^2) = -2\frac{\varphi}{r}(x dx + y dy + z dz),$$

откуда

$$\frac{1}{2}md(q^2) = -\varphi dr$$

или, если Q и q , R и r суть соответствующие тангенциальные скорости и расстояния,

$$\frac{1}{2}mQ^2 - \frac{1}{2}mq^2 = -\int_r^R \varphi dr. \quad (2)$$

Если рассмотреть это уравнение подробнее, то мы найдем в левой части разность живых сил, которая соответствует разным расстояниям m от a . Чтобы найти значение величины $\int_r^R \varphi dr$,

представим себе, что величины φ , которые относятся к различным точкам линии, соединяющей m и a , определяются ординатами, перпендикулярно восставленными к соответствующим точкам. Указанная величина должна бы быть равной площади, которая заключается между кривой, ординатами, соответствующими R и r , и осью абсцисс. Поскольку эту площадь можно представить как сумму бесконечного числа лежащих в ней абсцисс, эта величина есть сумма всех элементарных сил, которые произведены на расстояниях, лежащих между R и r . Если назвать теперь силы, которые стремятся двинуть точку m , пока они еще не произвели движения, напряженными силами, в противоположность тому, что механика называет живой силой, то мы могли бы на-

звать $\int_r^R \varphi dr$ суммой напряженных сил между расстояниями R и r .

Тогда предыдущий закон мог бы быть выражен так: увеличение живой силы точки при ее движении под влиянием центральной силы равно сумме соответствующих изменению ее расстояния напряженных сил.

Представим себе, что две точки, находящиеся под действием притягательной силы на определенном расстоянии R , переводят-

ся под влиянием воздействия силы на более близкое расстояние r , при этом их скорость и живая сила увеличиваются. Если бы они должны были перейти на более далекое расстояние r , то их живая сила должна была бы убывать и, наконец, быть совершенно исчерпанной. Мы можем поэтому при притягивающих силах сумму работ сил между пределами $r=0$ и $r=R$,

$\int_R^0 \varphi dr$ обозначать как еще существующую, сумму тех же величин между $r=R$ и $r=\infty$ назвать как использованную; первые могут перейти в действие непосредственно, последние только после эквивалентной потери в живой силе. Обратное наблюдается при отталкивающих силах. Если точки находятся на расстоянии R , то при их удалении мы получим живую силу, будем считать работой силы, имеющейся в нашем распоряжении, величины между $r=R$ и $r=\infty$, работой затраченной — величины работы между $r=0$ и $r=R$.

Чтобы вывести закон в самом общем виде, представим себе любое количество материальных точек, имеющих массы $m_1, m_2, m_3, \dots$, причем в общем случае массу, имеющую координаты x_a, y_a, z_a мы обозначим m_a . При этом X_a, Y_a, Z_a — параллельные осям координаты слагающие действующих на массу сил, u_a, v_a, w_a — разложенные по осям координат скорости, q_a — тангенциальные скорости; расстояние между m_a и m_b равно r_{ab} , центральная сила, действующая между этими двумя точками, равна φ_{ab} . Для одной точки m_n аналогично уравнению (1) находим:

$$x_n = \sum \left[(x_a - x_n) \frac{\varphi_{an}}{r_{an}} \right] = m_n \frac{du_n}{dt},$$

$$y_n = \sum \left[(y_a - y_n) \frac{\varphi_{an}}{r_{an}} \right] = m_n \frac{dv_n}{dt},$$

$$z_n = \sum \left[(z_a - z_n) \frac{\varphi_{an}}{r_{an}} \right] = m_n \frac{dw_n}{dt},$$

где знак суммы $\sum$ относится ко всем членам, которые получают, если вместо показателя a подставить все числа 1, 2, 3, ..., за исключением n .

Умножим первое уравнение на $dx_n = u_n dt$, второе — на $dy_n = v_n dt$, третье — на $dz_n = w_n dt$. Представим себе, что три полученных уравнения написаны для всех отдельных точек m_b , как это было сделано для m_n , и что все эти уравнения сложены. Тогда

$$\sum \left[(x_a - x_b) dx_b \frac{\varphi_{ab}}{r_{ab}} \right] = \sum \left[\frac{1}{2} m_a d(u^2) \right],$$

$$\sum \left[(y_a - y_b) dy_b \frac{\varphi_{ab}}{r_{ab}} \right] = \sum \left[\frac{1}{2} m_a d(v^2) \right],$$

$$\sum \left[(z_a - z_b) dz_b \frac{\varphi_{ab}}{r_{ab}} \right] = \sum \left[\frac{1}{2} m_a d(w^2) \right].$$

Члены рядов, находящихся в левой части равенства, будут получены, если вместо a поставить отдельные индексы 1, 2, 3, ... и при каждом из них поставить для b все большие и все меньшие величины, чем a . Суммы распадаются, таким образом, на две части, из которых в одной a всегда больше b и в другой всегда меньше. При этом ясно, что для каждого члена одной части, имеющего вид

$$(x_p - x_q) dx_q \frac{q_{pq}}{r_{pq}},$$

в другой должен находиться член

$$(x_q - x_p) dx_p \frac{q_{pq}}{r_{pq}}.$$

Если оба члена сложить, то получается

$$-(x_p - x_q)(dx_p - dx_q) \frac{q_{pq}}{r_{pq}}.$$

Если соединить члены в суммы, сложить все три суммы и при этом положить

$$1/2 d[(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2] = r_{ab} dr_{ab},$$

то получим

$$-\sum [\varphi_{ab} dr_{ab}] = \sum [1/2 m_a d(q_a^2)], \quad (3)$$

или

$$-\sum \left[\int_{r_{ab}}^{R_{ab}} \varphi_{ab} dr_{ab} \right] = \sum [1/2 m_a Q_a^2] - \sum [1/2 m_a q_a^2], \quad (4)$$

если R и Q , точно так же как r и q , имеют соответствующие значения.

Мы имеем здесь слева опять сумму затраченных работ, справа — сумму живых сил всех систем, и можем теперь выразить этот закон так: во всех случаях движения свободных материальных точек под влиянием исходящих из них притягательных или отталкивательных сил, величины которых зависят только от расстояния, уменьшение количества напряженных сил, которое можно от системы получить, всегда равно увеличению живой силы и, наоборот, увеличение первой величины — уменьшению второй. Следовательно, всегда *сумма существующих в системе напряженных сил и живых сил постоянна*. В этой наиболее общей форме мы можем наш закон назвать принципом сохранения силы.

При данном выводе закона ничего не изменится, если одна часть точек, которые мы отметим буквой d , закреплена так, что $q_d = 0$. Тогда закон имеет вид

$$\sum [\varphi_{ab} dr_{ab}] + \sum [\varphi_{ad} r_{ad}] = -\sum [1/2 m_b d(q_b^2)]. \quad (5)$$

Остается только указать, в каком отношении находится принцип сохранения силы к общему закону статики, к так называемому принципу возможных перемещений. Этот последний принцип вытекает прямо из наших уравнений (3) и (5). Если при определенном положении точки m_a должно существовать равновесие, другими словами, если для случая, когда эти точки находятся в покое, т. е. $q_a = 0$, это состояние остается неизменным и, следовательно, все $dq_a = 0$, то из уравнения (3) следует

$$\sum [\varphi_{ab} dr_{ab}] = 0, \quad (6)$$

или, если действующие силы принадлежат точкам m_a , лежащим вне системы, то по уравнению (5) найдем

$$\sum [\varphi_{ab} dr_{ab}] + \sum [\varphi_{ad} dr_{ad}] = 0. \quad (7)$$

В этом уравнении под dr нужно подразумевать те изменения расстояний, которые наступают при любых малых перемещениях точки m_a , допустимых при существующих условиях системы. Мы видели в предыдущих выводах, что увеличение живой силы, а следовательно переход из покоя в движение, может быть произведено только за счет затраты напряженной силы. Последние уравнения показывают, что, когда напряженная сила при всех возможных направлениях движения в первые моменты не уменьшается, система, находящаяся в покое в данный момент, остается в покое и в дальнейшем.

Известно, что из установленных уравнений могут быть выведены все законы статики. Для природы действующих при этом сил является важным следующее условие: представим себе, что вместо любых малых перемещений точек m берутся такие, какие могли бы существовать, если бы система была твердой системой, так что в уравнении (7) все $dr_{ab} = 0$, отсюда следует, что

$$\sum [\varphi_{ad} dr_{ad}] = 0, \quad \sum [\varphi_{ab} dr_{ab}] = 0.$$

В этом случае условиям равновесия удовлетворяют как внешние, так и внутренние силы, поэтому если определенная система тел природы при действии определенных сил приведена в состояние равновесия, то равновесие не нарушается, во-первых, если мы отдельные точки системы в их настоящих положениях представим себе соединенными неизменяемыми связями, и, во-вторых, если мы устраним силы, с которыми точки действуют друг на друга. Из этого следует: если силы, с которыми действуют друг на друга две материальные точки, удерживаются в равновесии приложенными к ним двумя внешними силами, то эти точки должны находиться в равновесии, если вместо действующих между точками сил представить твердое соединение их между собой. Силы, которые действуют на две точки твердой прямой линии, могут быть в равновесии только в том случае, если они действуют по направлению этой линии и при этом равны и направлены в противоположные стороны. Таким образом, по отно-

добный же ток в другом проводнике, но что этот ток длится всего один момент и по природе своей походит скорее на электрическую волну, возникающую при разрядке обыкновенной лейденской банки, чем на ток от гальванической батареи, и что поэтому он, быть может, окажется в состоянии намагнитить стальную иглу, хотя на гальванометр действует едва-едва.

13. Это предположение подтвердилось: действительно, когда я, заменив гальванометр небольшой полый спиралью, намотанной на стеклянную трубку, ввел внутрь ее стальную иглу, соединил батарею, как и ранее, с индуцирующим проводником, и затем вынул иглу еще до момента размыкания контакта с батареей, то она оказалась намагниченной. (...)

26. Таким образом, очевидно, что токи гальванического электричества обнаруживают явления индукции, до некоторой степени аналогичные явлениям, создаваемым электричеством напряжения, хотя, как будет видно далее, между ними существует много различий. Следствием этого является создание других токов (которые, однако, только мгновенны), параллельных или же обнаруживающих стремление быть параллельными индуцирующему току. По расположению полюсов иглы, возникающему в испытательной спирали, и из отклонений стрелки гальванометра во всех случаях было ясно, что индуцируемый ток, производимый первым действием индуцирующего тока, был по направлению противоположен последнему, а ток, производимый прекращением индуцирующего тока, имел одинаковое с ним направление. Для краткости я предлагаю назвать действие тока от гальванической батареи volta электрической индукцией. Свойства вторичного провода, когда индукция уже произвела первый ток и когда в соседнем индуцирующем проводе еще продолжает течь электричество от батареи, доказывают существование особого электрического состояния, к рассмотрению которого мы вернемся далее. Все эти результаты были получены с вольтовым прибором, состоявшим из одной пары пластин.

Раздел 2

Об образовании электричества из магнетизма

27. Из круглого брускового мягкого железа было сварено кольцо; толщина металла была равна $\frac{7}{8}$ дюйма, а наружный диаметр кольца — 6 дюймам. На одну часть кольца было намотано три спирали, содержавшие каждая около 24 футов медной проволоки толщиной в $\frac{1}{20}$ дюйма. Спирали были изолированы от железа и друг от друга и наложены одна на другую описанным выше способом, занимая приблизительно 9 дюймов по длине кольца. Ими можно было пользоваться по отдельности и в соединении; эта группа обозначена A [рис. 82]. На другую часть кольца было намотано таким же способом около 60 футов такой же медной проволоки в двух кусках, образовавших спираль B, которая имела одинаковое на-

правление со спиралью *A*, но была отделена от них на каждом конце на протяжении приблизительно $\frac{1}{2}$ дюйма голым железом.

28. Спираль *B* соединялась медными проводами с гальванометром, помещенным на расстоянии 3 футов от кольца. Отдельные спирали *A* соединялись концами с концом так, что образовывали общую спираль, концы которой были соединены с батареей из десяти пар пластин в 4 дюйма². Гальванометр реагировал немедленно, и притом значительно сильнее, чем это наблюдалось, как описано выше, при пользовании в десять раз более мощной спиралью без железа; однако, несмотря на сохранение контакта, действие прекращалось и стрелка возвращалась в свое нормальное положение, обнаруживая как бы полное безразличие по отношению к связанной с ней электромагнитной схеме. При размыкании контакта с батареей стрелка снова сильно отклонялась, но в направлении, противоположном тому, которое индуцировалось в первом случае.

29. При таком видоизменении прибора, когда спираль *B* была включена, а гальванометр был присоединен к одному из трех проводов *A*, а два остальные были соединены в одну спираль, через которую проходил ток от батареи, действия получались подобные же, но значительно более сильные.

30. Когда соединение с батареей производилось в одном определенном направлении, стрелка гальванометра отклонялась в одну сторону; при обратном направлении соединений отклонение происходило в противоположную сторону. Отклонение при размыкании контакта батареи было всегда противоположно отклонению, получаемому при замыкании. Отклонение при замыкании контакта батареи всегда указывало на существование индуцированного тока по направлению, противоположному току батареи; при размыкании же контакта отклонение указывало на ток, индуцированный в направлении, совпадающем с направлением тока батареи. Ни замыкание, ни размыкание контакта на стороне *B* или в каком-либо месте цепи гальванометра не оказывало никакого действия на последний. Дальнейшее существование тока от батареи не вызывало никакого отклонения стрелки гальванометра. Поскольку приведенные выше результаты одинаковы для всех этих и подобных им опытов с обыкновенными магнитами, подробно рассматриваемых далее, нет необходимости снова их особо описывать. (...)

34. Затем было испытано другое устройство, связывающее опыты по вольт-электрической индукции с настоящими. Система спиралей, подобная вышеописанной, была навита на полый картонный цилиндр. Спирали состояли из восьми отрезков медной проволоки общей длиной 220 футов. Четыре из этих спиралей были соединены конец с концом, а затем с гальванометром; остальные четыре были также соединены конец с концом, и через них разряжалась

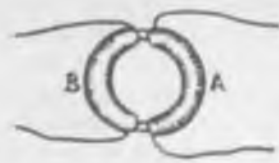


Рис. 82



Рис. 83

батарея из ста пар. При таких условиях действие на гальванометр было едва ощутимым, хотя индуцированный ток обладал намагничивающей способностью. Однако, когда внутрь картонной трубки, окруженной спиралью, вводился цилиндр из мягкого железа толщиной $\frac{7}{8}$ дюйма и длиной 12 дюймов, индуцированный ток оказывал на гальванометр очень сильное действие, сопровождаемое всеми описанными выше явлениями. Намагничивающая способность, которой он обладал, была, по-видимому, также выше, чем в отсутствие железного цилиндра.

35. Когда железный цилиндр заменялся таким же точно медным цилиндром, то не получалось никакого действия помимо того, какое имело место при наличии одних только спиралей. Устройство с железным цилиндром оказалось менее сильным, чем устройство с кольцом.

36. Подобные действия были затем получены при помощи обыкновенных *магнитов*: так, все элементарные спирали только что описанной полой спирали были соединены с гальванометром посредством двух медных проводов длиной по 5 футов каждый. Внутри спирали по ее оси был введен цилиндр из мягкого железа. Два полюсовых магнита длиной по 24 дюйма каждый были приложены друг к другу разноименными полюсами, так что давали подобие подковообразного магнита. Другие два полюса прикладывались к концам железного цилиндра так, что он временно превращался в магнит [рис. 83]. При размыкании магнитных контактов или при изменении их на обратные намагничение железного цилиндра можно было по желанию прекращать или изменять на противоположное. <...>

ВТОРАЯ СЕРИЯ

Раздел 6

Общие замечания и пояснения
относительно силы и направления
магнитоэлектрической индукции

256. Прежде чем в точности будет установлен способ действия между движущимися друг относительно друга магнитом и металлом, потребуются дальнейшие исследования и, вероятно, подробное изучение, как экспериментальное, так и математическое; тем не менее многие из полученных результатов представляются достаточно ясными и простыми, чтобы им можно было дать в некоторой степени общее выражение. Если конечный провод перемещается так, что пересекает магнитную кривую, то возникает сила, которая стремится направить сквозь него электрический ток, но этот ток

может возникнуть только в том случае, если на концах провода устроено приспособление для разряда тока и его возобновления.

257. Если второй провод перемещается в таком же направлении, как и первый, то в нем обнаруживается такая же сила, и потому он оказывается неспособным изменить состояние первого. По-видимому, между последовательно соединенными телами не существует таких естественных различий, вследствие которых при перемещении этих тел относительно магнита в одних и тех же условиях одно из них стремилось бы произвести более сильный ток во всей цепи, чем другое.

258. Но если второй провод перемещается с отличной скоростью или в несколько ином направлении, то имеют место различия в производимой силе, и если провода соединены концами, то через них проходит электрический ток.

259. Возьмем теперь сплошной кусок металла или бесконечный провод и будем рассматривать полюс магнита как центр действия (выражение, если и не совсем строго правильное, но пока что допустимо для удобства). Если все части перемещаются в одном и том же направлении с одинаковой угловой скоростью и сквозь магнитные кривые неизменной интенсивности, то электрический ток не возникает. Это легко наблюдать на телах, способных испытывать действие земного магнетизма, и может быть доказано в отношении небольших магнитов; если вращать их, а все металлическое устройство оставить неподвижным, ток не образуется.

260. Если одна часть провода или металла пересекает магнитные кривые, тогда как другая неподвижна, то токи возникают. Сюда более или менее относятся все получаемые с гальванометром результаты, причем клеммы этого последнего представляют собой неподвижную часть. Сюда же можно безошибочно отнести результаты, полученные с проводом, гальванометром и землей.

261. Если весь металл движется в одном и том же направлении, но угловые скорости отдельных его частей по отношению к полюсу магнита различны, то токи возникают. Так обстоит дело в опыте Араго, а также в проводе, подвергаемом действию земной индукции, когда он перемещается с запада на восток.

262. Если магнит движется не прямо к приборам или от них, а вбок, то случай подобен только что рассмотренному.

263. Если различные части движутся поперек магнитных кривых в противоположных направлениях, то при равных скоростях наблюдается максимум действия.

264. Все это, в сущности, является вариациями одного простого условия, а именно: отдельные части массы не должны двигаться наперерез кривым в одном и том же направлении и с одной и той же угловой скоростью. Но это такие выражения, которые, мне кажется, полезно помнить при установлении связи между частными явлениями и общими результатами.(<...>)

661. Теория, которую я считаю правильно освещающей факты электрохимического разложения и которая поэтому подробно изложена мной в одной из предшествующих серий настоящих исследований, настолько противоречит выдвигавшимся ранее теориям, что я встречаю большие затруднения при правильном, с моей точки зрения, изложении результатов, поскольку я должен ограничиваться общепринятыми терминами, которые употребляются во вполне определенном значении. Таков термин *полюс*, с его прилагательными обозначениями положительный и отрицательный, и связанные с ним представления о притяжении и отталкивании. Согласно общепринятой терминологии, положительный полюс притягивает кислород, кислоты и т. д. или, выражаясь более осторожно, заставляет их выделяться на своей поверхности, а отрицательный полюс точно таким же образом действует на водород, воспламеняющиеся вещества, металлы и основания. С моей же точки зрения, производящая эти явления сила заключена не в полюсах, а *внутри* разлагаемого вещества; кислород и кислоты выделяются у *отрицательного* конца этого вещества, а водород, металлы и т. д. — у его *положительного* конца.

662. Поэтому во избежание неясности и неопределенности, а также ради большей точности выражений, чем та, которой я мог бы достигнуть другим путем, я тщательно обсудил этот вопрос с двумя друзьями и в дальнейшем предполагаю применять другие составленные при их помощи и содействии термины, определение которых я сейчас дам.

Полюсы, как их обычно называют, представляют собой лишь ворота, или пути, через которые электрический ток входит и выходит из разлагаемого вещества. Соприкасаясь с этим веществом, они, естественно, являются границами его протяжения в направлении тока. Этот термин обычно применялся к металлическим поверхностям, соприкасающимся с разлагаемым веществом. Сомнительно, однако, стали ли бы ученые применять его также к поверхностям воздуха и воды, у которых мне удалось производить электрохимическое разложение. Вместо термина «полюс» я предлагаю применять термин «электрод»*, под которым я разумею то вещество или, скорее, ту поверхность — все равно: воздуха, воды, металла, или какого-либо другого тела, — которая ограничивает протяжение разлагаемого вещества в направлении электрического тока.

663. Поверхности, у которых, согласно обычной терминологии, электрический ток входит в разлагаемое вещество и из него выходит, являются весьма важными местами действия, и их необходи-

* *ηλεκτρον* — янтарь и *ὁδός* — путь.

мо отличать от полюсов, с которыми они чаще всего соприкасаются, и от электродов, с которыми они соприкасаются всегда. В поисках естественного указателя электрического направления, которым я мог бы воспользоваться для обозначения поверхностей, — такого, который выражал бы различия между ними и в то же время не зависел бы ни от каких теоретических предпосылок, я пришел к выводу, что таким указателем может служить Земля. Если магнетизм Земли обусловлен обтекающими ее электрическими токами, то последние должны быть, по теперешней терминологии, постоянно направлены с востока на запад, или, что легче запомнить, в направлении кажущегося движения Солнца. Если мы примем, что при некотором электроразложении разлагаемое вещество расположено так, что проходящий через него ток параллелен и одинаково направлен с тем током, который мы предполагаем существующим в Земле, то поверхности, у которых электричество входит в это вещество и из него выходит, будут иметь неизменную ориентировку и проявлять постоянное соотношение свойств. На основании этого представления мы предлагаем называть ту поверхность, которая направлена на восток, *анодом**, а ту, которая направлена на запад, — *катодом*. Какие бы изменения ни претерпевали наши взгляды на природу электричества и электрического действия, они должны отразиться на упомянутом *естественном указателе* в одинаковом направлении и в одинаковой степени, как и на любом разлагаемом веществе, к которому эти термины могут быть применены. По-видимому, нет оснований ожидать, что они приведут к недоразумениям или будут каким-нибудь образом способствовать ложным представлениям. *Анод***, следовательно, есть та поверхность, через которую электрический ток, согласно нашей нынешней терминологии, входит; он представляет собой *отрицательный* конец разлагаемого тела; именно около него выделяются кислород, хлор, кислоты и т. д., и он находится около положительного электрода, или, иначе, обращен к нему лицом. *Катод* есть та поверхность, около которой ток покидает разлагаемое тело; он является его *положительным* концом; горючие вещества, металлы, щелочи и основания выделяются около катода, и он находится в соприкосновении с отрицательным электродом.

664. В настоящих исследованиях мне представится случай классифицировать тела также по некоторым соотношениям, выводимым из их электрических действий. Чтобы дать выражение этим соотношениям, не вводя в то же время самим выражением каких-либо гипотетических представлений, я намерен употреблять следующие названия и термины. Многие вещества непосредственно разлагаются электрическим током, причем их элементы освобождаются; эти вещества я предлагаю называть *электролитами****. Вода, значит, является электролитом. Вещества, которые,

* *άνω* — вверх и *ὁδός* — путь; место, где Солнце восходит

** *κάτω* — вниз, *ὁδός* — путь; место, где Солнце заходит

*** *ἤλεκτρον* и *λύω* — растворяю. Отсюда существительное — электролит и глагол — электролизовать.

подобно азотной и серной кислотам, разлагаются во вторичной реакции, не включаются в это понятие. Затем вместо слова «электрохимически» разложенный, я часто буду употреблять образованный таким же способом термин «электролизированный», который предполагает, что данное вещество разделяется на свои составляющие под влиянием электричества. Этот термин по смыслу и созвучию сходен с термином «анализированный», который образован подобным же путем. Термин «электролитический» понятен без дальнейших пояснений: соляная кислота обладает электролитическими свойствами, борная — не обладает ими.

665. Наконец, мне требуется термин для обозначения тех веществ, которые могут переноситься к *электродам*, или, как их обычно называют, полюсам. Вещества часто называют *электроотрицательными* или *электроположительными* в зависимости от того, переносятся ли они в результате предполагаемого влияния непосредственного притяжения к положительному или отрицательному полюсу. Однако в эти термины вкладывают слишком много, чтобы пользоваться ими так, как я предполагаю; хотя, может быть, лежащие в их основе представления и правильны, но они являются лишь гипотетическими и могут оказаться ложными, и в этом случае они из-за весьма незаметного, но все же очень опасного влияния — опасного потому, что оно действует непрерывно, — наносят большой ущерб науке, суживая и ограничивая привычные взгляды посвятивших себя науке людей. Я предлагаю различать эти вещества, называя *анионами** те, которые переносятся к *аноду* разлагаемого тела, и *катионами*** те, которые переносятся к *катоду*; когда же мне придется говорить вместе о тех и о других, я буду называть их *ионами*. Так, например, хлористый свинец является *электролитом* и выделяет при *электролизе* два иона: хлор и свинец, причем первый является *анионом*, а второй — *катионом*. (...)

Глава I

О новом приборе для измерения гальванического электричества

704. Когда я пытался установить общую меру для обыкновенного и гальванического электричества и, еще раз, когда я предлагал свою теорию электрохимического разложения, я уже указывал, что химически разлагающее действие тока является *постоянным при постоянном количестве* электричества, несмотря на самые большие изменения источников электричества, напряжения последнего, размеров, служащих для опыта *электродов*, характера проводников (или непроводников), через которые электричество проходит, и других условий. Решающие доказательства справедливости этого утверждения будут даны далее.

* *ἀνίων* — то, что поднимается (причастие среднего залога).

** *κατίων* — то, что опускается.

705. На основе этого закона я решил построить прибор для измерения проходящего через него электричества, чтобы он, будучи включен в цепь тока при любом частном опыте, служил по желанию либо для *сравнительной* оценки действия, либо для *положительного измерения* этого тончайшего агента.

706. Нет вещества, которое при обычных условиях было бы более пригодно в качестве индикатора в таком приборе, чем вода. В самом деле, если увеличить ее проводимость добавлением кислот или солей, то вода легко разлагается. Ее элементы во многих случаях могут быть получены и собраны без помех со стороны вторичного действия; будучи газообразными, они представляют наилучшие условия для своего разделения и измерения. Поэтому подкисленная серной кислотой вода является тем веществом, к которому я буду обычно прибегать, хотя в особых случаях или при особых видах опытов может оказаться целесообразным пользоваться другими веществами.

707. Первая предосторожность, необходимая при постройке этого прибора, заключалась в том, чтобы избежать обратного воссоединения выделившихся газов, которое, как было установлено, легко происходит у положительного электрода. С этой целью для разложения применялись приборы различного устройства. (...)

711. Прибор пятого типа изображен на рис. 84. Этот прибор я нашел исключительно пригодным для опытов, продолжающихся непрерывно в течение нескольких дней, когда надо было собрать большие количества служащего для измерения газа. Прибор укреплен на тяжелом основании и имеет вид небольшой реторты, содержащей оба электрода. Горлышко ее узко и достаточно длинно для того, чтобы выходящий из нее газ переходил в сосуд, помещенный над небольшой пневматической ванной. Электродная камера, герметически запаиваемая в той части, которая укреплена на стойке, имеет 5 дюймов в длину и 0,6 дюйма в диаметре. длина горлышка равна приблизительно 9 дюймам, а внутренний диаметр его — 0,4 дюйма. Рисунок дает полное представление о его конструкции. (...)

714. Прежде всего был исследован вопрос о том, оказывает ли влияние или безразлично изменение в широких пределах размеров электродов. Для этого служили приборы, подобные описанным выше. Пластинки одного из них имели ширину 0,7 дюйма, а длину почти 4 дюйма; другой имел пластинки шириной всего 0,5 дюйма и длиной 0,8 дюйма, проволоочки третьего были 3 дюйма длиной и 0,02 дюйма диаметром, а в четвертом такие же проволоочки были длиной только в полдюйма. Тем не менее когда эти приборы были наполнены разбавленной серной кислотой и соединены последовательно, так что через них проходил один и тот же ток электричества, то во всех них вы-



Рис. 84

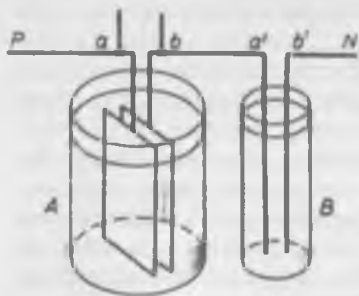


Рис. 85

делилось почти одинаковое количество газа. Иногда получалась разница в пользу одного или другого прибора, но в основном результаты сводились к тому, что наибольшее количество газов выделялось на самых маленьких электродах, именно на тех, которые состояли из одних только платиновых проволочек. (...)

722. Из предшествующих и многих других опытов следует, что *изменение в размерах электродов не влечет за собой изменений в химическом действии на водородного количества электричества.*

723. Следующим фактором, в отношении которого был проведен принцип постоянства электрохимического действия, было *изменение напряжения.* Прежде всего были повторены предыдущие опыты, но при этом брались батареи хотя с одним и тем же числом пластин, но заряженные *сильно или слабо*; однако результаты получались одинаковые. Затем опыты были повторены с батареями, содержащими иногда сорок, а иногда только пять пар пластин, но результаты и теперь получались одинаковые. Следовательно, *изменения напряжения, обусловленные различием в силе заряда или в числе взятых для опыта пар, не вызывали изменений, т. е. действие больших и малых электродов оставалось одинаковым.* (...)

725. Различие в напряжении при описанных условиях можно легко показать на опыте, если взять оба прибора для разложения, расположить их, как показано на рис. 85, и подвергать в них одну и ту же жидкость разложению под действием одного и того же тока электричества. Этот ток проходит тогда в сосуде *A* между большими платиновыми пластинками, а в сосуде *B* — между маленькими проволочками. Если к проводам *a* и *b* присоединить третий прибор для разложения, вроде изображенного на рис. 84, то степень возникающего в нем разложения будет давать достаточно хорошие указания о том, каково относительное состояние двух пластинок в смысле их напряжения. Если затем таким же образом присоединить этот прибор к проводам *a'* и *b'*, чтобы ознакомиться с их состоянием, то по усилению разложения в приборе мы увидим, насколько напряжение в этом случае больше, чем между точками *a* и *b*. Соединение точек *P* и *N* гальванической батареей должно, конечно, сохраняться все время.

726. Третье видоизменение опыта, в котором для проверки принципа равенства химического действия я также добивался различия напряжения, заключалось в том, что три вольт-электрометра располагались так, что электрический ток, пройдя через один из них, разветвлялся на две части, каждая из которых проходила через один из оставшихся приборов, а затем разветвлен-

ные токи вновь соединялись. Сумма продуктов разложения в обоих последних сосудах всегда была равна количеству вещества разложенного в первом сосуде. Напряжение же разветвленного тока не могло быть таким же, как в первоначальном состоянии, а следовательно, *изменение напряжения не оказывает влияния на результаты, если количество электричества остается одинаковым*. Этот опыт сводится просто к увеличению размеров электродов.

727. Третьим фактором, в отношении которого был проведен принцип равенства электрохимического действия, скажем, воды, было *изменение крепости раствора*, которым я пользовался. Для сообщения воде проводимости к ней добавлялась серная кислота. Казалось вполне правдоподобным, что она, наравне со многими другими веществами, сможет повысить разложимость воды, если количество электричества останется постоянным. Это, однако, не подтвердилось. Разбавленная серная кислота различной крепости вводилась в различные приборы для разложения и подвергалась одновременно действию одного и того же электрического тока. Как и ранее, наблюдались небольшие отклонения то в ту, то в другую сторону, но в окончательном результате *одно и то же количество электричества во всех растворах разлагало в точности одно и то же количество воды*, хотя в некоторых растворах количество серной кислоты было в семьдесят раз больше, чем в других. Крепость, которой я пользовался, соответствовала удельному весу 1,495 и ниже. <...>

732. Я считаю, что предыдущее исследование в достаточной степени доказывает чрезвычайно важный принцип в отношении воды, а именно: *количество воды, разложенной под влиянием электрического тока, в точности пропорционально количеству прошедшего электричества*, несмотря на изменение на тысячи ладов тех обстоятельств и условий, в которые вода в данный момент поставлена. Если приняты меры против вредного влияния известных вторичных действий, против растворения или же обратного соединения газов и выделения воздуха, то *продукты разложения могут быть собраны с такой точностью, что дают превосходное и ценное средство для измерения электричества, участвующего в их выделении*. <...>

822. Только что изложенное и, я считаю, установленное учение об *определенном электрохимическом действии* приводит к некоторым новым взглядам на отношения и подразделение веществ, подверженных этому действию и связанных с ним. К рассмотрению некоторых из этих взглядов я и перейду.

823. Прежде всего сложные тела можно подразделить на два обширных класса, а именно: на тела, которые разлагаются электрическим током, и на такие, которые им не разлагаются; среди последних одни являются проводниками гальванического электричества*, другие — непроводниками. У первых способность к

* Под гальваническим электричеством я подразумеваю электричество от очень мощного источника, обладающего, однако, весьма малым напряжением.

разложению определяется не только природой входящих в их состав элементов, но, вероятно, также и их весовыми соотношениями, так как из одних и тех же двух элементов можно составить вещества, из которых одно будет принадлежать к первому, а другое — ко второму классу. Замечательно и то, что, за немногими исключениями, эти поддающиеся разложению вещества оказываются как раз теми, которые подчиняются замечательному закону проводимости, данному мною ранее, ибо этот закон не распространяется на те многочисленные сложные плавкие вещества, которые к этому классу не принадлежат. Я предлагаю называть входящие в этот класс разложимые вещества *электролитами*.

824. Далее, те вещества, на которые под влиянием электрического тока разлагаются электролиты, составляют крайне важный общий класс. Они суть способные к соединению тела; они непосредственно связываются с основной частью учения о химическом сродстве, и каждому из них присуще определенное количественное отношение, в котором они выделяются при электролитическом действии. Я предложил назвать эти вещества вообще ионами, или, в частности, *анионами* и *катионами*, смотря по тому, где они выделяются — у *анода* или *катода*. Числа, соответствующие весовым количествам, в которых они выделяются, я называю *электрохимическими эквивалентами*. Так, водород, кислород, хлор, иод, свинец, олово являются ионами; три первых представляют собой *анионы*, оба металла — *катионы*, а числа 1, 8, 36, 125, 104, 58 суть приблизительно их *электрохимические эквиваленты*³. <...>

850. Я думаю, что не ошибаюсь, когда придаю учению об определенном электрохимическом действии огромное значение. Относящиеся к нему факты более непосредственно и близко, чем какой-либо предшествующий факт или совокупности фактов, подкрепляют прекрасное представление о том, что обычное химическое сродство является лишь простым следствием электрических притяжений различных по природе частиц материи. Весьма вероятно, что оно приведет нас к средствам, с помощью которых мы сможем осветить то, что в настоящий момент представляется столь темным, и поможет либо полностью подтвердить справедливость этого предположения, либо разобрать другое, которому суждено его заменить. <...>

ДЕВЯТНАДЦАТАЯ СЕРИЯ

Раздел 26

О намагничивании света и об освещении магнитных силовых линий

Заголовок настоящей статьи ввел, как я вижу, многих в заблуждение относительно ее содержания; поэтому я беру на себя смелость приложить настоящее пояснительное примечание. Я не принимаю и не отвергаю гипотезы об эфире.

или корпускулярной гипотезы, или какого-либо иного воззрения, которое может быть предложено относительно природы света. Насколько я усматриваю, о луче света в действительности нам известно не более, чем о линии магнитной или электрической силы или даже о линии силы тяготения, за исключением того, что как первый, так и последние проявляются в веществах и при посредстве последних. Я полагаю, однако, что в опытах, описываемых мною в настоящей статье, свет испытал на себе магнитное действие, т. е. магнитному действию подверглось то, что является магнитным в силах материи, а последнее, в свою очередь, воздействовало на то, что является подлинно магнитным в силе света. В термин «магнитный» я включаю здесь любое из особых проявлений силы магнита независимо от того, как оно обнаруживается: в магнитной или диамагнитной группе т.д. Выражение «освещение магнитных силовых линий» было понято в том смысле, будто я сделал их светящимися. Я не имел этого в виду. Я хотел только сказать, что магнитная силовая линия была освещена подобно тому, как Земля освещается Солнцем или как паутинная нить освещается лампой астронома. С помощью луча света мы можем простым глазом указать направление магнитных линий в теле, а по изменению луча и его оптического действия на глаз мы можем видеть ход этих линий совершенно так же, как мы можем видеть ход стеклянной нити или нити какого-либо другого прозрачного вещества, которая стала видимой благодаря свету. Это именно я и понимал под «освещением», как это в полной мере явствует из самой статьи. 15 декабря 1845 г. — М. Ф.

Глава I

Действие магнитов на свет

2146. Я давно уже придерживался мнения — и оно почти достигло степени убеждения, — и того же мнения, как мне думается, придерживаются многие другие любители естествознания, а именно, что различные формы, в которых проявляются силы материи, имеют общее происхождение или, другими словами, настолько близко родственны друг другу и взаимно зависимы, что они могут как бы превращаться друг в друга и обладают в своем действии эквивалентами силы. В новейшее время доказательства их взаимной превращаемости в весьма заметной степени умножились и положено начало определению их эквивалентных сил.

2147. Это твердое убеждение распространялось и на силы света и побудило [меня] раньше произвести много изысканий, имевших целью открыть прямую связь между светом и электричеством и их взаимодействие в телах, подвергаемых их совместным силам. Однако результаты этих изысканий оказались отрицательными и были впоследствии в этом смысле подтверждены Вартманом⁴.

2148. Эти безуспешные изыскания, а также многие другие, которые остались неопубликованными, не могли поколебать моего твердого убеждения, основанного на научных соображениях. Поэтому я недавно возобновил экспериментальное исследование на очень точных и строгих началах, и в конце концов мне удалось намагнитить и наэлектризовать луч света и осветить магнитную силовую линию. Эти результаты, не входя в детали многих неудавшихся опытов, я изложу здесь возможно кратко и ясно.

2149. Раньше, однако, чем перейти к этому, я укажу, какой смысл я придаю известным терминам, которыми мне придется пользоваться. Под *линией магнитной силы*, или *магнитной силовой линией*, или *магнитной кривой* я подразумеваю те проявления магнитной силы, которые обнаруживаются в линиях, обычно называемых магнитными кривыми. Последние либо существуют в виде линий, идущих от магнитных полюсов или к последним, либо образуют концентрические круги вокруг электрического тока. Под *линией электрической силы* я подразумеваю ту силу, проявляющуюся в линиях, которые соединяют два тела, действующих друг на друга согласно началам статической электрической индукции; эти линии точно так же могут быть либо кривыми, либо прямыми. Под *диамагнитным*⁵ я подразумеваю тело, через которое проходят линии магнитной силы и которое под их действием не принимает обычного магнитного состояния железа или магнитного железняка.

2150. Луч света, исходящий от лампы Аргана⁶, был поляризован в горизонтальной плоскости путем отражения от стеклянной поверхности, и поляризованный луч проходил через окуляр Николя, который для удобства исследования света мог вращаться вокруг горизонтальной оси. Между поляризующим зеркалом и окуляром были установлены два сильных электромагнитных полюса; это были либо полюсы подковообразного магнита, либо противоположные полюсы двух цилиндрических магнитов. Они находились друг от друга на расстоянии около 2 дюймов по направлению луча и были расположены таким образом, что когда они находились на одной и той же стороне поляризованного луча, то последний мог проходить вблизи них, а когда находились на противоположных сторонах, то он мог проходить между ними. Направление его было всегда параллельно или почти параллельно магнитным силовым линиям. Если теперь поместить между полюсами какое-либо прозрачное вещество, то через него должны проходить одновременно и в одном и том же направлении как поляризованный луч, так и магнитные силовые линии.

2151. Шестнадцать лет тому назад я опубликовал некоторые опыты, произведенные с оптическим стеклом, и описал изготовление и общие свойства некоего вида тяжелого стекла, которое по его составу было названо боросиликатным свинцовым стеклом (silicated borate of lead). Это именно стекло дало мне впервые возможность открыть связь между светом и магнетизмом, и оно обладает большей способностью ее показать, чем любое иное тело. Для ясности я опишу сначала эти явления в том виде, как они представляются при этом веществе.

2152. Кусок этого стекла около 2 дюймов в квадрате и толщиной 0,5 дюйма с плоскими и отшлифованными гранями был помещен в качестве *диамагнитного тела* между полюсами (которые не были еще намагничены электрическим током) так, что поляризованный луч должен был проходить по его длине. Стекло

до действовало подобно тому, как действовал бы воздух, вода или любое индифферентное вещество, и когда окуляр предварительно ставился в такое положение, что поляризованный луч гасился или, лучше сказать, что положение изображения становилось невидимым, то введение этого стекла не вызывало в этом отношении никакого изменения.

При этом возбуждалась сила электромагнита, для чего пропускался через его катушки электрический ток, и тотчас же изображение племени лампы становилось видимым и оставалось таким, пока установка была магнитной. Когда электрический ток прерывался и прекращалась магнитная сила, свет мгновенно исчезал. Это явление можно было по желанию повторить в любой момент времени и при любом случае. Так доказывалось наличие совершенной связи между причиной и действием.

2153. Гальванический ток, которым я пользовался, в данном случае получался от пяти пар элементов Грова⁷, а электромагниты обладали такой мощностью (power), что полюсы могли в отдельности держать на весу от 26 до 56 фунтов и даже более. Лицо, которое наблюдало бы это явление впервые, не было бы в состоянии его заметить с помощью более слабого магнита.

2154. Характерная особенность силы, которая таким путем сообщается диамагнитному веществу, заключается в том, что она является вращательной, так как изображение лампы становится указанным образом видимым. То некоторое, большее или меньшее, вращение окуляра вправо или влево его гасит, а дальнейшее вращение окуляра в ту или другую сторону от этого положения вновь приводит к появлению света, и притом в дополнительных цветах, в зависимости от того, в какую сторону происходит это вращение: вправо или влево.

2155. Когда ближайшим к наблюдателю был полюс с меткой, т. е. тот же, что и северный конец магнитной иглы, а более отдаленным был полюс без метки, то вращение луча происходило вправо, так как окуляр приходилось поворачивать вправо, т. е. по направлению часовой стрелки, чтобы уловить луч и восстановить изображение в первоначальном его состоянии. Если перевернуть полюсы, что осуществлялось мгновенно путем изменения направления электрического тока, то вращение точно так же изменялось и становилось левым, причем оно достигало той же величины, что и раньше. Для одной и той же магнитной силовой линии направление всегда остается одинаковым. (...)

2160. Таким образом, магнитные линии, проходя через бросилатное свинцовое стекло и через большое количество других веществ, вызывают в них способность действовать на поляризованный луч света, когда эти линии параллельны лучу, или в той мере, в какой они ему параллельны. Когда они перпендикулярны лучу, то они на него совершенно не действуют. Они сообщают диамагнитным телам способность вращать этот луч. Закон этого действия на луч заключается в том, что когда магнитная силовая линия уходит (от нас) из северного полюса или идет (к нам)

от южного полюса вдоль пути поляризованного луча, идущего к наблюдателю, то она вращает этот луч вправо, а когда подобная силовая линия идет (к нам) от северного полюса или уходит (от нас) из южного полюса, то она вращает такой луч влево (...)

Комментарий

Перевод с английского работ М. Фарадея «Экспериментальные исследования по электричеству» выполнен Е. А. Чернышевой и Я. Р. Шмидт-Чернышевой (1—14-я серии), А. В. Яковлевой (15—18-я серии), В. С. Гохманом и Т. Н. Кладом (19—29-я серии). Отрывки воспроизводятся по изданию Фарадея М. Экспериментальные исследования по электричеству. М. Т. 1—1947, т. 3—1959.

¹ Т. е. статическому электричеству.

² Речь идет об эффекте, названном «магнетизмом вращения», открытом в 1824 г. Ф. Араго, который заметил, что при вращении металлической пластины магнитная стрелка, находящаяся под или над ней, начинала вращаться. Фарадей первым правильно объяснил это явление появлением индукционных токов в пластине.

³ Принятые ныне значения электрохимических эквивалентов для указанных веществ: H — 1,008, O — 8,000, Cl — 35,46, I — 126,92, Sn — 59,4, Pb — 103,60

⁴ Э. Вартман в 1841—1848 гг. опубликовал ряд статей, посвященных электромагнитной индукции.

⁵ Здесь Фарадей называет «диамагнитными» все тела, не имеющие ферромагнитных свойств.

⁶ Лампа Аргана — специальный осветитель с поддувалом и стеклянным цилиндром для создания тяги.

⁷ В элементе Грова платиновый (положительный) электрод находится в азотной кислоте, а цинковый (отрицательный) — в серной; кислоты отделены друг от друга пористой оболочкой, которую цинк охватывает с двух сторон.

Литература

- [1] Собрание сочинений М. Фарадея. Faraday's diary. Vols. 1—7. London, 1932—1936.
- [2] Williams L. P. Michael Faraday. London, 1965.
- [3] Кудрявцев П. С. Фарадей. М., 1969.



Э. Х. Ленц

1804—1865

О направлении индукционного тока

В электродинамике XIX в. существовало немало правил, определяющих направление тех или иных действий. Достаточно вспомнить правило «левой руки», правило буравчика, правило «правой руки» и т. д. Все они имеют чисто мнемонический смысл. Подобные правила для определения направления индукционного тока давал и Фарадей. Как известно, сам ученый термином «электромагнитная индукция» не пользовался, заменяя его терминами «магнитоэлектрическая индукция» и «вольто-электрическая индукция», выражающими частные случаи открытого им явления. В соответствии с этим Фарадей вводил различные правила для определения направления индукционного тока, а иногда и по нескольким правилам для каждого случая. Заслуга установления общего закона, определяющего направление тока индукции, принадлежит Э. Х. Ленцу.

Эмилий Христианович Ленц родился 24 февраля 1804 г. в семье чиновника в городе Дерпте (ныне Тарту Эстонской ССР). Мальчик рано лишился отца, однако благодаря усилиям матери он успешно закончил гимназию и поступил в 1820 г. в университет родного города.

Научная деятельность Ленца началась рано: после второго курса университета он по рекомендации ректора в качестве физика научной экспедиции отправляется в кругосветное плавание (1823—1826). С помощью сконструированных им глубометра и батометра (прибора для снятия проб воды и опеределения ее температуры на разных глубинах) он занимается физическими исследованиями в водах Берингова пролива, Тихого и Индийского океанов. Отчет Ленца о проведенных исследованиях был высоко оценен учеными, и в 1828 г. его единогласно избрали адъюнктом Петербургской Академии наук.

Исследовательскую деятельность Ленц с успехом сочетал с активной общественной работой в Академии наук, действительным членом которой он стал в 1834 г. С 1838 г. и до конца своей жизни Ленц вел большую преподавательскую работу в качестве профессора, декана физико-математического факультета, а в конце

шению к силам, с которыми точки действуют друг на друга и которые должны быть равны внешним силам и направлены в противоположные стороны от них, следует, что эти силы действуют по линии, соединяющей точки, и являются притягательными или отталкивательными силами.

Мы можем так выразить установленные положения.

1. Когда тела природы действуют друг на друга с силами притяжения или отталкивания, независимыми от времени и скорости, то сумма живых сил и напряженных сил остается постоянной; максимум работы, которую можно получить, является определенным, конечным.

2. Если, наоборот, в телах природы находятся силы, которые зависят от времени и скорости или которые действуют не по направлению двух действующих друг на друга материальных точек и, например, являются вращающими силами, то возможна такая комбинация подобных тел, при которой сила или беспрестанно теряется, или получается.

3. При равновесии системы тел под действием центральных сил внутренние и внешние силы должны находиться в равновесии сами по себе, если мы тела системы представим при этом неизменяемо соединенными друг с другом и допустим подвижной по отношению к лежащим снаружи телам только систему в целом. Твердая система, состоящая из подобных тел, никогда не может поэтому быть приведена в движение действием своих внутренних сил, и движение может получиться только при действии внешних сил. Если бы имелись иные силы, кроме центральных, то можно было бы установить такие твердые связи тел природы, которые позволили бы системе двигаться самой по себе без всякого отношения к другим телам. {...}

VI. Эквивалент силы магнетизма и электромагнита

Электромагнетизм. Электродинамические явления сведены Ампером к притягательным и отталкивательным силам элементов тока, зависящим от скорости и направления токов. Его вывод при этом не включает явлений индукции, которые вместе с явлениями электродинамическими сводятся В. Вебером к притягательным и отталкивательным силам самих электрических жидкостей, причем величина сил зависит от скорости приближения или удаления и от ее изменения. До сих пор еще не найдено никакой гипотезы, при помощи которой эти явления могли бы быть сведены к постоянным центральным силам. Законы наведенных токов развиты Нейманом¹, когда он распространил опытно найденный для всего тока закон Ленца на мельчайшие части тока, и эти законы при замкнутых токах согласуются с выводами Вебера. Точно так же законы Ампера и Вебера для электродинамических действий замкнутых токов согласуются с выводом их из сил вращения Грассмана². Далее, опыт нам не дает ничего,

так как до сих пор эксперименты производились только с замкнутыми или почти замкнутыми токами. Мы приложим наш принцип поэтому только к замкнутым токам и покажем, что из него вытекают те же законы.

Уже Ампером было доказано, что электродинамические действия замкнутого тока всегда могут быть заменены определенным распределением магнитных жидкостей на любой поверхности, имеющей те же границы, как и ток. Нейман поэтому перенес понятие потенциала на замкнутые токи, подставив вместо потенциала этих токов потенциал указанных выше поверхностей.

5. Если магнит движется под влиянием тока, то живая сила, которую он приобретает, должна получаться из напряженной силы, которую теряет ток. Эта последняя равна в течение времени dt , согласно уже применявшемуся способу обозначения, A/dt в тепловых единицах или aA/dt в механических единицах, если a есть механический эквивалент теплоты. Полученная в проводнике живая сила равна aI^2Wdt , полученная магнитом — $\frac{IdU}{dt}$, где U — потенциал магнита по отношению к тому же проводнику при пропускании через последний единицы силы тока. Таким образом,

$$aA/dt = aI^2Wdt + I \frac{dU}{dt} dt,$$

$$I = \frac{A - \frac{1}{a} \frac{dU}{dt}}{W}.$$

Мы можем назвать величину $\frac{1}{a} \frac{dU}{dt}$ новой электродвижущей силой индукционного тока. Она действует всегда обратно той электродвижущей силе, которая перемещает магнит в направлении, в котором он движется, или которая увеличивает его скорость. Так как эта электродвижущая сила независима от силы тока, то она должна остаться той же самой, если бы перед движением магнита не существовало никакого тока.

Если сила тока меняется, то полный ток, наведенный в течение определенного времени, равен

$$\int Idt = -\frac{1}{aW} \int \frac{dU}{dt} dt = \frac{1}{a} \frac{U_1 - U_2}{W},$$

где U_1 , U_2 — потенциалы в начале и в конце движения. Если магнит приближается с весьма большого расстояния, то

$$\int Idt = -\frac{1}{aW} U_1$$

независимо от пути и скорости магнита.

Мы можем выразить закон таким образом: общая электродвижущая сила индукционного тока, который вызывается пере-

мещением магнита по отношению к замкнутому проводнику, равна изменению, которое происходит в потенциале магнита по отношению к проводнику, если через последний протекает ток $-1/a$. Единицей электродвижущей силы является такая единица, которая создает произвольную единицу тока в проводнике с сопротивлением, равным единице. Единицей сопротивления является такая, в которой единица тока в течение единицы времени развивает единицу теплоты.

Тот же закон имеется у Неймана, только у него вместо $1/a$ стоит неопределенная постоянная e .

6. Если магнит движется, находясь под влиянием проводника с током, по отношению к которому его потенциал при единице тока равен φ , и под влиянием намагниченного действием проводника куска железа, по отношению к которому его потенциал для магнетизма, создаваемого единицей тока, есть χ , то, как и прежде,

$$aAI = aI^2W + I \frac{d\varphi}{dt} + I \frac{d\chi}{dt},$$

$$I = \frac{A - \frac{1}{a} \left(\frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\chi}{dt} \right)}{W}.$$

Электродвижущая сила тока индукции, которая зависит от присутствия куска железа, равна

$$- \frac{1}{a} \frac{d\chi}{dt}.$$

Если в электромагните вследствие протекания тока I создается то же самое распределение магнетизма, как и при приближении магнита, то, согласно сказанному в 4³, потенциал электромагнита по отношению к магниту $-n\chi$ должен быть равен его потенциалу по отношению к проводящей проволоке nU , если U — потенциал при единице тока. Таким образом, $\chi = U$. Если индукционный ток вызывается тем, что кусок железа намагничивается благодаря расположению магнита, то электродвижущая сила равна $-\frac{1}{a} \frac{d\chi}{dt} = -\frac{1}{a} \frac{dU}{dt}$ и общий ток, как и в 5, равен

$$\int I dt = \frac{(U_1 - U_2)/a}{W},$$

где U_1 и U_2 — потенциалы намагниченного железа по отношению к проводящей проволоке до и после намагничивания. Нейман выводит этот закон из аналогии с предыдущим случаем.

7. Если электромагнит намагничивается под влиянием тока, то благодаря индукционному току теряется теплота; если кусок железа мягкий, то при размыкании тот же индукционный ток пойдет в обратном направлении и теплота будет снова приобретена. Если это кусок стали, сохраняющей свой магнетизм, то теплота теряется и вместо нее мы получаем магнитную силу.

способную создать работу, равную половине потенциала магнита при полном связывании магнетизма, как это было показано в 4. По аналогии с предыдущим случаем вероятно, что электродвижущая сила соответствует полному потенциалу, как это заключил и Нейман, и что часть движения магнитных жидкостей благодаря быстрой его является потерянной в качестве теплоты, причем эта часть приобретает магнитами.

8. Если движутся друг по отношению к другу два проводника с током, то силы тока будут в обоих проводниках изменены. Если U — их потенциал друг по отношению к другу при силе тока, равной единице, то, как и в предыдущем случае и на тех же основаниях, должно быть

$$A_1 I_1 + A_2 I_2 = I^2 W_1 + I_1^2 W_1 + \frac{1}{a} I_1 I_2 \frac{dU}{dt}.$$

Если сила тока в одном проводнике W_1 значительно меньше, чем в другом W_2 , так что электродвижущая сила индукции, которая возбуждается в W_1 проводником W_2 , по отношению к A_1 исчезающе мала и мы можем положить $I = A_1/W_1$, то

$$I_2 = \frac{A_2 - \frac{1}{a} I_1 \frac{dU}{dt}}{W_2}.$$

Электродвижущая сила индукции, таким образом, оказывается той же силой, которую создал бы магнит, имеющий ту же электродинамическую силу, что и индуцирующий ток. Этот закон обнаружил экспериментально В. Вебер⁴.

Если, наоборот, сила тока в W_1 бесконечно мала по отношению к силе тока в W_2 , то

$$I_1 = \frac{A_1 - \frac{1}{a} I_2 \frac{dU}{dt}}{W_1}.$$

Электродвижущие силы проводников по отношению друг к другу равны, если силы токов равны, какова бы ни была форма проводников.

Общая сила индукции, которая в течение определенного движения проводников по отношению друг к другу создает ток, не изменяющийся благодаря индукции, равна по сказанному изменению потенциала проводника по отношению к другому, через который течет ток $-I/a$. В такой форме Нейман выводит закон из аналогии магнитных и электродинамических сил и распространяет его также на случай, где индукция вызывается в покоящихся проводниках усилением или ослаблением тока. В. Вебер показывает согласие своего предположения об электродинамической силе с этой теоремой. Из закона сохранения силы для этого случая нельзя получить никакого определения этой величины. Благодаря обратному действию индуцированного тока на индуцирующий должно наступать только ослабление послед-

него, который дает такую же потерю теплоты, какая приобретается наведенным током. Это же соотношение между начальным ослаблением тока и экстратоком должно существовать при действии тока самого на себя. Никаких дальнейших выводов, однако, отсюда нельзя получить, так как форма нарастания силы тока неизвестна и, кроме того, закон Ома неприменим сюда непосредственно, так как эти токи могут не одновременно протекать через всю длину проводников. (...)

Я думаю, что приведенные данные доказывают, что высказанный закон не противоречит ни одному из известных в естествознании фактов и поразительно подтверждается большим числом их. Я постарался установить, по возможности полно, следствия, которые получаются из комбинации этого закона с известными до сих пор законами естественных явлений и которые еще должны ожидать своего подтверждения на опыте. Цель этого исследования, которая может оправдать и гипотетическую часть его, — представить физикам в возможной полноте теоретическое, практическое и эвристическое значения этого закона, полное подтверждение которого должно быть рассматриваемо как одна из главных задач ближайшего будущего физики.

Комментарий

Перевод с немецкого работы Г. Гельмгольца выполнен П. П. Лазаревым. Отрывки из работы воспроизводятся по изданию: Гельмгольц Г. О сохранении силы. 2-е изд. М. — Л., 1934. Название работы на языке оригинала: Ueber die Erhaltung der Kraft.

¹ Речь идет о работе Ф. Неймана «Общие законы индуцированных электрических токов», опубликованной в 1846 г.

² Работа Грассмана «Новая теория электродинамики» (1845).

³ В пункте 4 Гельмгольц рассматривает эффект намагничивания куска стали при приближении его к магниту.

⁴ В работе «Электродинамические измерения» (1841).

Литература

- [1] Собрание сочинений Г. Гельмгольца: Wissenschaftliche Abhandlungen von Hermann Helmholtz. Bd. 1—3. Leipzig, 1882—1895.
- [2] Гельмгольц Г. Популярная речь. Ч. 1—2. 2-е изд. СПб., 1898—1899.
- [3] Koenigsberger L. Hermann von Helmholtz. Bd. 1—3. Braunschweig, 1902—1903.
- [4] Столетов А. Г. Гельмгольц и современная физика. — В кн.: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М. — Л., 1941, с. 307—340.
- [5] Лебединский А. В., Франкфурт У. И., Франк А. М. Гельмгольц. М., 1966.



У. Томсон (Кельвин)

1824—1907

Об абсолютной шкале температур и втором начале термодинамики

Дальнейшее развитие промышленности в середине XIX в., имевшее в своей основе использование тепловых машин, неизбежно должно было привести к активизации и теоретических, и экспериментальных исследований тепловых машин. В течение десяти лет основополагающая работа С. Карно находилась в забвении, из которого ее извлек французский физик и инженер Б. Клапейрон. В 1834 г. он опубликовал работу, в которой облек идеи Карно в математическую форму, дополнив их результатами собственных исследований. Появление работы Клапейрона стимулировало разработку проблем термодинамики другими учеными. Одним из важнейших шагов на пути к построению здания классической термодинамики была идея английского физика У. Томсона о возможности построения абсолютной температурной шкалы.

Уильям Томсон родился 26 июня 1824 г. в Белфасте в семье профессора инженерии. Когда мальчику было семь лет, семья переехала в Глазго, где отец Уильяма получил кафедру математики в университете. Томсон рано потерял мать, и его воспитанием, как и воспитанием старшего брата, занимался отец, пользовавшийся у мальчиков огромным уважением.

Лекции отца в университете Уильям начал посещать уже в восемь лет, а в десять он уже был полноправным студентом. Закончив обучение в Глазго, семнадцатилетний Томсон поступил в Кембриджский университет, где специализировался по математике. После выпуска из Кембриджа по совету отца Уильям отправляется в Париж для стажировки в лаборатории известного экспериментатора В. Реньо, который проводил систематические исследования в области теплоты.

Тематика работ Реньо совпадала с интересами Томсона — еще во время учебы в Англии он под влиянием работ Фурье занялся исследованием процессов распространения тепла. Внимание Томсона привлекала также аналогия между описанием

электростатических и тепловых явлений. Этот интерес к термо- и электродинамике ученый сохранял в течение всей жизни.

После возвращения из Франции Уильям занимает кафедру натуральной философии (физики) в университете Глазго. Будучи блестящим теоретиком, Томсон в то же время много занимался экспериментальной физикой. По примеру Реньо он создал при кафедре лабораторию, в которой велась как учебная, так и исследовательская работа. С университетом Глазго связана практически вся творческая жизнь Томсона: он занимал кафедру физики в течение пятидесяти трех лет, а в последние годы жизни был президентом университета.

Научные интересы Томсона удивительно разнообразны. Так, стажирясь в Париже, он разработал метод решения задач электростатики, получивший название метода «зеркальных изображений» (1846). Там же Томсон по работе Клапейрона ознакомился с теорией Карно, что впоследствии (1848) привело его к идее об абсолютной термодинамической шкале температур. В 1851 г. независимо от Клаузиуса Томсон сформулировал второе начало термодинамики. На основе своих исследований по термодинамике Томсон вместе с Дж. Джоулем установил (1853—1854) изменение температуры газа при его дросселировании (эффект Джоуля—Томсона). В 1856 г. Томсон открыл третий термодинамический эффект (первые два — возникновение термо-ЭДС и выделение теплоты Пельтье), состоявший в выделении так называемой «теплоты Томсона» при протекании тока по проводнику, характеризующемуся ненулевым градиентом температуры. Томсону принадлежит и построение последовательной теории термоэлектрических явлений.

Томсон внес большой вклад в развитие практических применений электричества. Он был главным научным консультантом при прокладке первых трансатлантических кабелей, обеспечивших устойчивую телеграфную связь между двумя континентами. За участие в прокладке трансатлантического кабеля Томсон был возведен в дворянское достоинство (1865). В деле прокладки кабеля роль Томсона не ограничивалась консультациями. В связи с проблемой распространения электрических сигналов он рассмотрел процесс электромагнитных колебаний в контуре и вывел формулу для периода собственных колебаний, названную его именем. Кроме того, Томсон сконструировал целый ряд точных электрических приборов («кабельный» гальванометр, квадрантный электрометр, электростатический вольтметр и др.). Работы по прокладке трансатлантического кабеля пробудили в Томсоне интерес к проблемам морской навигации. Следствием этого интереса стало создание эхолота непрерывного действия, мареографа, принципиальное усовершенствование морского компаса. Об авторитете Томсона и уважении к нему свидетельствуют слова одного морского офицера: «Каждый моряк должен молиться на него еженощно!»

С 60-х годов Томсон начал разрабатывать теорию вихревых

атомов. Это направление исследований Томсона было связано с его общей методологической установкой — стремлением объяснить все физические явления механическими причинами. Томсоном была разработана вихревая теория светового эфира, которую Дж. Гиббс считал достойной соперницей электромагнитной теории света. В целом работы Томсона на эту тему явились как бы завершением попыток построить законченную механическую картину мира.

Томсон пользовался огромным авторитетом среди ученых всего мира. Он был членом многих научных академий и обществ (в том числе Петербургской АН), избирался президентом Лондонского Королевского общества, удостоивался многих наград. Ученый умер 17 декабря 1907 г.

На первом этапе исследований по термодинамике Томсон колебался в выборе точки зрения на природу теплоты. Поначалу он придерживался традиционной теории теплорода, и его работа (1848), в которой предложен принцип построения абсолютной шкалы температур, основана на этой теории. Позднее под влиянием исследований Джоуля Томсон перешел на позиции кинетической теории теплоты. Заметим, однако, что подход к построению термодинамической шкалы температур, предложенный Томсоном, оказался приемлемым и при новой точке зрения на природу тепла.

Важную роль в развитии учения о теплоте сыграла формулировка второго начала термодинамики как невозможности вечного двигателя второго рода, данная Томсоном. Стимулом для выяснения смысла и условий применимости этого закона послужила идея ученого о неизбежности «тепловой смерти» Вселенной (1852), ошибочность которой была убедительно продемонстрирована Л. Больцманом.

Об абсолютной термометрической шкале, основанной на теории Карно о движущей силе тепла и рассчитанной из наблюдений Реньо¹

Определение температуры давно признано в физической науке проблемой величайшей важности. Соответственно она была предметом наиболее пристального внимания и особенно в последние годы — очень тщательных и утонченных экспериментальных исследований. В настоящее время мы обладаем настолько полным практическим решением этой проблемы, насколько это может быть желательно даже для наиболее точных изысканий. Однако теория термометрии еще весьма далека от столь удовлетворительного состояния. Принцип, которому должно следовать при конструировании термометрической шкалы, на первый взгляд,

может показаться очевидным, поскольку может представляться, что совершенный термометр должен показывать равные приращения теплоты, как соответствующие равным приростам температуры, оцениваемым по числу делений этой шкалы. Теперь, однако, по вариациям удельных теплот тел установлен как экспериментально доказанный тот факт, что термометрия [основанная] на этих условиях невозможна, и мы остались без какого-либо принципа, на котором можно было бы основать абсолютную термометрическую шкалу.

Следующий по важности момент в первичном установлении абсолютной термометрической шкалы независимо от свойств любых конкретных видов вещества состоит в выборе условной системы термометрии, по которой результаты наблюдений, выполненных различными наблюдателями в разных местах и условиях, можно было бы точно сравнивать. Эта цель в весьма полной мере достигается с помощью термометров, устроенных и градуированных в соответствии с ясно определенными методами, освоенными лучшими приборостроителями наших дней, когда при интерпретации показаний термометров путем, допускающим сравнение, следуют ранее строго определенным (в особенности Ренью) экспериментальным процедурам. Конкретным видом термометра, в наименьшей степени подверженного неопределенным отклонениям любого типа, является термометр, который основан на расширении воздуха, и он поэтому повсеместно принят как эталон для сравнения термометров всех конструкций. Отсюда шкала, которая используется в настоящее время для оценки температуры, — это шкала воздушного термометра; и в точных исследованиях всегда заботятся о сведении к этой шкале показаний реально применяемого прибора, каковы бы ни были его конкретная конструкция и градуировка.

Принцип, согласно которому градуируется шкала воздушного термометра, состоит попросту в том, что равные абсолютные приращения объема массы воздуха или газа при постоянном давлении в приборе будут показывать по шкале равные разности чисел. Длина «градуса» определяется при этом путем приписывания определенного числа интервалу между точками замерзания и кипения. Ренью обнаружил, что различные термометры, построенные с использованием воздуха при разных давлениях или иных газов, дают показания настолько близкие, что различия оказываются неощутимыми*, если только не используются определенные газы, такие, как сернистая кислота, которые приближаются к физическому состоянию насыщенного пара. Это замечательное обстоятельство значительно увеличивает практическую

* Regnault, Relation des Expériences, etc. Fourth Memoir, 1st part. Различия, как замечает Ренью, должны были бы быть более ощутимыми, если бы градуировка выполнялась на основе предположения, что коэффициенты расширения различных газов равны, вместо того чтобы основываться на принципе, изложенном в тексте, согласно которому точки замерзания и кипения определяются экспериментально для каждого термометра.

ценность воздушного термометра. Тем не менее строгий стандарт может быть введен лишь путем выбора в качестве термометрического вещества определенного газа при фиксированном давлении. И хотя мы имеем точный принцип создания определенной системы для оценки температуры, все же, поскольку здесь существенна ссылка на конкретное тело как эталонное термометрическое вещество, мы не можем считать, что получили абсолютную шкалу, и, строго говоря, может рассматривать эту реально принятую шкалу лишь как условное множество оцифрованных точек отсчета, достаточно близкое к требованиям термометрии.

Поэтому при современном состоянии физической науки возникает исключительно интересный вопрос: существует ли какой-либо принцип, на котором может быть основана абсолютная термометрическая шкала?

Мне представляется, что теория Карно о движущей силе тепла позволяет нам дать на него утвердительный ответ.

Связь между движущей силой и теплом, как установлено Карно, состоит в том, что количества теплоты и интервалы температур входят как единственные элементы в выражение для механического действия, которое может быть получено посредством теплоты. Поскольку мы независимо располагаем определенной системой для измерения количеств теплоты, нам представляется и мера для интервалов, в соответствии с которой могут оцениваться абсолютные разности температур. Дабы сделать это более понятным, несколько слов следует сказать в пояснение теории Карно; но за полным изложением этого наиболее значимого вклада в физическую науку читатель отсылается к любой из работ, упоминавшихся выше (оригинальному сочинению Карно или статье Клапейрона об этом же предмете)².

При настоящем состоянии науки неизвестно действие, посредством которого теплота могла бы поглощаться либо без повышения температуры вещества, либо без превращения в скрытую теплоту и произведения некоторого изменения физического состояния тела, в котором она поглощается. Превращение теплоты (или caloric) в механическое действие, вероятно, невозможно³ или, во всяком случае, не обнаружено³. В реальных машинах для получения механического действия посредством теплоты мы должны искать источник силы не в каком-либо поглощении и превращении, но единственно в передаче теплоты. Так Карно, отталкиваясь от общепринятых физических принципов, показы-

* Это мнение, по-видимому почти без исключения, принималось теми, кто писал об этом предмете. Тем не менее противоположное мнение защищает м-р Джоуль из Манчестера. Некоторые весьма замечательные открытия, которые он сделал в отношении генерации теплоты посредством трения в жидкостях, находящихся в движении, и некоторые известные эксперименты с магнетозлектрическими машинами по видимости указывают на реальное превращение механического действия в теплоту. Тем не менее не представлено никаких экспериментов, в которых демонстрировалось бы обратное действие. Но следует признать, что многое из того, что относится к этим фундаментальным вопросам натуральной философии, еще окружено тайной.

вает, что механическое действие должно получаться именно благодаря *опусканию* теплоты от горячего тела к холодному через среду машины (например, паровой или воздушной); и обратно: он доказывает, что то же количество теплоты может быть *поднято* от холодного тела к горячему (машина в этом случае *работает в обратном направлении*) при затрате разного количества работающей силы (*labouring force*), точно так же как механическое действие может быть получено при течении воды вниз в водяном колесе или как в работающем насосе вода может подниматься на более высокий уровень. Количество механического действия, которое можно получить при передаче данного количества теплоты через какую-либо среду машины, в которой достигается совершенная экономия, будет зависеть, как показывает Карно, не от конкретной природы вещества, используемого в качестве среды для передачи теплоты в машине, но только от разности температур двух тел, между которыми теплота передается.

Карно детально исследовал идеальную конструкцию воздушной и паровой машин, при которой, кроме того что удовлетворено условие совершенной экономии, машина устроена так, что в заключение полного цикла используемое вещество (в одном случае — воздух, а в другом — вода) приводится в то же физическое состояние, в каком оно было в начале. Таким образом он показывает, на каких началах, доступных экспериментальному определению, либо со ссылкой на воздух, либо на жидкость и ее пар, может быть установлена абсолютная величина механического действия, обусловленного передачей единицы теплоты от горячего тела холодному при любом интервале термометрической шкалы. В статье м-ра Клапейрона представлены различные экспериментальные данные, по общему признанию очень неполные, и из них в соответствии с формулами Карно для различных частей шкалы рассчитаны величины механического действия, вызванного опусканием единицы теплоты на один градус воздушного термометра. Полученные результаты весьма определенно показывают, что величина, которую мы с большим основанием можем назвать градусом (оцениваемым по механическому действию, полученному при опускании единицы количества теплоты на эту величину) воздушного термометра, зависит от того, в какой части шкалы она берется, причем для высоких температур она меньше, чем для низких*.

Характерное свойство той шкалы, которую я теперь предлагаю, состоит в том, что все градусы имеют одну и ту же вели-

* Это то, что мы могли предвидеть, поскольку считаем, что бесконечный холод должен соответствовать конечному числу градусов воздушного термометра ниже нуля. Если мы доведем строгий принцип градуировки, установленный выше, достаточно далеко, то достигнем точки, соответствующей объему воздуха, уменьшенному до нуля, что будет отмечено на шкале как -273° ($-100/0,366$, если 0,366 есть коэффициент расширения). Поэтому -273° воздушного термометра — это точка, которой не может достигнуть никакая конечная температура, сколь бы низкой она ни была.

чину, т. е. единица теплоты, опускающаяся от тела A с температурой T по этой шкале к телу B с температурой $(T-1)$, должна создавать одно и то же механическое действие, каким бы ни было число T . Такая шкала справедливо может быть названа абсолютной, поскольку ее характеристика совершенно не зависит от физических свойств какого-либо конкретного вещества.

Для того чтобы сравнить эту шкалу со шкалой воздушного термометра, должны быть известны величины градусов воздушного термометра (соответствующие принципу оценки, установленному выше). Тогда выражение Карно, полученное из рассмотрения его идеальной паровой машины, позволяет нам рассчитывать эти величины, если скрытая теплота какого-либо данного объема и давления насыщенных паров при любой температуре определены экспериментально. Определение этих величин составляет главную цель огромной работы Реньо, о которой уже упоминалось, но в настоящее время его исследования еще не завершены. В первой части, которая пока только и опубликована, были определены скрытые теплоты данных весов и давление насыщенных паров для всех температур между 0 и 230° (по стоградусной шкале воздушного термометра). В дополнение необходимо было бы знать плотность насыщенных паров при различных температурах, что позволило бы определить скрытую теплоту любого данного объема при любой температуре. М-р Реньо сообщил о своем намерении начать подобные исследования; но, пока эти результаты неизвестны, у нас нет другого пути дополнения данных для решения настоящей задачи, кроме оценки плотности насыщенного пара при любой температуре (причем соответствующие давления известны по уже опубликованным исследованиям Реньо) в соответствии с приближенными законами сжимаемости и расширения (законы Мариотта и Гей-Люссака или Бойля и Дальтона). В пределах естественных температур в обычном климате плотность насыщенного пара уже измерена Реньо⁴ для проверки этих законов. Исходя из экспериментов, которые были выполнены Гей-Люссаком и др., мы имеем основание верить, что вплоть до температуры 100° значительных отклонений быть не может. Но наша оценка плотности насыщенного пара, основанная на этих законах, может быть сильно ошибочной при таких высоких температурах, как 230° . Следовательно, полностью удовлетворительный расчет предложенной шкалы не может быть проведен впредь до получения дополнительных экспериментальных данных. И все же с теми данными, которыми мы уже обладаем, можно привести приближенное сравнение новой шкалы со шкалой воздушного термометра, которое, по крайней мере между 0 и 100° , будет достаточно удовлетворительным.

Труд по выполнению необходимых расчетов для проведения сравнения предложенной шкалы и шкалы воздушного термометра в пределах от 0 до 230° последнего любезно взял на себя м-р Уильям Стил, до недавнего времени работавший в Глазго-

колледже, а теперь — в колледже Св. Петра и Кембридже. Его результаты были представлены Обществу в виде таблиц вместе с диаграммой, на которой сравнение двух шкал представлено графически. В первой таблице⁵ показаны величины механического действия, обусловленного опусканием единицы теплоты на последовательное число градусов воздушного термометра. Принятая единица теплоты — это количество [теплоты], необходимое для повышения температуры 1 кг воды от 0 до 1° воздушного термометра, а единица механического действия — это килограмм-метр, т. е. действие, совершаемое при поднятии 1 кг на высоту 1 м.

Механическое действие, выраженное в футо-фунтах, обусловленное единицей теплоты по стоградусной шкале, переходящей от тела при любой температуре, меньшей 230°, к телу с температурой 0°

Верхний предел температуры	Механическое действие	Верхний предел температуры	Механическое действие
1	4,960	20	96,656
2	9,906	30	143,058
3	14,838	40	188,223
4	19,756	50	232,185
5	24,661	60	274,975
6	29,553	70	316,644
7	34,431	80	357,271
8	39,296	90	396,935
9	44,148	100	435,695
10	48,987		

Во второй таблице⁶ представлены температуры по предложенной шкале, которые соответствуют различным градусам воздушного термометра от 0 до 230°. Условные точки, совпадающие на обеих шкалах — 0 и 100°.

Замечание. Если мы сложим вместе первые сто чисел, данные в первой таблице, то получим 135,7 для работы, обусловленной опусканием единицы теплоты от тела *A* при 100° к *B* при 0°. Далее, 79 таких единиц теплоты, согласно д-ру Блэку (его результаты очень ненамного поправлены Ренью), заставляют таять килограмм льда. Следовательно, если теплоту, необходимую для плавления фунта льда принять за единицу, а метр-фунт — за единицу механического действия, то работа, которая должна получаться при опускании единицы количества теплоты от 100 до 0°, составляет 79·135,7, или приблизительно 10 700. Это то же самое, что и 35 100 футо-фунтов, что чуть больше, чем работа двигателя 1 л. с. за 1 мин (33 000 футо-фунтов). Следовательно, если бы мы имели паровую машину в 1 л. с., работающую с совершенной экономией, с котлом при температуре 100° и конденсатором, поддерживаемым при температуре 0° путем непрерывного добавления льда, то за 1 мин должно было бы таять гораздо менее, чем фунт льда.

О динамической теории теплоты...

ЧАСТЬ I

Основные принципы теории движущей силы тепла

9. Вся теория движущей силы теплоты основывается на следующих двух положениях, обязанных своим происхождением первое — Джоулю, а второе — Карно и Клаузиусу.

Положение I (Джоуль). Во всех случаях, когда равные количества механического действия получаются каким бы то ни было способом исключительно за счет источника тепла или теряются при исключительно тепловых действиях, всегда уничтожаются или приобретаются равные количества теплоты.

Положение II (Карно и Клаузиус). Если какая-либо машина устроена таким образом, что при работе ее в противоположном направлении все механические и физические процессы в любой части ее движений превращаются в противоположные, то она производит точно такое же механическое действие, какое могла бы произвести за счет заданного количества теплоты любая термодинамическая машина с теми же самыми температурами источника тепла и холодильника. <...>

12. Доказательство второго положения основывается на следующей аксиоме: *невозможно при помощи неодушевленного материального деятеля получить от какой-либо массы вещества механическое действие путем охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих предметов**.

13. Для доказательства второго положения допустим, что существуют две термодинамические машины *A* и *B*, из которых *B* удовлетворяет условиям, указанным в формулировке второго предложения, и пусть, если возможно, *A* производит из заданного количества теплоты больше работы, чем *B*, когда их источники тепла и холодильники находятся при соответственно равных температурах. Тогда в силу полной *обратимости* всех совершаемых ею операций машина *B* могла бы работать в обратном направлении и могла бы возвращать своему источнику тепла некоторое количество теплоты за счет той работы, которую она при обратном своем действии получила бы из такого же количества теплоты. Если *B* заставить работать в обратном направлении и возмещать источнику тепла машины *A* (которую мы можем предположить соответственно приложенной к *B*) как раз столько теплоты, сколько было заимствовано из него в течение определенного периода действия машины *A*, то окажется, что затра-

* Если бы мы не признали эту аксиому действительной при всех температурах, нам пришлось бы допустить, что можно ввести в действие автоматическую машину и получать путем охлаждения моря или земли механическое действие в любом количестве, вплоть до исчерпания всей теплоты суши и моря или, в конце концов, всего материального мира.

чено на это было работы меньше, чем ее было получено от действия машины *A*. Таким образом, если подобные ряды прямых операций машины *A* и обратных — машины *B*, работающих либо поочередно, либо одновременно, будут продолжены, то результатом этого будет непрерывное получение работы без непрерывного извлечения теплоты из источника тепла. Согласно положению 1, отсюда следует, что при обратной работе машины *B* из холодильника должно забираться больше теплоты, чем ему передается при прямой работе машины *A*. Можно было бы поставить дело и таким образом, чтобы машина *A* тратила часть своей работы на приведение в обратное движение машины *B*, и всю эту установку можно было сконструировать в виде автоматически действующего аппарата. Итак, в этом случае от источника тепла не отнималось бы и ему не сообщалось бы никакой теплоты, а всем прочим окружающим телам и пространствам, за исключением холодильника, можно было бы, не вступая в противоречие с каким-либо принятым ранее условием, приписать температуру, равную температуре источника тепла, какова бы ни была последняя. Мы, следовательно, имели бы автоматически действующую машину, способную непрерывно извлекать теплоту тела, окруженного другими телами с более высокой температурой, и превращать эту теплоту в механическое действие. Но последнее противоречит нашей аксиоме, и поэтому мы приходим к заключению, что гипотеза, допускающая, будто машина *A* извлекает из равного количества теплоты, взятой из источника тепла, большее механическое действие, чем машина *B*, является ложной. Следовательно, при определенных температурах источника тепла и холодильника никакая машина не может извлечь из данного количества введенного в нее теплоты больше работы, чем машина, удовлетворяющая условиям обратимости, что и требовалось доказать. (...)

Комментарий

Сокращенный перевод с английского работы У. Томсона «Об абсолютной термометрической шкале...» выполнен С. Р. Филимоновичем по публикации: On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and calculated from Regnault's observations. «Philosophical Magazine», 1848, Ser. 3, vol. 33, n222, p. 313—316. Сокращены лишь некоторые примечания Томсона. Перевод с английского работы У. Томсона «О динамической теории теплоты...» выполнен В. С. Голманом. Отрывки из нее воспроизводятся по изданию: Второе начало термодинамики. Сб., М. — Л. 1934, с. 161—174. Название этой работы на языке оригинала: On the Dynamical Theory of Heat, with numerical Results deduced from Mr. Joule's Equivalent of a thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam (1851).

¹ В. Реньо проводил исследования термодинамических свойств различных веществ на протяжении нескольких десятилетий. Первый том издания, содержащего полученные им результаты, вышел в 1847 г., второй — в 1862 г., третий — в 1870 г.

² Статья Клапейрона называлась «Мемуар о движущей силе огня».

³ Эта фраза объясняется тем, что при подготовке данной работы Томсон еще не отказался окончательно от теории теплорода, хотя определенные сомнения относительно ее справедливости у него уже были (см. подстрочное примечание Томсона в тексте).

⁴ В работе «Очерки по гигрометрии».

⁵ Ниже приведен сокращенный вариант таблицы, на которую ссылается Томсон.

⁶ Таблица, о которой говорит Томсон, в его опубликованной работе не приведена.

Литература

- [1] Собрание сочинений У. Томсона:
Thomson W. Mathematical and Physical Papers. Vols. 1—6.
Cambridge, 1911.
- [2] Thomson S. P. The Life of William Thomson, Baron Kelvin
of Largs. Vols. 1—2. London, 1901.
- [3] Мак-Дональд Д. Фарадей, Максвелл и Кельвин. М.,
1967.



Л. Фуко

1819—1868

О скорости света в различных средах

Вопрос о том, как соотносятся между собой скорости света в различных прозрачных средах, интересовал исследователей с начала XVII в. Уже Р. Декарт при обосновании закона преломления света (1637), руководствуясь механической аналогией, выдвинул гипотезу, что коэффициент преломления есть отношение скорости света в двух средах, на границе между которыми происходит преломление. Хотя обоснование этой гипотезы еще при жизни Декарта подвергалось резкой критике (в частности, со стороны П. Ферма), впоследствии ее содержание стало составной частью двух основных конкурировавших теорий света: корпускулярной и волновой. В рамках корпускулярной теории предполагалось, что если закон преломления записывается в виде $\sin i / \sin r = n$ (i и r — углы падения и преломления соответственно), то $n = v_2 / v_1$, причем v_1 — скорость света в первой среде, где определяется угол падения, а v_2 — скорость света во второй среде, в которой находится угол преломления. Следствием волновой теории было равенство $n = v_1 / v_2$. Таким образом, еще в XVII в. возникла идея «решающего эксперимента», который мог однозначно подтвердить справедливость одной теории и указать на ошибочность другой. Однако проведения этого *experimentum crucis* пришлось ждать почти 200 лет. Первым, кому удалось осуществить этот труднейший эксперимент, был французский физик Леон Фуко.

Жан Бернард Леон Фуко родился 19 сентября 1819 г. в Париже в семье книгоиздателя. Вследствие слабого здоровья мальчик получил начальное образование дома. С детства у Фуко проявились склонности к изобретательству и тонкому ручному труду. Желая найти наилучшее применение своему таланту, Фуко начал изучать хирургию. Однако оказалось, что он не переносит вида крови. Более приемлемыми для Фуко оказались исследования в области клинической микроскопии, к которым его привлек А. Донне. Кроме того, в течение ряда лет Фуко активно занимался журналистикой, выступая в качестве научного обозревателя в одной из парижских газет.

Интерес Фуко к фотографии (называвшейся тогда дагерротипией) свел его с И. Физо. Вместе с ним молодой ученый провел

ряд оптических исследований, наиболее известное из которых — наблюдение интерференции света при больших разностях хода.

Через некоторое время от сотрудничества Физо и Фуко перешли к творческому соревнованию по определению скорости света в земных условиях. Физо с помощью вращающегося зубчатого колеса первым добился успеха (1849), Фуко же опередил коллегу в постановке *experimentum crucis* — сравнении скоростей света в различных средах (1850).

Научные интересы Фуко не ограничивались оптикой. Так, в 1851 г. он провел эксперимент с маятником, доказавший вращение Земли, за что был награжден орденом Почетного легиона. В 1855 г. ученый обнаружил нагревание сплошных металлических тел индукционными токами («токи Фуко») и предложил способ их уменьшения. Большой интерес проявлял Фуко к астрономическим наблюдениям, для которых конструировал оригинальные инструменты.

Фуко принадлежит большое число изобретений, получивших широкое применение на практике (гироскоп, регулятор дуговых ламп, фотометр и др.). Он также разработал метод серебрения стекла для изготовления отражательных телескопов, позволивший значительно уменьшить их стоимость.

Несмотря на очень высокую продуктивность научной работы Фуко, его деятельность получила довольно поздно признание на родине. Лишь незадолго до смерти он был избран членом Французской Академии наук (заметим, что ранее он стал членом-корреспондентом Петербургской Академии наук и членом Лондонского Королевского общества). Умер ученый 11 февраля 1868 г.

В постановке опыта с вращающимся зеркалом у Фуко был предшественник — известный французский физик и астроном Ф. Араго. Именно он в 1838 г. предложил использовать вращающееся плоское зеркало для проведения *experimentum crucis* (до этого в опытах по измерению скорости распространения электрических сигналов по проводам вращающееся зеркало использовал английский физик Ч. Уитстон). В схеме установки Араго и его методике проведения опыта имелись принципиальные недостатки, что привело при проведении опытов к неудаче. С разрешения Араго Фуко воспользовался самим принципом вращающегося плоского зеркала, но внес в схему опыта весьма существенные усовершенствования и добился успеха. Отметим, что в 1853 г. за опыты по сравнению скоростей света в воздухе и воде Фуко был удостоен докторской степени. К этим опытам он вернулся еще раз в 1862 г., когда получил наиболее точные результаты.

Об относительных скоростях света в воздухе и в воде

Общий метод измерения скорости света в прозрачных средах.

Относительные скорости света в воздухе и в воде

Задача нового метода, который мне остается описать, состоит в обеспечении возможности работать на малом расстоянии и оценивать время, затрачиваемое светом для прохождения отрезка в несколько метров. Чтобы точно определить этот метод, а также для того, чтобы отличить его от методов, предлагавшихся ранее, достаточно сформулировать его важнейшую особенность, которая состоит в *наблюдении неподвижного изображения движущегося изображения*.

Вращающееся зеркало, соединенное с объективом зрительной трубы, легко дает движущееся изображение неподвижного объекта; однако не менее справедливо, хотя, возможно, и менее очевидно, что при использовании отражения от неподвижного зеркала та же оптическая система становится весьма подходящей для того, чтобы давать новое неподвижное изображение движущегося изображения.

Я сначала докажу этот первый пункт, а потом продемонстрирую, что вращательное движение зеркала создает смещение неподвижного изображения, которое позволяет найти скорость света в проходимой им среде как функцию легко измеряемых величин.

При смене среды, если все прочее остается без изменений, смещение должно измениться так, что станет ясно, как скорость света связана с коэффициентом преломления. Я буду настаивать на этом способе сравнения, который является главной целью настоящей работы, и обнародую схему, позволяющую работать сразу с несколькими средами и одновременно наблюдать и сравнивать соответствующие смещения. Затем я дополню описание установки и прибавлю детали, касающиеся предосторожностей, необходимых для обеспечения успеха опыта и повышения точности измерений.

Общая схема опыта. На одной горизонтальной прямой помещают: 1) миру, образованную тонкой платиновой нитью, натянутой в середине маленького квадратного отверстия со стороной 2 мм, вырезанного в тонкой непрозрачной металлической пластинке; 2) оптический центр ахроматического объектива; 3) центр плоского зеркала, способного вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей очень близко к его отражающей поверхности. С помощью гелиостата пучок солнечного света направляется вдоль ряда из этих трех элементов и фиксируется [в этом направлении]. Тогда мир пропускает некоторую часть света.

которая подает на объектив, расположенный от мира на расстоянии, немного меньшем двойного фокусного расстояния. Преломляемый этим объективом свет отражается от плоского зеркала, чтобы образовать в пространстве увеличенное изображение отверстия и нити. Поскольку по желанию расстояние от объектива до мира можно менять, следовательно, произвольно заставляют меняться расстояние от изображения до зеркала, и, когда оно приводится во вращение, изображение движется в пространстве по окружности, радиус которой может принимать желательную протяженность.

Таким образом формируется движущееся изображение, след которого можно различить на экране. Чтобы получить неподвижное изображение, необходимо на окружности, описываемой движущимся изображением, поместить отражающую поверхность сферического вогнутого зеркала, ориентированного так, чтобы его центр кривизны совпадал с центром вращающегося зеркала. Когда это условие выполнено, вращающийся пучок отражается от этого зеркала в течение всего времени, пока он встречает на своем пути вогнутое зеркало, все элементы которого перпендикулярны оси пучка. Кроме того, пучок продолжает проходить установку в обратном направлении до мира, точки его выхода, которую он покрывает прямым изображением натуральной величины, причем все точки изображения перекрываются с соответственными точками самой мира.

Действительно, пусть ab [рис. 93, а] — предмет, а $a'b'$ — его изображение, образованное объективом L и падающее на отражающую поверхность вогнутого зеркала M' . Пусть c — точка пространства, где позже будет помещен центр вращающегося зеркала. Если вогнутое зеркало имеет центр кривизны в точке c , то большая часть пучка, отраженного от его поверхности, будет направлена через объектив для воссоздания на предмете ab прямого изображения в натуральную величину. В тот момент, когда свет возвращается к объективу, изображение $a'b'$ становится предметом, точка которого a' является центром, сопряженным с a , и точка b' сопряжена с b . Следовательно, весь свет, вращающийся от a' и проходящий через объектив, должен попадать в a ; весь свет, возвращающийся от b' , должен попадать в b и так же для всех других точек. Значит, предмет ab покрыт равным ему сходно расположенным изображением самого себя.

Теперь установим плоское зеркало m под некоторым наклоном. Чтобы узнать, где будет образовано отраженное изображение $a''b''$, имеется хорошо известный способ построения: продолжают след плоского зеркала cm и для точек $a''b''$ определяют положения с одной стороны этой плоскости, симметричные тем, которые с другой стороны занимают точки $a'b'$. Потом устанавливают вогнутое зеркало M' и ориентируют его, заставляя его центр кривизны попадать в точку c . Световой пучок возвращается к плоскому зеркалу, оттуда — к объективу, как будто он

проходит от $a'b'$, и окончательно образует изображение предмета ab на самом предмете.

Это устройство дает одинаковый результат при всех наклонах плоского зеркала, поскольку доказательство не зависит от угла падения. Таким образом, безразлично, падает ли изображение в $a''b''$ или в $a'''b'''$ и каково его положение на поверхности зеркала M' ; изображение по возвращении неизменно совпадает с предметом ab . Для того чтобы на опыте констатировать неизменность положения этого изображения, между объективом L и предметом ab наклонно к оси объектива помещают толстое плоскопараллельное стекло, поверхность которого q дает путем частичного отражения легко видимое изображение $\alpha\beta$. Рассматриваемое с помощью окуляра o изображение $\alpha\beta$ сохраняет строго одно и то же положение, какое бы переменное направление ни получал пучок между двумя зеркалами: плоским и вогнутым; значит, это действительно неподвижное изображение движущегося изображения.

В использовавшейся установке предметом ab является мира [рис. 93, б], описанная выше: объектив L имел фокусное расстояние 1,90 м, и окуляр с микрометром давал увеличение от 10 до 20 раз. Вращающееся зеркало имело диаметр 14 мм, а радиус кривизны вогнутого зеркала был 4 м. Расстояние от вращающегося зеркала до предмета могло варьироваться в очень широких пределах, и положение объектива определялось необходимостью поместить предмет и поверхность вогнутого зеркала в сопряженные по отношению к объективу точки.

Приведем теперь зеркало в движение и заставим его непрерывно вращаться (сначала медленно) в направлении, показанном стрелкой [рис. 93, а].

Поскольку угол падения постепенно изменяется, а угол отражения должен всегда оставаться равным ему, отраженный пучок поворачивается вокруг точки c , как зеркало, но с удвоенной угловой скоростью. Изображение вращается по окружности и за каждый поворот плоского зеркала один раз проходит по вогнутому зеркалу, порождая для наблюдателя изображение $\alpha\beta$, которое остается погасшим в течение всего времени, протекающего между двумя последовательными прохождением. Поэтому, когда число оборотов зеркала меньше 30 в секунду, изображение лишь прерывисто вспыхивает. При больших скоростях его появления следуют достаточно быстро для того, чтобы сливаться одно с другим по причине стойкости зрительного восприятия. Изображение $\alpha\beta$ кажется тогда постоянным, а его интенсивность для наблюдателя падает в отношении длины полной окружности к половине отражающей дуги вогнутого зеркала.

Однако когда зеркало вращается достаточно быстро, проявляется другой эффект, и видно возникновение важного явления смещения. Изображение $\alpha\beta$ смещается вдоль окулярного микрометра в таком направлении, в каком оно увлекается движением зеркала. Это смещение показывает, что длительность распро-

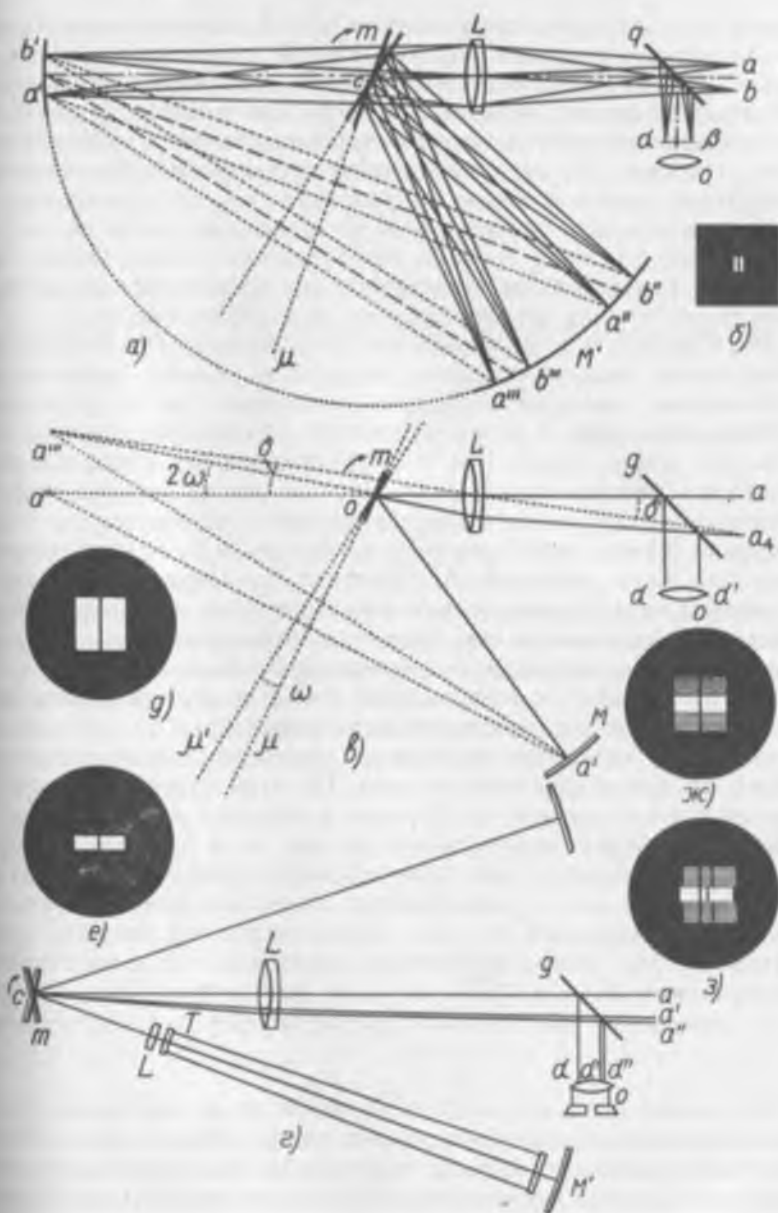


Рис. 93

странения света между двумя зеркалами не равна нулю и что она может быть измерена по смещению.

Для упрощения доказательства сведем источник света к одной точке a [рис. 93, a], предполагая, что в систему входит лишь центральный луч пучка ao , и рассмотрим его путь с момен-

та, когда происходит отражение от вращающегося зеркала под произвольным углом, необходимое для образования изображения в некоторой точке a' , на каком-либо нормальном элементе поверхности вогнутого зеркала M . Отражаясь от него, этот луч идет обратно к плоскому зеркалу, которое уже повернулось, и луч, отражаясь от него во второй раз при новом угле падения, приобретает также и новое направление, что не позволяет уже более образовывать изображение в точке выхода луча, но заставляет его давать в точке a_1 изображение, отклоненное в направлении вращательного движения, и, следовательно, изображение a' , настолько же отклоненное для наблюдателя.

Легко видеть, как величина этого отклонения связана со скоростью света, числом оборотов зеркала в единицу времени и с расстояниями, которые отделяют различные части установки.

Обозначим через r расстояние oa от оптического центра объектива до мира, через l и l' — расстояния от вращающегося зеркала до неподвижного и до того же оптического центра o . Определим n как число оборотов зеркала за секунду, π — как отношение длины окружности к диаметру и v — как скорость света, или путь, который он проходит за секунду. Назовем d дугу девиации aa_1 , равную aa' , и примем за ω угол, на который зеркало поворачивается за время, необходимое свету для прохождения туда и обратно между двумя зеркалами.

Для того чтобы угол отклонения δ был в точности удвоенным углом ω , я начну с пренебрежения расстоянием l' , т. е. с предположения, что объектив расположен на неощутимо малом расстоянии от вращающегося зеркала. По этой гипотезе, если зеркалу придается скорость n оборотов в секунду, наблюдаемое отклонение d будет определяться углом $\omega = \delta/2$, на который зеркало повернулось, пока свет проходил расстояние $2l$. Тогда отношение угла ω к n , умноженному на четыре прямых угла, или отношение отклонения d к $2n$, умноженному на полную длину окружности $2\pi r$, равно отношению расстояния $2l$ к расстоянию, проходимому светом за одну секунду, или равно $2l/v$, что дает

$$d = \frac{8\pi l n r}{v}.$$

Но в действительности объектив никогда не совпадает с вращающимся зеркалом, и эксперимент даже требует, чтобы между ними было установлено такое расстояние, при котором отклонение на нем заметно уменьшается. Поправка, которую необходимо ввести в полученную выше величину, с очевидностью вытекает из конструкции [установки], представленной на рис. 93.

Продолжим следы om , om' плоскости вращающегося зеркала в двух положениях, где оно находится в точности в те мгновения, которые ограничивают длительность прохождения света к вогнутому зеркалу, и построим относительно этих следов точки a'' и a''' , симметричные точке a' . Тогда угол $b''oa'''$ равен 2ω должен бы быть также равным углу девиации, если бы объектив

имел своим центром c . Но поскольку объектив всегда располагается на некотором расстоянии l' от зеркала, угол отклонения, равный противолежащему углу $a''oa'''$, меньше, чем $a''ca'''$, равный 2ω . Поскольку эти углы очень малы, то для вершин двух треугольников, которые имеют одно и то же основание $a''a'''$ и высоты l и $l+l'$, имеется пропорция

$$\frac{\delta}{2\omega} = \frac{l}{l+l'},$$

откуда вытекает, что вместо простого соотношения $\delta = 2\omega$ мы имеем $\delta = 2\omega \frac{l}{l+l'}$. Как следствие, истинное значение отклонения

$$d = \frac{2\pi l^2 n r}{v(l+l')}$$

и для скорости света

$$v = \frac{8\pi l^2 n r}{\delta(l+l')}.$$

Эта формула на самом деле может служить для расчета скорости света в воздухе с погрешностью, зависящей от точности, с которой измеряется отклонение, а также различные величины, обозначенные буквами l , l' , r и n .

К тому же выражению можно прийти, рассуждая несколько иначе, а именно: скорость света есть путь, проходимый им за единицу времени:

$$v = \frac{e}{t},$$

или

$$e = 2l, \quad t = \frac{\delta(l+l')}{4\pi l n r}.$$

Заменяя e и t их выражениями, находим, как и раньше,

$$v = \frac{8\pi l^2 n r}{\delta(l+l')}.$$

Этот же метод применим для измерения скорости света во всех однородных и прозрачных средах, которые помещаются между вращающимися и вогнутыми зеркалами. Если по всей длине траектории произведена замена на единственную среду, то отклонение изменится в простом отношении скоростей света в новой и старой средах. Если, например, пространство между зеркалами заполнить водой, ничего более не меняя, то, поскольку коэффициент преломления воды почти равен $4/3$, отклонение должно вырасти в отношении 4 к 3 для подтверждения волновой теории и уменьшиться в отношении 3 к 4 , чтобы подтвердить теорию истечения.

Однако, когда между двумя параллельными плоскостями помещается столб воды, приходится оставлять между этими плоскостями и зеркалами некоторое расстояние. В этом случае расстояние l делится на две части: одну P , занимаемую преломляющей средой, и другую Q , где остается воздух. В подобном случае наблюдаемое отклонение дает только среднюю скорость света u в пространстве, занимаемом частично водой, а частично воздухом. Но так как скорость [света] v в воздухе уже известна, а средняя скорость u находится тем же способом и можно непосредственно измерить длины P и Q , сумма которых равна l , то легко получить скорость света v' в воде. Действительно, средняя скорость света на пути $P + Q$ равна

$$u = \frac{(P + Q)vv'}{Pv + Qv'},$$

откуда

$$v' = \frac{Pvu}{(P + Q)v + Qu}.$$

У тому же, чтобы разрешить вопрос, интересный с точки зрения теории, нет необходимости ни измерять скорость света в воде, ни изыскивать средства достичь этого. Достаточно определить, как по отношению к отклонению, возникающему при проведении опыта только в воздухе, меняется девиация, когда устанавливается столб воды, достаточно длинный для создания ощутимого эффекта. Еще более желательно иметь в установке две линии для опыта, одну — только для воздуха, а другую — для воздуха и воды, и наблюдать два соответствующих смещения одновременно. Тогда сравнение становится настолько простым, что нет необходимости прибегать к каким-либо измерениям: части установки располагаются так, как показано на рис. 93, г.

Я пока избегаю усложнения геометрической схемы опыта, сводя, как и ранее, световой пучок к центральному лучу; условлено, что точка его выхода, обозначенная a , есть всегда мира, образованная квадратным отверстием, пересекаемым в середине вертикальной нитью, изображение которой, рассматриваемое в окуляр, имеет вид, показанный на рис. 93, д.

Справа и слева от прямого пучка по траектории движущегося изображения устанавливаются два вогнутых зеркала M и M' , поверхности которых принадлежат одной и той же сфере, имеющей своим центром c . Каждое из них ограничивает расстояние, базу эксперимента, которая тянется от их поверхностей до поверхности вращающегося зеркала.

Тогда движущийся луч при каждом обороте заставляют отражаться в двух различных направлениях: при падении на M и при падении на M' . Следовательно, число появлений изображения α удваивается. Иначе говоря, в действительности это изображение создается наложением двух изображений, одно из которых обязано прохождению света по линии cM , а другое —

прохождению по линии $сМ'$. Пока длины $сМ$ и $сМ'$ поддерживаются равными и среды, проходимые обоими лучами, остаются идентичными, ускорение вращательного движения, создающее для двух изображений одну и ту же девиацию, не позволяет отличить одно от другого. Но помещение преломляющей среды на одном из направлений $сМ$ или $сМ'$, меняя совершенную симметрию системы, вследствие изменения скорости света на одном из двух путей должно создавать раздвоение $\alpha'\alpha''$ изображения α . Это действительно и происходит, когда перед зеркалом $М'$ помещают трубу $Т$, наполненную водой и заканчивающуюся на обоих концах параллельными стеклами. И все же, чтобы быть уверенным в успехе опыта и чтобы сделать его результаты более отчетливыми и строгими, необходимо соблюсти еще несколько предосторожностей.

Помещение на пути лучей трубы с водой создает возмущение, которое легко учесть, предполагая, что поверхность входа $Т$ действует на сходящийся пучок таким образом, что приближает все лучи к нормали и создает удлинение фокуса. Если в отсутствие трубы движущееся изображение должно было падать в точности на отражающую поверхность $М'$, то при установке трубы наблюдается искажение изображения в окуляре, поскольку оно имеет тенденцию образовываться за вогнутым зеркалом.

Для восстановления угла сходимости, необходимого для создания четкого изображения на $М'$, перед трубой помещают простую линзочку L с очень большим фокусным расстоянием, которое легко определить методом проб или путем расчета. Если сделать это, то при возвращении изображение имеет одинаковую четкость независимо от того, тем или иным путем оно образуется. Изображение меняется только по цвету и интенсивности: белое и яркое, когда свет все время идет через воздух, оно становится зеленым и темным при установке трубы с водой, и, если не прибегнуть к специальному приему, это различие в освещенности не позволит рассмотреть раздвоение, которое должно произойти с девиацией.

Назвав изображением в воздухе наложение ощущений, создаваемых быстро повторяющимися появлениями изображения, образованного после прохождения светом всего пути в воздухе, и назвав изображением в воде наложение ощущений от света, направленного по другому пути, я покажу, как их сделать отличными одно от другого во всех фазах эксперимента.

Заставим зеркало вращаться со скоростью большей, чем тридцать оборотов в секунду, и поэтому, приставив глаз к окуляру, получим непрерывное ощущение. Если закрыть зеркало $М'$, то будет видно только изображение в воздухе. Если, наоборот, перенести преграду на место перед зеркалом $М$, то будет видно только изображение в воде, и чтобы либо одно, либо другое было видно полностью, необходимо вогнутое зеркало, например $М'$, оставить открытым по всей высоте следа движущегося изображения на поверхности этого зеркала. Если надо уменьшить вы-

соту воспринимаемого изображения, необходимо только поставить перед зеркалом экран с щелью, высота которой должна быть меньше, чем длина следа. Воспринимаемое изображение уменьшится до высоты щели и будет иметь вид, показанный на рис. 93, е.

Покроем зеркало M экраном с прорезью, оставляя полностью открытым зеркало M' , и заставим подвижное зеркало вращаться достаточно быстро, чтобы изображения совместились, но еще без ощутимого смещения. Очевидно, что воспринимаемое изображение будет образовано наложением изображения в воде, сохранившего присущие ему высоту, интенсивность и цвет, и изображения в воздухе, более яркого и глубокого, причем они оба пересечены одним и тем же вертикальным прямым штрихом: результирующее изображение показано на рис. 93, ж.

Чтобы закончить установку, остается только поместить в фокусе окуляра плоское стеклышко с прочерченным вертикальным штрихом, который при медленном вращении зеркала или даже когда оно неподвижно совпадает с серединным штрихом — изображением мира. Теперь можно привести зеркало в движение с полной скоростью, и по мере того, как его вращение будет ускоряться, можно будет видеть, как изображение в целом смещается и дробится, как на рис. 93, з. Неподвижный штрих, принадлежащий окуляру, остается на месте, как точка отсчета, очень удобная для оценки абсолютных и относительных величин девиаций¹. (...)

В действительности девиация белого изображения всегда меньше, чем девиация видимых частей зеленого изображения, которые располагаются сверху и снизу от него. Если, например, принять в опыте следующие данные:

$$\begin{array}{ll} r = 3 \text{ м}; & l = 500 \text{ м}; \\ l = 4 \text{ м}; & P = 3 \text{ м}; \\ l' = 1,18 \text{ м} & Q = 1 \text{ м}. \end{array}$$

то для белого изображения смещение получается равным 0,375 мм, а для зеленого — 0,469 мм; их разность не может, очевидно, ускользнуть от наблюдения.

Но белое изображение — это изображение в воздухе, и его девиация дает меру длительности пребывания света между двумя зеркалами. Зеленое изображение — это изображение в воде, и его девиация также дает меру времени, соответствующую тому же проходимому расстоянию. Таким образом, мы приходим к решающему выводу, совершенно несовместимому с теорией истечения: *свет движется в воздухе быстрее, чем в воде*. (...)

et dans l'eau. «Annales de Chemie et de Physique», 1854, t. 41, p. 123—164.

Эта работа представляет собой докторскую диссертацию Фуко.

Далее следует описание деталей конструкции установки, которые представляют определенный интерес, поскольку для своего времени она явилась шедевром экспериментального искусства. Два вращающихся посеребрённых зеркала из стекла диаметром 14 мм были укреплены в кольце, по диаметру которого проходила ось миниатюрной турбинки, приводившейся в движение с помощью модели паровой машины Уатта (источником тепла служила спиртовка). Для улучшения условий вращения турбинки в конических подпятниках использовалась смазка жидким маслом, давление которой регулировалось. Особые предосторожности принимались для ликвидации вибраций в оси турбины.

Скорость вращения определялась путем сравнения частоты звука, издававшегося турбинкой с эталонным музыкальным звуком по методу биений.

Фуко предлагает также установить на пути луча с M' зеленый светофильтр, чтобы было легче различать изображения, полученные от зеркал M и M' .

Литература

- [1] Собрание сочинений Л. Фуко: *Recueil des Travaux scientifiques de Leon Foucault*. Т. 1—2. Paris, 1878.
- [2] Gilbert P. Léon Foucault, sa vie et son oeuvre scientifique. «Revue des questions scientifiques» (Paris), 1879, t. 5, p. 108—154, 516—563.
- [3] Верин А. Опыт Фуко. Л. — М., 1934, гл. 4.
- [4] Филонович С. Р. Самая большая скорость. М., 1983, гл. III.



И. Физо

1819—1896

О распространении света в движущихся телах

Вопрос о том, как влияет движение тел на распространение света, приобрел особую актуальность после открытия английским астрономом Дж. Брэдлеем явления абберации света (1727), которое было объяснено им как результат сложения скорости света, идущего от звезды, и скорости орбитального движения Земли. Однако в XVIII в. в отсутствие количественной теории света, опиравшейся на четкие представления о его природе, решение этого вопроса было невозможно.

В первое десятилетие XIX в., ознаменовавшееся первостепенными открытиями в оптике, французский физик Ф. Араго предпринял попытку с помощью эксперимента определить, влияет ли движение тел на распространение света. Поскольку коэффициент преломления света n и в волновой, и в корпускулярной теории связан со скоростью его распространения в веществе, в 1810 г. Араго исследовал преломление света, идущего от звезд, в призме, находящейся в покое относительно Земли, и сравнил полученный эффект с преломлением в той же призме света от земного источника, неподвижного относительно нее. Оказалось, движение Земли в пределах точности опыта не влияет на преломление света. Этот результат был доложен на заседании Академии наук, но объяснения ему дано не было. Спустя несколько лет Араго обратился к Френелю, одному из основоположников волновой теории света, с просьбой объяснить обнаруженный им опытный факт. Френель в письме, адресованном Араго (которое было вскоре опубликовано), изложил свое объяснение. Оно основывалось на представлении об эфире, пронизывающем все тела, плотность которого зависит от рода веществ: по Френелю, $n = \sqrt{\rho'/\rho}$, где ρ' и ρ — плотности эфира в веществе и вне его, соответственно ($\rho' > \rho$); упругость эфира полагалась везде одинаковой. Френель считал, что при движении тел ими увлекается только та часть эфира, которая составляет избыток плотности $\rho' - \rho$. Следствием этого предположения явился вывод выражения для так называемого коэффициента частичного увлечения эфира $\mu = 1 - 1/n^2$. Результирующая скорость света в теле относительно неподвижного наблюдателя равна

$$v' = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) u,$$

где u — скорость тела, т.е. распространение света происходит таким образом, как если бы эфир увлекался телом не полностью, а с эффективной скоростью μu .

Хотя теория Френеля хорошо объясняла результаты опытов Араго, ее приняли далеко не все физики: слишком необычными казались некоторые из ее основных положений. В этих условиях требовалась прямая проверка теории Френеля специальным экспериментом. Такая проверка была впервые проведена в 1851 г. французским оптиком Ипполитом Физо.

Арман Ипполит Луи Физо родился 23 сентября 1819 г. в Париже, в семье профессора медицины. Он получил хорошее начальное образование и, мечтая пойти по стопам отца, поступил на медицинский факультет университета. Однако из-за болезни ему пришлось прервать учебу и уехать из столицы; когда же он вернулся в Париж, то отказался от изучения медицины и обратился к физике.

В Коллеж де Франс он посещал лекции известного физика-экспериментатора В. Реньо, следил за лекциями в Политехнической школе. Однако наибольшее значение для Физо имела учеба в Парижской обсерватории под руководством Ф. Араго.

Первым серьезным достижением Физо в оптике были опыты, проведенные им совместно с Л. Фуко, в которых наблюдалась интерференция света при разности хода $\Delta \approx 7000\lambda$ (1846), что достигалось использованием монохроматического излучения. Содружество Физо и Фуко, однако, длилось недолго. Вскоре они порознь занялись проблемой измерения скорости света в земных условиях. Первым в этом творческом споре добился успеха Физо: в 1849 г. он провел ставший классическим опыт по определению скорости света с помощью зубчатого колеса. Тогда же Физо совместно с Е. Гунелем пытался измерить скорость «распространения электричества», но их эксперименты не увенчались успехом. Физо много экспериментировал и в других областях физики. Он, в частности, занимался исследованием теплового расширения тел, конструировал физические приборы.

Научные заслуги Физо получили широкое признание. Он был избран членом Академии наук Франции, членом Лондонского королевского общества, не раз удостоивался наград различных научных учреждений. В течение многих лет Физо был профессором Политехнической школы в Париже. Умер ученый 18 сентября 1896 г.

Еще до постановки опыта с зубчатым колесом, в 1848 г., Физо опубликовал теоретическую работу, в которой независимо от Х. Доплера сформулировал идею о зависимости частоты света, воспринимаемой наблюдателем, от относительного движения источника и наблюдателя. Интерес к оптике движущихся тел в 1851 г. привел Физо к проведению опытов по исследованию распространения света в движущейся воде, которые подтвердили формулу Френеля для μ . Над результатами этих опытов Физо размышлял многие годы (их подробное описание было опубликовано лишь в 1859 г.). Физическая интуиция подсказывала ученому, что, несмотря на подтверждение формулы Френеля, предположения, на которых основывался ее вывод, впоследствии

могут быть пересмотрены. История подтвердила предвидение Физо: его опыты рассматриваются теперь как важное подтверждение релятивистского правила сложения скоростей.

**О гипотезах относительно
светового эфира и об одном
эксперименте, который
по-видимому, показывает,
что движение тел меняет
скорость, с которой свет
распространяется внутри этих
тел**

Для расчета явления абберации света в рамках волновых представлений было предложено несколько теорий. Сначала Френель, а недавно Доплер, Стокс, Челлис и другие опубликовали работы на эту тему; однако незаметно, чтобы хоть одна из предложенных теорий была полностью принята физиками. В отсутствие определенных представлений о свойствах светоносного эфира и его взаимоотношений с весомой материей приходилось выдвигать гипотезы, и среди предложенных есть более или менее вероятные, но нет ни одной, которую можно рассматривать как доказанную.

Эти гипотезы можно свести к трем основным, соответствующим тому состоянию, в котором следует рассматривать эфир, существующий внутри прозрачных тел:

либо эфир связан и как бы прикреплен к молекулам тела и, следовательно, участвует в движениях, которые могут сообщаться этим телам;

либо эфир свободен и независим и не увлекается телами в их движениях;

либо, наконец, по третьему предположению, которое имеет отношение и к первому, и ко второму, свободной остается лишь часть эфира, а другая часть прикрепляется к молекулам тела, и только она и участвует в его движении.

Эта последняя гипотеза, которой мы обязаны Френелю, была предложена, чтобы удовлетворить закону абберации и объяснить знаменитый опыт Араго, посредством которого он показал, что движение Земли не влияет на преломление, испытываемое светом звезд в призме. Таким образом, эти два явления объясняются со значительной точностью; однако или потому, что концепция Френеля казалась слишком необычной, чтобы ее приняли без более прямых доказательств, или потому, что кажется возможным удовлетворить наблюдаемым явлениям с помощью какой-либо из двух гипотез, или, наконец, потому, как думали некоторые физики, что определенные следствия этой теории казались противоречащими эксперименту, несомненно, что гипотеза Френеля не принимается сегодня как доказанная истина и взаимо-

связь эфира и весомой материи все еще обычно считается очень неопределенной.

Следующие соображения привели меня к попытке поставить опыт, который, как мне казалось, должен был прояснить этот вопрос.

Можно заметить, что если тело во всех трех гипотезах предполагается движущимся, то скорость, с которой свет проходит через него, должна отличаться от той, с которой свет проходит через покоящееся тело, и для каждой гипотезы влияние движения на скорость света будет различным.

Так, если предположить, что эфир увлекается телом в его движении, то скорость света должна увеличиться на полную величину скорости тела, если считать луч направленным в сторону движения.

Если эфир остается свободным, то скорость света совершенно не меняется.

Наконец, если увлекается только часть эфира, то скорость света будет увеличена, но лишь на часть скорости тела, а не на ее полную величину, как в первой гипотезе. Этот вывод не столь очевиден, как два предыдущие, но Френель показал, что его можно подкрепить весьма вероятными механическими соображениями.

Таким образом, если предположить, что можно точно установить скорости света в покоящемся теле и в теле, находящемся в движении, то если скорость, соответствующая состоянию покоя, окажется вследствие движения увеличенной на полную скорость тела, то будет получено подтверждение первой гипотезы.

Если скорость одинакова в обоих случаях, будет удовлетворена вторая гипотеза.

Если скорость, соответствующая состоянию покоя, будет увеличена только на часть скорости тела, то результат будет в согласии с третьей гипотезой.

Справедливо, что свет распространяется со скоростью, столь большой по отношению к скоростям, которые мы можем сообщить телам, что изменение скорости, возможное для света, в общем случае слишком незначительно, чтобы быть наблюдаемым. Однако при предельно благоприятных условиях, мне кажется, возможно подвергнуть решающей проверке две среды, воздух и воду, которые по причине подвижности их частей легко могут быть приведены в движение с большими скоростями.

Мы обязаны Араго методом наблюдения, основанным на интерференции, который подходит для обнаружения малейших вариаций показателей преломления тел. С помощью нескольких весьма тонких наблюдений, таких, как обнаружение различия в преломлении, существующего между сухим и влажным воздухом, Араго и Френель доказали необыкновенную чувствительность этого метода.

Способ наблюдения основан на принципе, который, как мне

кажется, является единственным, позволяющим обнаружить изменения скорости, возникающие вследствие движения. Он состоит в создании интерференционных полос с помощью двух лучей света после их прохождения через параллельные трубки, в которых воздух или вода могут течь с большой скоростью в противоположных направлениях. Определенная мной специфическая цель потребовала ряда нововведений, которые я теперь перечислю.

Довольно большие трудности должны были встретиться в отношении интенсивности света. Свет должен был проходить сквозь стеклянные трубки с внутренним диаметром 5,3 мм вдоль их осей, а не у стенок. Вследствие этого щели должны были быть несены гораздо дальше друг от друга, чем обычно, и поэтому в точке, где возникают полосы, интенсивность света была бы слишком малой.

Этого неудобства можно избежать, помещая собирающую линзу за этими двумя щелями. В этом случае полосы наблюдаются в точке сходимости двух лучей, где интенсивность света весьма значительная.

Поскольку длина трубки была достаточно большой (1,487 м), существовало опасение, что какая-либо разница в температурах или давлениях в двух трубках породит значительное смещение полос, которое может полностью замаскировать смещение, вызванное движением. Эта трудность была преодолена, поскольку два луча возвращались в трубки с помощью зрительной трубы, в фокусе которой помещено зеркало. Таким образом, каждый луч должен был последовательно пройти две трубы, причем так, что лучи проходили в точности по одной и той же траектории, но в противоположных направлениях, вследствие чего эффекты, вызванные различием температур или давлений, неизбежно компенсировались. С помощью множества испытаний я убедился, что так действительно происходит полная компенсация, и при любом искусственно созданном изменении плотности или температуры среды в одной из трубок полосы остаются в точности в том же положении. При таком положении полосы должны наблюдаться в точке выхода каждого из лучей. Пучок отклоняется в сторону и направляется к зрительной трубе посредством отражения от полупрозрачного зеркала. После прохождения двойных путей в трубах лучи соединялись и создавали интерференцию, которая возникала за пройденным ими стеклом, где полосы и наблюдались через окуляр с делениями.

Удвоенный путь лучей имел и другое преимущество, состоявшее в увеличении возможного эффекта движения. Этот эффект должен быть в точности таким, как если бы трубы имели удвоенную длину.

Эта установка позволяла также использовать очень простой способ увеличения полос до размеров, которые они не должны были бы иметь при расстоянии (около 9 мм), разделявшим щели. Этот способ состоял в помещении перед одной из щелей

очень толстого стекла, наклоненного таким образом, чтобы вследствие преломления щели казались расположенными очень близко друг к другу. Тогда полосы должны стать настолько шире, как и в том случае, если бы щели в действительности сближались в той же мере, в какой они кажутся приближенными друг к другу. При этом не только заметно не уменьшается интенсивность, но ее даже можно значительно повысить, увеличивая размеры источника света. Варьируя наклон этого стекла, можно было по желанию менять ширину полос и придавать им подходящий размер, чтобы точно наблюдать их смещение.

Теперь я укажу расположение труб и аппарата, предназначенного для приведения воды в движение.

Две трубки на каждом из концов были закрыты кусками стекла, приклеенными с помощью шеллака и расположенными рядом почти перпендикулярно обычному направлению. Около каждого конца ответвление, образующее закругленное колено, создавало соединение с большей трубой, погруженной внутрь сосуда. Таким образом, имелось четыре сосуда, соединявшихся с четырьмя концами двух трубок.

С помощью соединительной трубки в один из сосудов, наполненный водой, можно было вводить сжатый воздух, заимствованный из резервуара воздушного насоса. Под действием давления вода поднималась в трубку, проходила по всей ее длине и попадала в противоположный сосуд. В него, в свою очередь, также мог подаваться сжатый воздух, и тогда жидкость возвращалась в первый сосуд, пробегая по трубе в обратном направлении. Так создавался поток воды, скорость которого доходила до 7 м/с. Один и тот же поток одновременно проходил по обоим трубкам, но в противоположных направлениях.

У наблюдателя под рукой имелись два крана, прикрепленные к резервуару с воздухом: если был открыт один из них, [определенное] движение устанавливалось сразу в двух трубках; если был открыт другой кран, направление движения было противоположным.

Резервуар, в котором воздух сжимался обычно до 2 атм, имел емкость 15 л; емкость сосудов составляла примерно 2 л; сосуды были разделены на равные объемы, и скорость воды рассчитывалась по длительности истечения $\frac{1}{2}$ л и площади сечения трубы.

Установка, представление о которой я только что попытался дать, применялась только для экспериментов с движущейся водой. С некоторыми модификациями она также подходит и для воздуха, однако опыты с движущимся воздухом были выполнены ранее с установкой, несколько отличной от данной, о которой я еще скажу ниже; и результаты были совершенно убедительными.

Я установил, что *движение воздуха не создает какого-либо ощутимого смещения полос*. Я вернусь далее к этому результату и рассмотрю его более подробно.

Для воды имелось отчетливое смещение.

Полосы смещались вправо, когда вода прогонялась от наблюдателя в трубке, расположенной справа от него, и к наблюдателю — в трубке, расположенной слева.

Полосы смещались влево, когда направление потока в каждой трубке было обратно по отношению к только что определенному.

Во время протекания воды полосы сохраняли хорошую отчетливость: они сдвигались параллельно самим себе без малейшего сомнения на величину, ощутимо пропорциональную скорости воды. При скорости 2 м/с смещение было уже хорошо заметным, при скорости от 4 до 7 м/с оно было вполне измеримым.

При ширине одной полосы в пять делений микрометра в этом эксперименте было установлено, что при скорости воды 7,059 м/с смещение вправо составляло 1,2 деления и смещение влево — 1,2 деления.

Сумма двух смещений равна 2,4 деления, т. е. составляет практически $\frac{1}{2}$ полосы.

Чтобы предупредить возможные возражения, я должен сказать, что система из двух трубок и сосудов, в которой происходило движение воды, была полностью изолирована от других частей установки. Эта предосторожность была предпринята, чтобы давление или удар воды не могли породить каких-либо случайных изгибов в определенных частях установки, движения которых могли бы повлиять на положение полос. Кроме того, я убедился, что движение, намеренно сообщенное системе из двух трубок, не оказывало влияния на положение полос.

После констатации существования самого явления я постарался определить величину изменения скорости со всей точностью, которой можно было достичь. Для устранения источника ошибок, который, как мне казалось, должен был оказывать влияние на результаты, я изменял размеры полос, скорость воды и даже характер делений микрометра так, чтобы наблюдать разные смещения, величину которых я не мог заранее предвидеть. Действительно, при измерении малых величин, когда считывание играет важную роль, следует особенно опасаться предубеждения. Я думаю, что полученные мною результаты должны быть полностью защищены от этого источника ошибок.

Чаще всего эксперименты проводились при скорости 7,059 м/с, в ряде случаев при скорости 6,515 м/с и иногда при 3,7 м/с. Все полученные результаты были приведены к максимальной скорости 7,059 м/с и отнесены к ширине одной полосы как к единице [см. табл.].

Удваивая среднее значение, получаем 0,46, что очень близко к половине одной полосы и представляет смещение, возникающее, когда направление потока воды в трубах меняется на обратное. Вместе с величинами, полученными при наблюдении, указаны их разности со средним значением, чтобы показать отклонения от среднего с той и с другой стороны. Видно, что в целом они составляют неощутимую часть ширины полосы; самое большое

отклонение не превосходит $1/13$ полос.

Одна трудность, которой нельзя было избежать, позволяет объяснить эти различия; максимальное смещение возникало только на довольно короткое время, и поэтому наблюдения должны были проводиться быстро. Если бы было возможно поддерживать ток воды с постоянной скоростью в течение более длительного времени, измерения были бы более точными, но представляется, что осуществить это невозможно без внесения значительных изменений в установку; а эти изменения задержали бы завершение работы до такого времени года, когда опыты, требующие использования солнечного света, стали бы почти невыполнимыми.

Теперь я сравню найденную величину смещения полос с той, которая следует из каждой из обсуждавшихся гипотез.

Прежде всего достаточно, чтобы вследствие движения воды полосы вообще смещались на какую-либо величину, чтобы исключить предположение о совершенно свободном эфире, не зависящем от движения тел.

Теперь следует рассчитать, каким должно быть смещение полос в предположении, что эфир связан с молекулами тела так, что участвует в их движении.

Пусть v — скорость света в пустоте, v' — скорость света в покоящейся воде, u — скорость воды, которая полагается параллельной направлению лучей.

Скорость света в воде, когда эта жидкость находится в движении, становится равной для двух лучей $v' - u$ и $v' + u$, причем относительно двух лучей движение воды происходит в разных направлениях.

Если обозначить через Δ разность хода, а через E длину столба воды, проходимого лучами, то с помощью принципов, доказываемых теорией интерференции, можно найти

$$\Delta = E \left(\frac{v}{v' - u} - \frac{v}{v' + u} \right)$$

или

$$\Delta = 2E \frac{u}{v} \left(\frac{v^2}{v'^2 - u^2} \right)$$

Смещение полос для средней скорости течения, равной 7,059 м/с	Разность между наблюдаемыми и средними значениями

0,200	—0,030
0,220	—0,010
0,240	+0,010
0,167	—0,063
0,171	—0,059
0,225	—0,005
0,247	+0,017
0,225	—0,005
0,214	—0,016
0,230	0,000
0,224	—0,006
0,247	+0,017
0,224	—0,006
0,307	+0,077
0,307	+0,077
0,256	+0,026
0,240	+0,010
0,240	+0,010
0,189	—0,041

Сумма 4,373

Среднее 0,23016

Поскольку u очень мала по отношению $v' \left(\frac{u}{v'} = \frac{1}{33\,000\,000} \right)$, это выражение можно без заметной ошибки заменить таким:

$$E \frac{u}{v} \frac{v^2}{v'^2}$$

Если $m = v/v'$ — показатель преломления воды, то

$$\Delta = 2E \frac{u}{v} m^2.$$

Поскольку каждый луч проходит трубку дважды, его путь составляет удвоенную длину реальных трубок. Если обозначить через L эту последнюю величину, которая равна 1,4875 м, то предыдущая формула принимает вид

$$\Delta = 4L \frac{u}{v} m^2.$$

Производя числовые расчеты, получаем $\Delta = 0,0002418$ мм. Такова разность хода, которая должна существовать между двумя лучами согласно этой гипотезе.

В действительности этот расчет проведен для пустоты, и чтобы найти значение Δ для воздуха, его необходимо разделить на коэффициент преломления этой среды. Но этот коэффициент столь мало отличается от единицы, что для простоты можно пренебречь данным преобразованием, не делая ошибки, равной единице последнего порядка.

Разделив эту величину на длину волны, получим смещение полос, выраженное в единицах их ширины. Действительно, при разности хода в 1, 2, 3, m длин волн система смещается на 1, 2, 3, m полос.

Для данной величины E длина волны $\lambda = 0,000526$ соответствует лучам, которые кажутся в наибольшей степени сохраняющими свою интенсивность, поскольку свет проходит не очень значительную толщу воды.

В итоге для смещения полос находим

$$\Delta/\lambda = 0,4597.$$

Следовательно, для подтверждения гипотезы о том, что эфир приводится в движение со скоростью, равной скорости воды, в описанном выше эксперименте необходимо наблюдать смещение в 0,46 полос.

Однако среднее из наблюдений дает 0,23 и, рассматривая значения, в наибольшей степени превосходящее среднее, можно видеть, что ни одно из них не приближается к числу 0,46. Я должен также добавить, что это число должно быть несколько больше вследствие небольшой ошибки в оценке скорости воды, смысл которой известен, как будет видно из дальнейшего, но исправить которую в теории невозможно. Очевидно, что эта гипотеза не согласуется с опытом.

Напротив, мы увидим, что третья гипотеза, которой мы обязаны Френелю, приводит к значению смещения, очень слабо отличающемуся от результата наблюдений.

Известно, что обычное явление преломления обусловлено тем, что свет распространяется внутри тел с меньшей скоростью, чем в пустоте. Френель принимал, что изменение скорости имеет место постольку, поскольку находящийся внутри тел эфир обладает большей плотностью, чем эфир в пустоте. А для двух сред, упругость которых одинакова и которые различаются лишь своими плотностями, квадраты скоростей распространения находятся в обратной пропорции с плотностями, т. е.

$$\frac{D'}{D} = \frac{v^2}{v'^2},$$

где D и D' — плотности эфира в пустоте и в теле, v и v' — соответствующие скорости распространения. Следовательно,

$$D' = D \frac{v^2}{v'^2}, \quad D' - D = D \frac{v^2 - v'^2}{v'^2}.$$

Последнее выражение дает избыток плотности внутреннего эфира.

Если тело приводится в движение, то принимают, что увлекается только часть внутреннего эфира и что эта часть и представляет избыток плотности по отношению к окружающему эфиру; значит, плотность этой движущейся части равна $D' - D$. Другая часть, которая остается неподвижной во время движения, имеет плотность, равную D .

Какой же теперь должна быть скорость распространения волн в среде, состоящей из части, находящейся в движении, и неподвижной части, если предположить для большей простоты, что тело движется в направлении распространения волны?

Френель полагает скорость, которую в этом случае приобретает центр тяжести системы, складывающейся со скоростью распространения волны.

Если u — скорость тела, то $u \left(\frac{D' - D}{D'} \right)$ — скорость центра тяжести системы и, согласно предыдущему, это выражение равно

$$u \left(\frac{v^2 - v'^2}{v'^2} \right).$$

Это величина, на которую должна возрасти скорость распространения волн.

Тогда, если v' — скорость распространения света, когда тело находилось в состоянии покоя, для движения тела получим

$$v' \pm u \left(\frac{v^2 - v'^2}{v'^2} \right).$$

Теперь с помощью этого выражения я рассчитаю смещение полос, которое должно наблюдаться в рассматриваемом эксперименте.

При использовании тех же обозначений, что и раньше, и с учетом того, что для каждого из лучей, которые должны интерферировать, скорость распространения в воде, находящейся в движении, имеет величину, выражаемую последней формулой, разность хода будет иметь вид

$$\Delta = E \left[\frac{v}{v' - u \left(\frac{v^2 - v'^2}{v'^2} \right)} - \frac{v}{v' + u \left(\frac{v^2 - v'^2}{v'^2} \right)} \right]$$

после преобразований находим

$$\Delta = 2E \frac{u}{v} \left\{ \frac{v^2 - v'^2}{v'^2 - u^2 (v^2 - v'^2)/v'^2} \right\}.$$

Это выражение можно упростить, учитывая, что u очень мало по отношению к v' ($\frac{u}{v'} = \frac{1}{33\,000\,000}$) и коэффициент при u^2 всегда много меньше единицы, что позволяет без ощутимой ошибки пренебречь членом с u^2 ; поскольку m — коэффициент преломления, а E — равно удвоенной длине L труб, получаем, наконец, приближенную формулу

$$\Delta = 4L \frac{u}{v} (m^2 - 1),$$

или, производя числовой расчет, находим $\Delta = 0,00010634$. Это разность хода, которую движение воды устанавливает между двумя интерферирующими лучами. Разделив ее на длину волны λ , получаем смещение полос $\Delta/\lambda = 0,2022$; наблюдение дает 0,23.

Эти два значения почти равны, и, кроме того, я покажу, что различие между наблюдением и расчетом с большой вероятностью объясняется ошибкой в оценке скорости воды; смысл этой ошибки легко понять, а о величине можно лишь по аналогии заключить, что она должна быть достаточно малой.

В действительности скорость воды в каждой трубке равна отношению объема воды, вытекающего из нее за 1 с, к площади сечения этой трубки. Таким способом получается средняя скорость воды, которая существовала бы, если бы движение струек жидкости было достаточно быстрым по всей ширине трубы, в центре и по краям. Анализ показывает, что это не так и что сопротивление, испытываемое жидкостью вдоль стенок, проявляющееся сильнее для соседних с ними слоев, стремится уменьшить их скорость относительно тех слоев, которые расположены ближе к центру. Отсюда следует, что в действительности для струек, неодинаково удаленных от стенок, скорости различаются и что скорость больше в центре, чем с края. При расчете получают промежуточное между двумя этими скоростями значение, и ближе к центру скорость на самом деле должна быть больше, чем средняя, а у стенок — меньше.

Однако щели, помещенные перед каждой трубкой для пропуска интерферирующих лучей, были расположены в середине

круглых концов трубок, так что лучи проходили через центральные зоны, для которых скорость воды должна превосходить среднюю скорость (каждая щель имела форму прямоугольника $3 \times 1,5$ мм, и ее площадь составляла $1/5$ сечения трубы).

Закон, которому подчиняются эти изменения скорости для движения воды в трубах, еще не определен, так что нельзя было ввести необходимую поправку. В то же время аналогия показывает, что ошибка, которая отсюда может происходить, не должна быть значительной. На практике этот закон был определен для течения воды в открытых каналах. В этом случае та же причина создает сходный эффект, и в середине канала вблизи поверхности воды наблюдается скорость, большая, чем средняя. Было найдено, что для ее значений, лежащих между 1 и 5 м/с, максимальная скорость получается при умножении средней скорости на некоторый коэффициент, который варьируется от 1,23 до 1,11, и аналогия позволяет предположить, что поправка, которую надо ввести, будет по величине того же порядка. (...)

Таким образом, смещение полос под влиянием движения воды и величина, на которую они смещаются, удовлетворительно объясняется теорией, предложенной Френелем. (...)

Успех этого эксперимента, мне кажется, должен повлечь за собой принятие гипотезы Френеля или по крайней мере закона, который он установил для выражения изменения скорости света вследствие движения тел. Хотя обнаружено, что закон является истинным, и это может быть очень сильным доводом в пользу гипотезы, для которой он — только следствие, возможно, концепция Френеля покажется настолько необычной и в некоторых отношениях столь трудно воспринимаемой, что потребуются еще и другие доказательства и углубленные исследования со стороны математиков, прежде чем она будет принята как выражение реального положения вещей.

Комментарий

Перевод с французского (с сокращениями) работы И. Физо выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur. «Annales de Chimie et de Physique», 1859, t. 57, p. 385.

Литература

- Собрание сочинений И. Физо не издавалось.
- [1] Picard E. Les théories de l'optique et l'oeuvre d'Hyppolyte Fizeau. Paris, 1924.
 - [2] Филонович С. Р. Самая большая скорость. М., 1983, гл. III.



Р. Клаузиус

1822—1888

О втором начале термодинамики и энтропии

Иdeen, сформулированные в 20-х годах XIX в. С. Карно относительно общего принципа действия тепловых машин, в середине XIX в. нашли свое развитие в работах ряда ученых, вследствие чего был сформулирован общий принцип, отражающий ход тепловых процессов, — второе начало термодинамики. Было дано несколько формулировок второго начала. Впоследствии выяснилось, что они эквивалентны. Одну из наиболее простых формулировок дал выдающийся немецкий физик Р. Клаузиус. Ему же принадлежит заслуга введения понятия энтропии, которое позволяет дать количественную формулировку второго начала термодинамики.

Рудольф Юлиус Эмануэль Клаузиус родился 2 января 1822 г. в г. Кеслине (ныне Кошалин, ПНР) в семье пастора. Начальное образование он получил в частной школе, основанной его отцом, затем учился в гимназии в Штеттине и после ее окончания поступил в Берлинский университет. В юности интересы Клаузиуса были весьма разносторонними, даже в университете параллельно с лекциями по физике и математике он посещал лекции по истории. Однако любовь к естественным наукам взяла верх.

Первые шаги как ученый Клаузиус сделал в Галле, куда он был направлен после окончания Берлинского университета и где в 1847 г. ему была присуждена степень доктора философии. По началу исследования Клаузиуса были посвящены проблемам оптики и механическим свойствам упругих тел. Переломным стал 1850 г., когда вышла в свет первая работа Клаузиуса по термодинамике, в которой, в частности, было дано обобщение уравнения, описывающего фазовые переходы пар — жидкость и жидкость — твердое тело (уравнение Клапейрона — Клаузиуса). Эта статья была замечена в научных кругах, и Клаузиуса пригласили на должность преподавателя в Королевскую артиллерийскую техническую школу в Берлине.

Здесь, а затем в Цюрихе где он преподавал в течение ряда лет в Политехникуме, Клаузиус продолжил разработку ос-

нов термодинамики. Определенный итог его исследованиям подвел двухтомник «Сочинения о механической теории тепла» (1864—1867). В нем освещены не только термодинамические исследования Клаузиуса, но и его значительный вклад в развитие кинетической теории газов. В этой области ученому принадлежит заслуга введения статистических методов и понятий (таких, как средняя длина свободного, метод средних величин), вычисления давления газа на стенки сосуда. Позднее (1870) в рамках статистических исследований Клаузиус доказал теорему вириала, которая связывает среднюю кинетическую энергию системы частиц, движущихся в ограниченной области пространства, со средним значением действующих на них сил.

В 1867 г. Клаузиус перешел в Вюрцбургский, а в 1869 г. — в Боннский университет, где он проработал до конца жизни. В Бонне им была разработана теория поляризации диэлектриков, на основе которой независимо от итальянского физика О. Моссо́ти вывел соотношение между диэлектрической проницаемостью и поляризуемостью диэлектрика (формула Клаузиуса — Моссо́ти). Следует отметить, что проблемы электричества интересовали Клаузиуса на протяжении всей жизни. Так, он первым дал теоретическое обоснование закона Джоуля — Ленца. Его увлечения электричеством и термодинамикой слились при разработке теории термоэлектричества (1853).

В конце жизни, в особенности после франко-прусской войны 1870 г., когда Клаузиус получил тяжелое ранение, его научная активность постепенно спадает. Много времени отнимали административные обязанности, связанные с должностью ректора Боннского университета, которую в это время занимал Клаузиус. Однако его авторитет в научных кругах был неизменно очень высок. Он был избран членом нескольких академий, в том числе Петербургской АН. Клаузиус умер 24 августа 1888 г.

Среди обилия конкретных результатов, полученных Клаузиусом в различных областях физики, своей фундаментальностью, конечно, выделяются его работы по термодинамике и среди них — формулировка второго начала термодинамики и введение понятия энтропии (термин предложен Клаузиусом) для характеристики обратимых и необратимых процессов. Энтропия вошла в число основных понятий современной физики.

Механическая теория тепла

Глава I

Первое начало механической теории тепла или принцип эквивалентности теплоты и работы

§ 1. Исходный пункт теории. В прежнее время было почти всеобщим воззрение, что теплота представляет собой особое вещество, которое в большем или меньшем количестве находятся во всех телах, чем и обуславливается большая или меньшая высо-

та их температуры. Предполагалось, что все тела выделяют это вещество, которое затем с огромной скоростью пролетает через пустое пространство и даже через области, заполненные весомой массой, образуя, таким образом, лучистую теплоту. Однако в новейшее время проложил себе путь взгляд на теплоту как некоторый род движения. При этом находящаяся в телах теплота, обуславливающая их температуру, рассматривается как некоторое движение весоных атомов, в котором может принимать участие также и находящийся в телах эфир. Лучистая теплота рассматривается как колебательное движение эфира. <...>

Итак, в нашем изложении мы будем исходить из предположения, что теплота представляет собой движение мельчайших частиц вещества и эфира и что количество теплоты является мерой живой силы этого движения. Мы применим лишь к теплоте закон эквивалентности между живой силой и работой, справедливый для любого движения, и полученное отсюда предложение будем рассматривать как первое начало механической теории тепла. <...>

§ 3. Формулировка первого начала. Установив вышеуказанным способом смысл понятия о положительном значении работы¹, мы можем теперь высказать следующим образом первое начало механической теории тепла (которое выводится из закона эквивалентности между живой силой и работой), именуемое *принципом эквивалентности между теплотой и работой*.

Во всех случаях, когда из теплоты появляется работа, тратится пропорциональное полученной работе количество теплоты, и, наоборот, при затрате той же работы получается то же количество теплоты.

Когда затрачивается теплота и вместо нее появляется работа, то можно сказать, что теплота превратилась в работу, и, наоборот, когда затрачивается работа и вместо нее появляется теплота, можно сказать, что работа превратилась в теплоту. Пользуясь этим способом выражения, можно предыдущему предложению придать следующий вид: *возможно превратить работу в теплоту и, наоборот, теплоту в работу, причем обе эти величины всегда пропорциональны друг другу*.

Это положение подтверждается рядом известных уже ранее явлений, а также многими и разнообразными опытами, произведенными в новейшее время. Поэтому, если даже отвлечься от того обстоятельства, что оно является частным случаем вышеприведенного механического закона², его следует принять как принцип, вытекающий из опыта и наблюдения. <...>

§ 6. Первое основное уравнение. Пусть дано некоторое тело, состояние которого в отношении температуры, объема и т. д. предполагается известным. Если сообщить этому телу бесконечно малое количество теплоты dQ , то спрашивается, какое действие оно произведет и что из него получится.

Это сообщенное телу количество теплоты может частично пойти на то, чтобы увеличить уже имеющуюся в теле теплоту.

частично же, если тело в результате поглощения теплоты испытывает изменение состояния, связанное с преодолением сил, превратится в совершившуюся при этом работу. Если обозначить заключающуюся в теле теплоту через H , а бесконечно малое приращение этой величины — через dH и для бесконечно малой работы выбрать знак dL , то можно составить следующее равенство:

$$dQ = dH + dL. \quad (I)$$

Силы, участвующие в совершении работы, можно разделить на два класса: во-первых, на те, с которыми атомы тела действуют друг на друга и которые поэтому коренятся в природе самого тела, и, во-вторых, на протекающие от посторонних воздействий, испытываемых телом. В соответствии с этим двумя классами сил я разделил всю совершаемую теплотой работу на внутреннюю и внешнюю работу³. Если мы обозначим эти величины соответственно dJ и dW , то должны будем положить

$$dL = dJ + dW. \quad (I)$$

Тогда

$$dQ = dH + dJ + dW. \quad (II)$$

$\langle \dots \rangle$

§ 8. Энергия тела. Так как действительно заключающаяся в теле теплота и внутренняя работа играют совершенно одинаковую роль в упомянутом выше весьма важном соотношении и так как вследствие незнания внутренних сил тел нам обычно известна лишь сумма этих двух величин, а не их значения в отдельности, то я уже в своей первой работе⁴, посвященной теплоте и появившейся в 1850 г., охватил обе эти величины одним знаком. То же самое мы сделаем и здесь, положив

$$U = H + J, \quad (I)$$

и уравнение (II) переходит в

$$dQ = dU + dW. \quad (III)$$

Функция U , выведенная мною в учении о теплоте в указанной работе, была затем принята и другими авторами, писавшими о механической теории тепла; но так как то определение, которое я ей дал, а именно, что она обнимает (если исходить из какого-нибудь начального состояния) как приобретенную телом действительно заключенную в нем теплоту, так и затраченную на внутреннюю работу теплоту, несколько длинно, то с разных сторон предлагают ввести более короткие обозначения.

Томсон в своем мемуаре (1851)⁵ назвал эту функцию механической энергией тела в данном состоянии, а Кирхгоф⁶ употреблял название «функция действия». Наконец, Цейнер в своей работе «Основы механической теории тепла», появившейся в 1860 г., назвал помноженную на термический эквивалент работы величину U *внутренней теплотой тела*.

Что касается последнего названия, то мне пришлось заметить уже в 1864 г., что оно мне кажется не вполне отвечающим зна-

чению величины U , так как только часть этой величины представляет действительно заключающуюся в теле теплоту, в то время как остальная ее часть относится к теплоте, которая тратится на внутреннюю работу и, следовательно, не существует больше как теплота. Во втором издании своей книги, появившемся в 1866 г., Цейнер ввел некоторое изменение, назвав на этот раз величину U *внутренней работой тела*. Я должен, однако, сознаться, что могу одобрить это название так же мало, как и первое, ибо оно мне кажется слишком ограниченным, но на этот раз по другим причинам.

Что касается двух других названий, то особенно подходящим мне представляется употребленное Томсоном слово *енергу*, ибо величина, о которой здесь идет речь, вполне соответствует величине, обозначаемой этим именем в механике. Я присоединяюсь к этому способу обозначения и буду в дальнейшем называть величину U энергией тела. (...)

Глава III
Второе начало механической теории тепла

§ 5. Новый принцип, относящийся к теплоте. Различные соображения, касающиеся природы и поведения теплоты, привели меня к убеждению, что проявляющееся при теплопроводности и обыкновенном излучении тепла стремление теплоты переходить от более теплых тел к более холодным, выравнивая таким образом существующие разницы температур, связано так тесно с самой ее сущностью, что оно должно иметь силу при всех обстоятельствах. Поэтому я выдвинул в качестве принципа предложение: *теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более тепловому*.

Появляющиеся здесь слова «сама собой» требуют, чтобы быть вполне понятными, еще объяснения, которое дано мной в различных местах моих работ. Прежде всего они должны выражать, что теплота никогда не может накапливаться с помощью теплопроводности или излучения в более теплом теле за счет более холодного. При этом все то, что в этом отношении было известно об излучении уже раньше, должно быть распространено также и на те случаи, в которых вследствие преломления или отражения направление лучей как-нибудь изменяется и этим достигается известная концентрация последних. Далее, наш принцип должен относиться и к таким процессам, которые составлены из многих разнообразных явлений, как, например, круговой процесс описанного выше рода. С помощью такого процесса теплота, правда, может (как мы это видели при обращении вышеприведенного кругового процесса ¹⁾) перейти от более холодного тела к более тепловому. Но наш принцип утверждает, что тогда одновременно с этим переходом теплоты от более холодного к более тепловому телу должен происходить и противоположный переход теплоты от более теплого к более холодному телу либо должно

произойти какое-нибудь другое изменение, обладающее той особенностью, что оно не может быть обращено без того, чтобы не вызвать со своей стороны, опосредованно или непосредственно, такой противоположный переход теплоты. Этот одновременно происходящий противоположный переход теплоты или другое изменение, которое имеет следствием такой противоположный переход теплоты, должны рассматриваться как компенсация перехода теплоты от более холодного тела к более теплему. Пользуясь этим понятием, можно слова «сама собой» заменить словами «без компенсации» и высказать вышеприведенный принцип следующим образом: *переход теплоты от более холодного тела к более теплему не может происходить без компенсации.*

Это предложение, выставленное мной в качестве принципа, встретило много возражений, и мне пришлось его неоднократно защищать, причем мне всегда удавалось доказать, что возражения происходили от того, что явления, в которых усматривался некомпенсированный переход от более холодного тела к более теплему, неправильно понимались. (...)

§ 9. Круговые процессы, в которых поглощение теплоты и изменение температуры происходят одновременно. Мы должны, наконец, еще попытаться исследовать аналогичным образом также и такие круговые процессы, которые представляются фигурами, состоящими не только из изотермических и изоэнтропических кривых⁸.

Это можно сделать с помощью следующих соображений. Пусть точка a (рис. 94) обозначает какое-нибудь состояние изменяющегося тела, pq — дуга изотермической кривой, проходящая через a , rs — дуга изоэнтропической кривой, проходящая через a . Если теперь тело претерпевает какое-нибудь изменение, представляемое какой-нибудь другой кривой давления, например bc или de , при котором происходит одновременно поглощение теплоты и изменение температуры, то такое изменение мы можем себе представить замененным большим числом следующих одно за другим изменений, в которых попеременно происходит то изменение температуры без поглощения теплоты, то поглощение теплоты без изменения температуры.

Этот ряд следующих друг за другом изменений представляется ломаной линией, состоящей из кусков изотермических и изоэнтропических кривых, как это изображено на рис. 95. Ломаная линия тем ближе к линии, изменяющей непрерывно свое направление, чем меньше куски, из которых она состоит, и если эти куски бесконечно малы, то она подходит к ней бесконечно близко. И если мы заменим изменение, представляемое линией, направление которой меняется непрерывно, бесконечно большим числом сменяющих друг друга изменений различной природы, которые изображаются ломаной линией, то это может привести лишь к бесконечно малому различию по отношению к поглощенным количествам теплоты и температурам в обоих случаях.

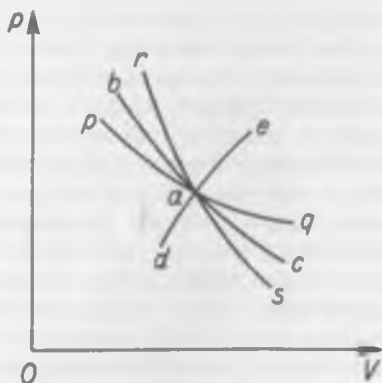


Рис. 94

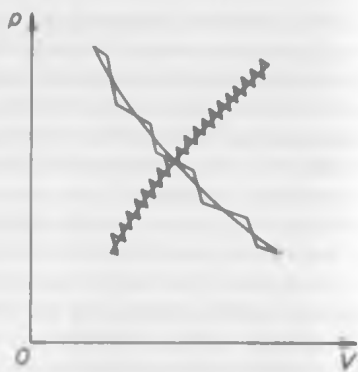


Рис. 95

Пусть теперь подлежит рассмотрению целый круговой процесс, в котором поглощение теплоты происходит одновременно с изменением температуры и который может быть представлен графически кривыми произвольного вида или даже одной только замкнутой и непрерывно меняющей свое направление кривой [рис. 96].

Представим себе, что ограниченная площадь, представляющая внешнюю работу, разбита на бесконечно узкие полосы изэнтропическими кривыми, изображенными на рисунке пунктиром. Вообразим, что эти кривые соединены вверху и внизу бесконечно малыми кусками изотермических кривых, пересекающих данную кривую, так что мы получаем вдоль всей данной кривой ломаную линию, которая повсюду к ней бесконечно близка. Круговой процесс, представленный этой ломаной линией, можно, согласно предыдущему, поставить на место кругового процесса, показанного кривой к непрерывно меняющимся направлением, и это не приведет к заметному изменению поглощенных количеств теплоты и температур, при которых происходит поглощение. Далее, описываемый ломаной линией круговой процесс можно опять заменить бесконечно большим числом простых круговых процессов, представленных бесконечно узкими четырехугольниками, из которых каждый состоит из двух рядом лежащих изэнтропических кривых и двух бесконечно малых кусков изотермических кривых.

Если теперь составить для каждого из этих последних круговых процессов уравнение вида (11)⁹ (оба количества теплоты здесь бесконечно малы, и их можно поэтому представить как дифференциалы от Q) и затем сложить все эти уравнения, то получится уравнение того же вида, что и (14)¹⁰, только место знака суммирования займет знак интеграла, а именно:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0. \quad (V)$$

Это уравнение, которое я впервые опубликовал в 1854 г.¹¹, дает весьма удобное выражение второго начала механической теории теплоты, поскольку оно относится к обратимым круговым процессам. Смысл его может быть выражен следующим образом.

Если в некотором обратимом круговом процессе мы разделим каждый поглощаемый изменяющимся телом элемент (положительный или отрицательный) количества теплоты на абсолютную

температуру, при которой происходит поглощение, и полученное таким образом дифференциальное выражение проинтегрируем для всего кругового процесса, то значение интеграла равно нулю. Если интеграл

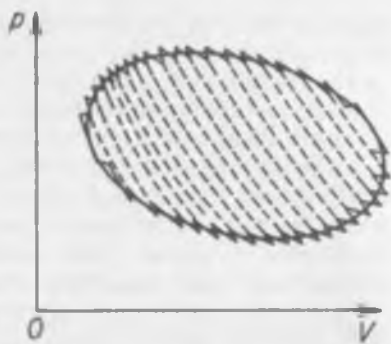


Рис. 96

$$\int \frac{dQ}{T}.$$

относящийся к любым последовательным изменениям тела, равен нулю каждый раз, когда тело вновь возвращается в свое начальное состояние, то стоящее под знаком интеграла выражение $\frac{dQ}{T}$ должно быть полным дифференциалом некоторой величины, зависящей только от данного состояния тела, а не от пути, по которому тело в это состояние пришло. Если мы обозначим эту величину S , то

$$\frac{dQ}{T} = dS,$$

или

$$dQ = TdS. \quad (VI)$$

Это уравнение дает еще одно выражение второго начала механической теории теплоты, очень удобное во многих исследованиях.

Глава IV

Изменная форма второго начала или принцип эквивалентности превращений

§ 7. Температура рассматриваемых количеств теплоты и энтропия. В предыдущем выводе уравнения (VII)¹² температуры, при которых передавались рассматриваемые количества теплоты, соответствовали температурам резервуаров тепла, откуда они получались или куда они передавались. Если, однако, рассмотреть круговой процесс, заключающийся в том, что некоторое тело

проходит через ряд изменений состояния и в конце концов вновь возвращается в свое начальное состояние, то это изменяющееся тело (если оно приведено в соприкосновение с резервуаром тепла для осуществления отдачи или поглощения теплоты) должно иметь ту же температуру, что и резервуар тепла. Только в этом случае теплота может так же легко переходить от изменяющегося тела к резервуару тепла, как и в обратном направлении, а для обратимости кругового процесса это непременно требуется. Правда, это условие не выполняется с абсолютной точностью, так как при совершенно одинаковой температуре вообще не может происходить никакой переход теплоты. Во всяком случае можно считать, что это условие выполняется настолько, что в вычислениях можно пренебречь небольшими разностями температур, имеющимися в наличии.

В этом случае безразлично, какой температуре положить равной температуру перехода количества теплоты: температуре ли резервуара тепла или же температуре, которую в данный момент имеет изменяющееся тело, поскольку обе эти температуры совпадают. Но если мы уже выбрали вторую возможность и установили, что при составлении уравнения (VII) нужно каждому элементу dQ относить именно те температуры, которую изменяющееся тело имеет в момент поглощения этого элемента, то для резервуара тепла можно приписать и любые другие темпе-

ратуры, не изменяя при этом выражения $\int \frac{dQ}{T}$. Допустив, что рассматриваемые температуры имеют именно такое значение, можно считать уравнение (VII) справедливым, не заботясь о том, откуда изменяющееся тело получает поглощаемую им теплоту или куда направляется отдаваемая им теплота, лишь бы только процесс был обратимым.

Стоящее под знаком интеграла выражение $\frac{dQ}{T}$, если его понимать в указанном смысле, является дифференциалом некоторой связанной с состоянием тела величины, и притом такой, которая полностью определена, если известно состояние тела в рассматриваемый момент хотя ничего не было известно о пути, по которому тело в это состояние прошло. Только в этом случае интеграл может быть равен нулю всегда независимо от того, через какие изменения прошло тело, возвращаясь к начальному состоянию.

Мне пришлось уже в другом месте¹³, после введения некоторого расширения принципа эквивалентности превращений, предложить называть эту величину энтропией, от греческого слова *τροπή* — превращение.

Полное объяснение этого названия и доказательство, что оно правильно выражает значение рассматриваемой величины, могут быть даны только позднее, когда будет обсуждено указанное выше расширение принципа эквивалентности превращений.

Если мы обозначим энтропию тела через S , то можем положить

$$\frac{dQ}{T} = dS^{14},$$

или

$$dQ = TdS. \quad (VIII)$$

Комментарий

Перевод с немецкого отрывков из книги Клаузиуса выполнен В. Н. Фришманом. Отрывки воспроизводятся по изданию: Второе начало термодинамики. Сб. М. — Л., 1934. В оригинале книга Клаузиуса называется «Die mechanische Wärmttheorie».

Перевод выполнен с издания 1887 г.

- ¹ Клаузиус ранее условился считать работу положительной, если она совершена против внешней силы.
- ² Имеется в виду закон сохранения механической энергии, с современной точки зрения не имеющий всеобщего характера.
- ³ Это разделение, предложенное Клаузиусом, не прижилось в физике. Отрывки из § 8 приведены здесь для того, чтобы показать, насколько сложен был процесс выработки основных понятий и терминологии термодинамики.
- ⁴ Эта работа называется «О движущей силе тепла и о законах, которые из нее можно вывести для учения о теплоте».
- ⁵ Работа Томсона называется «О динамической теории теплоты: о количестве механической энергии, содержащейся в жидкости, которая находится в различных состояниях по отношению к температуре и плотности».
- ⁶ Речь идет о работе Кирхгофа «Замечание о давлении водяного пара вблизи точки плавления льда».
- ⁷ Речь идет о дополнении к работе «О применении принципа эквивалентности превращений ко внутренней работе», которое озаглавлено «О некоторых названиях», опубликованном в 1864 г. в первом томе сборника работ Клаузиуса по механической теории теплоты.
- ⁸ В § 1 главы III Клаузиус рассмотрел «круговой процесс особого рода» — цикл Карно.
- ⁹ Уравнение (II), полученное в § 7 этой главы, имеет вид

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0,$$

где Q_1 — поглощенное при температуре T_1 , а Q_2 — отданное при температуре T_2 количество теплоты в цикле Карно.

- ¹⁰ Уравнение (14) из § 8 для кругового процесса имеет вид

$$\sum \frac{Q}{T} = 0.$$

- ¹¹ В работе «Об одной видоизмененной форме второго начала механической теории теплоты».
- ¹² Уравнение (VII) из § 6 этой главы, полученное для обратного процесса, имеет вид $\int \frac{dQ}{T} = 0$, где T — некоторая функция температуры, независимая от рода процесса, с помощью которого совершаются превращения.
- ¹³ В работе «О различных удобных для применения формах основных уравнений механической теории теплоты».
- ¹⁴ Уже в следующем § 8 «Температурная функция T » Клаузиус показывает, что $T = T_{\text{const}}$, и отмечает, что, поскольку безразлично, какое значение будет приписано постоянному множителю, его удобно выбрать равным единице, т. е. положить $T = T$. После такого соглашения выражение для дифференциала энтропии при обратимом процессе принимает ставший впоследствии традиционным вид $dS = dQ/T$.

Литература

- [1] Собрание сочинений Р. Клаузиуса:
Clausius R. Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie. Bd. 1—3. Braunschweig, 1879—1891.
- [2] Brush S. G. The kind of motion we call heat. Vols. 1—2. N. Y., 1976 (vol. 1, ch. 4, p. 160—182).
- [3] Кошманов В. В. Карно, Клапейрон, Клаузиус. М., 1985.



Г. Кирхгоф

1824—1887



Р. Бунзен

1811—1899

О спектральном анализе О законе теплового излучения

Создание метода спектрального анализа представляет собой пример открытия, явившегося результатом длительной подготовительной работы многих ученых. Действительно, еще в оптических экспериментальных установках Ньютона можно найти основные элементы спектроскопа. Многие ученые XIX в. наблюдали так называемые «фраунгоферовы» линии в спектре Солнца. Наконец, идея о качественном спектральном анализе высказывалась английскими учеными Дж. Гершелем и У.-Г. Ф. Тальботом. Однако заслуга приведения в систему выполненных ранее наблюдений и строгого обоснования нового метода анализа вещества принадлежит двум немецким ученым: физику Г. Кирхгофу и химику Р. Бунзену. Особое значение для развития физики имело и то обстоятельство, что работа над теоретическим обоснованием спектрального анализа привела Г. Кирхгофа к открытию важнейшего закона теплового излучения, связавшего два раздела физики: оптику и термодинамику.

Роберт Вильгельм Эберхард Бунзен родился 31 марта 1811 г. в Геттингене в семье главного библиотекаря, профессора лингвистики университета. Он получил высшее образование в университете родного города, где изучал химию, минералогию, физику и математику. Хотя с первых лет учебы в университете Бунзен проявлял живой интерес к химии, он защитил докторскую диссертацию по физике (1830).

После успешной защиты диссертации Бунзен получил возможность поехать за границу для завершения образования. Во время этой поездки он познакомился со многими известными учеными, в том числе Ж. Гей-Люсаком и В. Реньо. Вернувшись на родину, Бунзен стал приват-доцентом Геттингенского университета, затем преподавал в Касселе, Марбурге, Бреслау. Хотя в Бреслау он проработал недолго, именно там он познакомился

и подружился с молодым физиком Кирхгофом, своим будущим коллегой и соавтором. Наконец в 1855 г. Бунзен перешел в Гейдельбергский университет, с которым оказалась связанной вся его дальнейшая деятельность. В Гейдельберге он на протяжении семидесяти четырех (!) семестров читал курс общей экспериментальной химии.

Хотя в начале своей научной карьеры Бунзен занимался органической химией, его основные исследования связаны с неорганической химией.

Широкую известность Бунзен получил как изобретатель научных приборов. Он усовершенствовал ледяной и паровой калориметры, изобрел гальванический элемент нового типа (теперь носящий его имя), разработал специальную газовую горелку, дававшую высокотемпературное и практически не светящееся пламя, и другие приборы. Особенно много Бунзен работал над совершенствованием методов анализа газов. Достижения Бунзена в этой области были обобщены в ставшей классической монографии «Методы газометрии» (1857).

Бунзен не ограничивался исследованиями в области химии. В 1846 г. он принял участие в экспедиции в Исландию, где изучал продукты извержения вулкана Гекла и гейзеры. Он внес вклад в медицину, открыл противоядие (водную окись железа) при отравлении мышьяком. В сотрудничестве с английским химиком Г. Роско Бунзен исследовал фотохимические процессы.

В 1856 г. Бунзен начал работать над методом анализа газов, основанным на наблюдении окраски пламени. Когда он рассказал о своих изысканиях Г. Кирхгофу, к тому времени уже работавшему в Гейдельберге, то Кирхгоф заметил, что метод анализа можно сделать более информативным, если наблюдать не просто окраску пламени, а спектр его излучения. Совместная разработка этой идеи привлекла к созданию спектрального анализа. С помощью нового метода Бунзен и Кирхгоф открыли в 1860 г. цезий, а в 1861 г. — рубидий. Вслед за ними спектральный анализ стали применять и другие ученые, вследствие чего на протяжении последующих тридцати лет были открыты еще пять новых элементов.

Научные исследования Бунзена получили высокую оценку. Он был избран членом-корреспондентом Парижской Академии наук, иностранным членом Лондонского Королевского общества, был удостоен медали Копли, а также специальной награды за содействие в развитии промышленности.

Умер Бунзен 16 августа 1899 г.

Густав Роберт Кирхгоф родился 12 марта 1824 г. в Кенигсберге в семье юриста. Окончив гимназию, он поступил в Кенигсбергский университет, где учился у таких известных ученых, как, например, Ф. Бессель. Особенно сильное влияние на формирование Кирхгофа как ученого оказал Ф. Нейман. После окончания университета в 1847 г. Кирхгоф преподавал

сначала в Берлине, а затем в Бреслау. В 1854 г. по совету Бунзена Кирхгофа приглашают в Гейдельбергский университет, с которым связаны многие годы его творческой жизни, не богатой внешними событиями. Лишь безвременная смерть жены, оставившей ему четверых детей, да тяжелая болезнь, из-за которой он потерял подвижность, нарушили размеренный ход его жизни. Л. Больцман писал об этом так: «В жизни Кирхгофа не было ничего выдающегося, что соответствовало бы необычности его гения. Его жизнь была обычной жизнью немецкого профессора университета. Великие события происходили исключительно в его голове.»

Научную работу Кирхгоф начал, еще будучи студентом. В 1845—1847 гг. он подготовил важные исследования об электрических цепях. И в дальнейшем Кирхгоф много занимался исследованиями в области электричества. В 1849 г. он выдвинул идею о том, что напряжение в гальванических цепях идентично со статическим потенциалом. На основе этой идеи он вывел знаменитые «правила Кирхгофа», которые применяются для расчета электрических цепей. В 1857 г. ученый опубликовал статью о распространении переменных токов по проводам, некоторые результаты которой явились предвосхищением следствий теории электромагнитного поля Максвелла.

Однако Кирхгоф не ограничивался изучением электромагнетизма. Значителен его вклад в обобщение теории дифракции Френеля. Много занимался ученый теорией деформаций и равновесия упругих тел. Его лекции по механике, в которых тщательно рассмотрены многие важнейшие вопросы этого раздела науки, считаются классическими. Ряд работ Кирхгофа посвящен термодинамике растворов.

Разнообразие исследовательских интересов Кирхгофа в области теории сочеталось с пристальным интересом к физическому эксперименту. Кирхгоф был классическим представителем механицизма — он считал задачей физики объяснение всех природных явлений на основе законов механики.

Кирхгоф был прекрасным преподавателем. На протяжении многих лет его лекции сначала в Гейдельберге, а с 1875 г. в Берлине пользовались большой популярностью. Он организовал специальный семинар-практикум, где студенты могли познакомиться с классическими экспериментальными методами и обсудить их. Многие ученики Кирхгофа впоследствии стали известными учеными и среди них К. Пирсон, Ф. Клейн, А. Шустер, М. Планк. Своим учителем считал Кирхгофа А. Г. Столетов.

Исследования Кирхгофа получили всеобщее признание. Он являлся действительным членом Прусской Академии наук и членом-корреспондентом Парижской и Петербургской академий наук. За создание спектрального анализа он (вместе с Бунзеном) был награжден медалью Дэви. Ученый умер 17 октября 1887 г.

Как уже говорилось выше, началом работ Кирхгофа по теории теплового излучения послужили исследования спектров. Еще

до начала совместной работы Бунзена и Кирхгофа несколько ученых (Д. Брюстер, Л. Фуко, Дж. Г. Стокс) обратили внимание на близость положения в спектре Солнца темных (фраунгоферовых) *D*-линий и линий испускания в спектре натрия. Однако достаточно глубоко связь между линиями испускания и поглощения до Кирхгофа никто не исследовал. Он же в октябре 1859 г. обнаружил интересное явление — обращение линий испускания в спектре натрия при пропускании через пламя солнечного света различной интенсивности. При пропускании через пламя ослабленного солнечного света линии в спектре натрия становились ярче. Когда же через пламя с парами натрия пропускался неослабленный свет Солнца, то на месте светлых линий испускания возникали отчетливые темные линии. Это наблюдение и побудило Кирхгофа заняться анализом связи между процессами излучения и поглощения. В октябре 1859 г. он доложил об открытии закона теплового излучения на заседании Прусской Академии наук.

В 1862 г. Кирхгоф ввел понятие «абсолютно черное тело» и предложил его модель (полость с небольшим отверстием). С этого времени до начала XX в. проблема излучения черного тела рассматривалась как одна из наиболее актуальных в физике. Ее разработка в конечном счете привела к созданию квантовой теории излучения.

Здесь воспроизводятся из статьи Бунзена и Кирхгофа о спектральном анализе и статья Кирхгофа по теории теплового излучения, о которой Больцман писал: «Кто сомневается, что могут быть художественно прекрасными математические произведения, пусть тот прочтет... статью о поглощении и испускании».

Р. Бунзен, Г. Кирхгоф

Химический анализ посредством наблюдений спектров

СТАТЬЯ ПЕРВАЯ

Известно что многие вещества, внесенные в пламя имеют свойство вызывать в спектре последнего определенные светлые линии. На этих линиях может быть основан метод качественного анализа, который значительно расширяет область химических реакций и приводит к решению задач, которые до сих пор даже не ставились. Здесь мы ограничимся прежде всего тем, что разовьем этот метод для щелочных и щелочно-земельных металлов, а также на ряде примеров разъясим его достоинства.

Упомянутые линии проявляются тем отчетливее, чем выше температура и чем меньше собственная светимость пламени. Предложенная одним из нас газовая горелка¹ создает пламя очень высокой температуры и очень малой светимости. Такое пла-

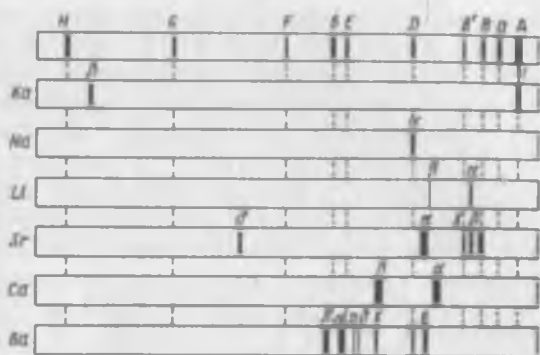


Рис. 97

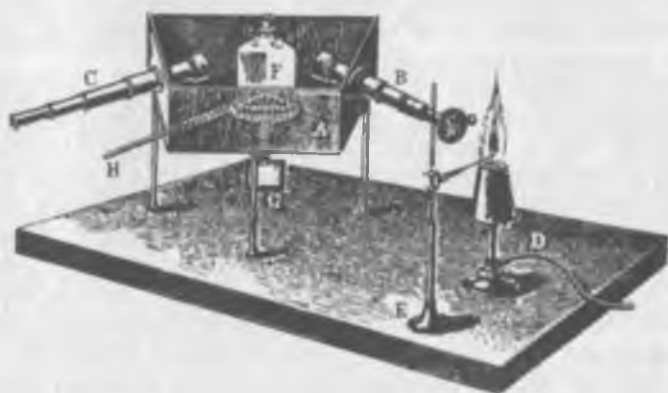


Рис. 98

мя лучше всего пригодно для опытов с веществами, дающими светлые линии.

На рис. 97 представлены спектры, которые получаются от пламени газовой горелки, если в нем испарять возможно более чистые хлорные соединения калия, натрия, лития, стронция, кальция, бария. Чтобы облегчить распознавание, тут же приведен солнечный спектр. <...>

На рис. 98 изображен прибор, служивший нам большей частью при наблюдении спектров. Зачерненный изнутри ящик А имеет форму трапеции и покоится на трех ножках; боковые его стенки, угол между которыми составляет 58° , несут две зрительные трубы В и С. Окулярные линзы первой удалены и заменены пластиной, на которой находится образованная двумя латунными лезвиями щель, расположенная в фокусе линзы-объектива. Перед щелью стоит горелка D так, что ее пламя находится на оси трубы В. Несколько ниже того места, где ось как бы проходит через пламя, находится согнутый в маленькую петлю конец очень тонкой платиновой проволоки, поддерживаемой подставкой Е. На этой петле расплавляется капля исследуемого пред-

варительно обезвоженного хлористого соединения. Между объективами зрительных труб *B* и *C* находится полая призма *F* с преломляющим углом 60° , наполненная сероуглеродом. Призма покоится на латунной пластине, способной поворачиваться вокруг вертикальной оси. Эта ось имеет на своем нижнем конце зеркало *G* и над ним рукоятку *H*, служащую для того, чтобы поворачивать призму и зеркало. Напротив зеркала укреплена маленькая зрительная труба, с помощью которой можно видеть зеркальное изображение горизонтальной шкалы, расположенной на небольшом удалении. Благодаря вращению призмы можно провести изображение спектра пламени мимо вертикальной нити зрительной трубы *C* и совместить с этой нитью любой участок спектра. Каждому участку соответствует сделанный по шкале отсчет. Если спектр неяркий, то нить зрительной трубы подсвечивается с помощью линзы, которая направляет [на нить] часть испускаемых лампой лучей через небольшое отверстие, сделанное сбоку в окуляре зрительной трубы *C*.

Представленные рис. 97 спектры, полученные из названных выше хлорных соединений, сравнивались со спектрами, которые получаются, когда бромиды, иодиды, гидроксиды, сульфаты и карбонаты соответствующих металлов вносят в пламя, т. е. рассматривались пламя серы, пламя сероуглерода, пламя, содержащее воду спирта, несветящееся пламя светильного газа, пламя окиси углерода, пламя водорода и пламя гремучего газа. <...>

Тем, кому отдельные спектры известны из многократных наблюдений, не требуются точные измерения отдельных линий. Их цвет, взаимное расположение, своеобразная форма и оттенок, степень блеска являются характеристиками, которых вполне достаточно для надежной ориентации и неопытных наблюдателей.

Эти характеристики являются критериями для сравнения, которые можно использовать подобно неким реагентам для изучения различных осадков по их внешнему виду.

Аналогично тому, как осадки могут быть различного характера: желеобразные, порошкообразные, творожистые, зернистые или кристаллические, — так и спектральные линии имеют присущие им особенности: одна линия резко ограничивается кантами, другие размазываются с одной или с обеих сторон, одинаково или по-разному, одни могут быть шире, а другие — уже. И если обычно для исследования используют лишь те осадки, которые выпадают при возможно большем разбавлении [исходного] раствора, то и при спектральном анализе для изучения состава используются только те линии, которые появляются при наименьшем количестве [исследуемого] вещества и при не слишком высокой температуре.

В этом смысле оба метода примерно одинаковы. Зато спектральный анализ, рассматриваемый как своеобразный реактив, имеет в отношении окраски особенность, которая обеспечивает ему преимущество перед любыми другими аналитическими методами. В самом деле, среди осадков, которые используются для

изучения веществ, большая часть имеет белый цвет и только некоторые из них являются окрашенными. При этом окраска осадков не очень постоянна и имеет различные оттенки в зависимости от того, происходит ли осаждение в более плотных или более рыхлых формах. Кроме того, часто уже мельчайшие примеси посторонних веществ приводят к потере характерной окраски и замене ее совершенно неизвестной. Поэтому более тонкие градации цвета осадков не принимаются во внимание как химические характеристики состава.

Напротив, появляющиеся в спектральном анализе окрашенные полосы не затрагиваются такими посторонними влияниями и не меняются в присутствии других веществ. Места, которые они занимают в спектре, определяют химическое свойство, которое имеет столь же фундаментальную и неизменную природу, как атомный вес вещества, и могут быть поэтому установлены с почти астрономической точностью.

Совершенно особое значение спектрально-аналитическим методам придает то обстоятельство, что они почти бесконечно раздвигают границы, которых к настоящему времени достигла химическая характеристика материи. Они обещают дать нам драгоценные сведения о распространенности и распределении веществ в геологических формациях. Уже немногие опыты, описанные в настоящей статье, приводят к неожиданному заключению, что не только калий и натрий, но также литий и стронций, правда в меньших количествах, должны считаться веществами, распространенными повсюду на нашей Земле.

Не менее важную роль должен сыграть спектральный анализ в открытии до сих пор неизвестных элементов. Действительно, когда речь идет о веществе, которое распространено в природе столь экономно, что прежними методами анализа обнаружить и определить его невозможно, то можно надеяться, что многие такие вещества могут быть обнаружены простым рассмотрением спектров их пламен при наличии количеств этих веществ, не распознанных обычными химическими методами. И в самом деле, мы уже имели возможность убедиться, что существуют до сих пор неизвестные элементы.

Мы полагаем, опираясь на не вызывающие сомнений результаты спектрально-аналитического метода, что уже теперь можно выдвинуть утверждение — наряду с калием, натрием и литием имеется еще и четвертый, принадлежащий к щелочной группе металл. Он имеет такой же характерный и простой спектр, как и литий — металл, который дает в нашем спектральном приборе только две линии: слабую синюю, почти совпадающую с линией стронция $\text{Sr}\delta$, и другую, тоже синюю, но расположенную немного ближе к фиолетовому концу спектра, а интенсивностью и резкостью границ соперничающую с линией лития.

Выше мы представили спектральный анализ как изумительно простое средство для обнаружения мельчайших следов определенных элементов в земных телах. С другой стороны, он открыва-

ет для химического исследования область, совершенно недоступную до настоящего времени, простирающуюся далеко за границы Земли и самой Солнечной системы. Поскольку в рассматриваемом аналитическом методе для наблюдения используют раскаленный газ, естественно возникает мысль, что он не должен быть применим к атмосфере Солнца и к неподвижным звездам. Однако он должен быть модифицирован из-за света, который испускают ядра этих мировых тел. В своей статье «Об отношении между испускательной и поглощательной способностями тел для тепла и света»² один из нас с помощью теоретического рассмотрения доказал, что спектр накаливаемого газа *обращается*, т. е. светлые линии превращаются в темные, когда за ними находится источник света достаточной интенсивности, который сам дает непрерывный спектр. Отсюда необходимо сделать вывод, что солнечный спектр с его темными линиями есть не что иное, как обращение спектра, которым обладает атмосфера Солнца сама по себе. Таким образом, для химического анализа солнечной атмосферы нужно лишь разыскать те вещества, которые при внесении в пламя дают светлые линии, совпадающие с темными линиями солнечного спектра.

Здесь уместно в качестве экспериментального подтверждения этого закона, выведенного теоретически, привести следующие выполненные нами опыты.

Светлая газовая линия в спектре газового пламени, в которое внесена гранула хлористого лития, превращается в черную, когда через пламя пропускается неослабленный солнечный свет.

Заменяв гранулу хлористого лития на гранулу хлористого натрия, получим в солнечном спектре двойную темную линию D необыкновенной четкости, совпадающую со светлой линией натрия.

В спектре друммондова света^{*} появляется темная двойная линия D, когда его лучи проходят через пламя водного раствора спирта, в который внесен хлористый натрий^{*}.

Нам представляется не лишенным интереса получить дополнительные подтверждения найденного примечательного теоретического закона. Их можно получить с помощью опытов, которые здесь следует описать. Мы взяли и раскалили толстую платиновую проволоку в пламени и электрическим током подвели ее

* В мартовском номере «Philosophical Magazine» за 1860 г. Стокс напомнил, что Фуко еще в 1849 г. провел наблюдение, аналогичное вышеупомянутому. При исследовании электрической дуги между заостренными углями он заметил (...), что в этом спектре на месте [темной] двойной линии D солнечного спектра находится светлая линия и что темная линия D становится отчетливей или появляется в спектре дуги, если через нее пропустить солнечный свет или свет одного из раскаленных заостренных углей и наложить это излучение на спектр. Упомянутое в тексте наблюдение объясняет это интересное, уже 11 лет тому назад отмеченное Фуко явление и показывает, что оно не обуславливается свойствами во многих отношениях еще столь загадочного электрического света, а вызывается одним из соединений натрия, содержащимся в угле, которое благодаря току превратилось в раскаленный газ.

близко к точке плавления. Проволока излучала яркий спектр без каких-либо следов светлых или темных линий. Если же между проволокой и щелью прибора поместить пламя сильно разбавленного водного раствора спирта, в котором растворена поваренная соль, то появляется очень четкая темная линия D.

В спектре платиновой проволоки, которая накалена в пламени, можно получить темную линию D, если перед пламенем поместить пробирку, на поверхности которой нанесено ~~немного~~ амальгамы натрия, нагретой до кипения. Этот опыт важен, поскольку он показывает, что при температуре гораздо более низкой, чем калильный жар, пары натрия оказывают адсорбирующее действие точно в том же месте спектра, что и при более высоких температурах, которые мы можем создать, а также и при температурах, которые существуют в атмосфере Солнца.

Светлые линии спектров K, Sr, Ca, Ba можно обратить, используя солнечный свет и применяя смесь хлоридов этих металлов с молочным сахаром. Перед щелью аппарата устанавливается маленький желоб, в который помещается эта смесь; ослабленный солнечный свет проходит вдоль желоба и падает на щель, а смесь поджигается сбоку раскаленной проволокой. Зрительная труба, используемая для наблюдения, устанавливается так, что точка пересечения ее нитей, натянутых под углом, приходится на светлую линию спектра пламени, обращение которой должно быть доказано. Наблюдатель концентрирует свое внимание на том, чтобы определить, появляется ли в момент вспышки темная линия, проходящая через точку пересечения [нитей]. Таким способом при хорошем перемешивании горючей смеси очень легко наблюдать обращение линий Ba α , Ba β , K δ . Последняя из этих линий совпадает с ярчайшей, но не отмеченной Фраунгофером темной линией в солнечном спектре; эта линия появляется в момент вспышки соли калия и оказывается значительно ярче обычной. Чтобы наблюдать описанным способом обращение светлой линии спектра стронция, следует путем просушки тщательнейшим образом очистить хлорид стронция от следов влаги. Остатки влаги приводят к тому, что из-за вспышки выделяющиеся пары воды заполняют пламя вокруг частиц соли, солнечные лучи ослабевают и делается наблюдаемым положительный спектр стронция. <...>

Г. Кирхгоф

Об отношении между испускающей и поглощающей способностью тел для тепла и света

Тело, находящееся внутри оболочки, температура которой равна его собственной, не меняет своей температуры из-за теплового излучения; следовательно, оно поглощает за определенное время ровно столько лучей, сколько испускает. Из этого уже давно был сделан вывод, что при одной и той же температуре отношение между поглощающей и испускающей способностями для всех тел одинаково. При этом предполагалось, что тела испускают лучи только одного вида. Это положение было подтверждено опытами де ля Провостэ и Десэна⁴ для многих случаев, в которых испускаемые лучи можно было считать по крайней мере приблизительно однородными постольку, поскольку излучение было темным. Справедливо ли подобное правило, когда тела испускают одновременно лучи разного вида (что, строго говоря, почти всегда имеет место), об этом до сих пор ничего не было выяснено ни путем теоретического рассмотрения, ни посредством опытов. Я обнаружил, что высказанное утверждение остается в силе также и *в этих случаях*, если только под испускающей способностью понимать интенсивность испускаемых лучей *одного вида* и относить поглощающую способность к лучам того же вида. *Отношение испускающей способности к поглощающей способности*, если эти понятия применять в указанном смысле, *для всех тел при одинаковой температуре одинаково*. Я приведу здесь теоретическое доказательство этого утверждения и затем выведу несколько достойных внимания следствий, которые из него непосредственно вытекают и которые частично объясняют известные явления.

Всякое тело испускает лучи, характер и интенсивность которых зависят от его природы и его температуры. К этим лучам при известных обстоятельствах могут добавляться еще и другие, что происходит, когда тело в достаточной степени наэлектризовано или если оно фосфоресцирует или флуоресцирует.

Такие случаи здесь должны быть исключены. Если на тело извне падают лучи, то оно поглощает некоторую часть их и превращает ее в тепло. К *такому* поглощению может при известных условиях добавляться еще и другое, например, если тело — поглотитель света — или если оно флуоресцирует. Здесь предполагается, что все поглощаемые лучи превращаются в тепло.

§ 1. Вообразим, что перед некоторым телом C [рис. 99] поставлены два экрана S_1 и S_2 , с двумя отверстиями 1 и 2, размеры которых бесконечно малы по сравнению с расстоянием между

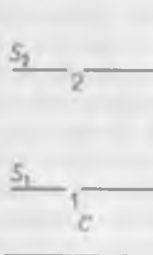


Рис. 99

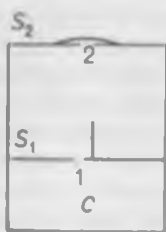


Рис. 100

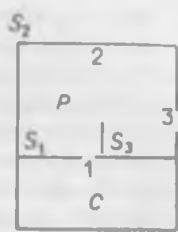


Рис. 101

ними. Через эти отверстия от тела C проходит пучок лучей. Рассмотрим ту часть его, у которой длины волн лежат между λ и $\lambda + d\lambda$, и разложим ее на две поляризованные компоненты, плоскости поляризации a и b которых взаимно перпендикулярны и проходят через ось пучка. Пусть интенсивность поляризованной в плоскости a компоненты есть $E d\lambda$, где E — испускательная способность тела.

На тело C в обратном направлении через отверстия 2 и 1 падает пучок лучей с длиной волны λ , который поляризован в плоскости a . Из него тело поглощает некоторую часть, остальное же частично пропускается, частично отражается. Отношение интенсивности поглощенных лучей к интенсивности падающих пусть будет A ; оно называется поглощательной способностью тела.

Величины E и A зависят от природы и температуры тела C , от положения и формы отверстий 1 и 2, от длины волны λ и направления плоскости a . Надо доказать, что отношение E к A не зависит от природы тела. Тогда само собой будет следовать, что это отношение также не меняется с изменением направления плоскости a , а его зависимость от положения и формы отверстий 1 и 2 может быть легко найдена, так что остается неизвестным только, как оно зависит от температуры и длины волны λ .

Доказательство, которое будет дано для высказанного здесь утверждения, покоится на предположении, что мыслимы такие тела, которые при бесконечно малой толщине полностью поглощают все падающие на них лучи, т. е. не отражают и не пропускают их. Я буду называть такие тела *абсолютно черными* или, короче, просто *черными*. Необходимо исследовать в первую очередь излучение таких черных тел.

§ 2. Пусть C — черное тело; его испускательную способность, которая в общем случае обозначается E , обозначим e . Требуется доказать, что величина e остается неизменной, если C заменить каким-либо другим черным телом при той же температуре.

Пусть тело C заключено в черную оболочку, часть которой составляет экран S_1 . Второй экран, как и первый, сделан из черного вещества, и оба они соединены сплошными черными боковыми стенками [рис. 100]. Отверстие 2 представим сначала закрытым черной площадкой, которую я буду называть площад-

кой 2. Вся система должна обладать одинаковой температурой и быть защищена от потери тепла наружу посредством непроницаемой для тепла оболочки, например посредством замкнутой полностью отражающей поверхности. Тогда температура тела C будет оставаться постоянной; следовательно, сумма интенсивностей лучей, которые на него падают (и которые оно, согласно предположению, полностью поглощает), должна быть равна сумме интенсивностей лучей, которые оно испускает. Теперь представим себе, что площадка 2 удаляется и открывшееся отверстие закрывается поставленным непосредственно за ним элементом идеально отражающей сферической поверхности, центр которой находится в центре отверстия 1. Температурное равновесие будет сохраняться и в этом случае. Существовавшее равенство интенсивностей лучей, испускаемых телом C , и лучей, попадающих на него, должно выполняться и теперь. А так как тело C испускает теперь те же лучи, что и в ранее описанном случае, то отсюда следует, что интенсивность лучей, которые падают на тело C , в обоих случаях одна и та же. С удалением площадки 2 тело C лишается тех лучей, которые площадка посылала сквозь отверстие 1, а помещенное в отверстие 2 вогнутое зеркало отрабатывает обратно к телу C те лучи, которые оно само посылает через отверстия 1 и 2. Отсюда вытекает, что интенсивность пучка лучей, посылаемого телом C через отверстия 1 и 2, равна интенсивности того пучка лучей, который испускает черная площадка 2 при той же температуре через отверстие 1. Следовательно, эта интенсивность не зависит от формы и прочих свойств черного тела C . Высказанное положение было бы этим доказано, если бы все лучи обоих сравниваемых между собой пучков имели длину волны λ и были бы поляризованы в плоскости Q . Учет разнородности лучей требует несколько более сложного рассмотрения.

§ 3. Не меняя изображенного на рис. 100 расположения предметов, представим себе между отверстиями 1 и 2 маленькую пластинку P [рис. 101], которая в видимых лучах дает цвета тонких пленок и которая (частично вследствие своей малой толщины, а частично вследствие своих природных свойств) не испускает и не поглощает заметного количества лучей. Пусть пластинка расположена так, что пучок лучей, проходящий через отверстия 1 и 2, падает на нее под углом поляризации, и плоскость падения есть плоскость Q . Пусть стенке, соединяющей друг с другом экраны S_1 и S_2 , придана такая форма, что зеркальное изображение отверстия 2, даваемое пластинкой P , находится на ней. Представим себе на месте этого зеркального изображения совпадающее с ним по форме отверстие, которое я назову отверстием 3. Пусть отверстие 2 закрыто черной площадкой, имеющей температуру всей системы, а отверстие 3 закрыто *сначала* точно такой же площадкой, которую я буду называть площадкой 3, а в *другом случае* — полностью отражающим вогнутым зеркалом, центр которого лежит в той точке, в которую пластинка P

отбрасывает зеркальное изображение центра отверстия I . В обоих случаях имеет место тепловое равновесие. Следовательно, сумма интенсивностей лучей, который тело C лишается из-за удаления площадки $З$, равна сумме интенсивностей лучей, которые будут к нему направляться при установке вогнутого зеркала. Пусть черный экран S_3 (с температурой, равной температуре системы) поставлен так, что ни один из лучей, испускаемых площадкой $З$, не достигает отверстия I . Тогда первая сумма представляет интенсивность лучей, которые вышли из площадки $З$, отразились от пластинки P и прошли через отверстие I ; обозначим ее через Q . Вторая сумма состоит из двух частей. Первая часть — интенсивность лучей, исходящих из тела C , она равна

$\int_0^{\infty} d\lambda e r^2$, где r — величина, зависящая от свойств пластинки P и длины волны λ . Вторая часть — интенсивность лучей, которые вышли из части черной стенки, соединяющей экраны S_1 и S_2 , прошли сквозь пластинку P , отразились от вогнутого зеркала и потом от пластинки P . Эту часть обозначим через R . Исследовать более подробно величину R нет необходимости. Достаточно заметить, что R , так же как и Q , не зависит от свойств тела C . Введенные величины связаны уравнением

$$\int_0^{\infty} d\lambda e r^2 + R = Q.$$

Если теперь заменить тело C каким-либо другим телом с той же самой температурой и обозначить для него через e' то, что мы для первого тела обозначали e , то будет также выполняться уравнение

$$\int_0^{\infty} d\lambda e' r^2 + R = Q.$$

Отсюда вытекает

$$\int_0^{\infty} d\lambda (e - e') r^2 = 0.$$

Предположим теперь, что коэффициент преломления пластинки P бесконечно мало отличается от единицы. Тогда из теории цветов тонких пленок следует

$$r = \rho \sin^2 \frac{\rho}{\lambda};$$

где ρ — величина, пропорциональная толщине пластинки P и не зависящая от λ , а ρ — величина, не зависящая от толщины пластинки. Вследствие этого выведенное уравнение принимает вид

$$\int_0^{\infty} d\lambda (e - e') \rho^2 \sin^4 \frac{\rho}{\lambda} = 0.$$

Так как это уравнение должно выполняться для любой толщины пластинки P , т. е. для любого значения p , то можно заключить, что для каждого значения λ

$$e - e' = 0.$$

Чтобы доказать это, заменим в уравнении $\sin^4(p/\lambda)$ на

$$\frac{1}{8} \left(\cos 4 \frac{p}{\lambda} - 4 \cos 2 \frac{p}{\lambda} + 3 \right)$$

и продифференцируем уравнение два раза по p . После этого получим

$$\int_0^{\infty} d\lambda \frac{(e - e') p^2}{\lambda^3} \left(\cos 4 \frac{p}{\lambda} - \cos 2 \frac{p}{\lambda} \right) = 0.$$

Введем теперь вместо λ новую величину α , т. е. $2/\lambda = \alpha$, и положим $(e - e') p^2 = f(\alpha)$. Тогда

$$\int_0^{\infty} d\alpha f(\alpha) (\cos 2p\alpha - \cos p\alpha) = 0.$$

Примем во внимание, что если $\varphi(\alpha)$ означает любую функцию α , то

$$\int_0^{\infty} d\alpha \varphi(\alpha) \cos 2p\alpha = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} d\alpha \varphi(\alpha/2) \cos p\alpha$$

(в чем можно убедиться, если вместо α подставить $\alpha/2$). Тогда

$$\int_0^{\infty} d\alpha (f(\alpha/2) - 2f(\alpha)) \cos p\alpha = 0.$$

Умножим это уравнение на $dpcospx$, где x — произвольная величина, и проинтегрируем его от $p = 0$ до $p = \infty$. Согласно преобразованию Фурье, которое выражается уравнением

$$\int_0^{\infty} dpcospx \int_0^{\infty} d\alpha \varphi(\alpha) \cos p\alpha = \frac{\pi}{2} \varphi(x),$$

получаем

$$f(x/2) = 2f(x), \text{ или } f(\alpha/2) = 2f(\alpha).$$

Отсюда следует, что функция $f(\alpha)$ либо равна нулю при всех значениях α , либо должна становиться бесконечно большой, если $\alpha \rightarrow 0$. Если $\alpha \rightarrow 0$, то $\lambda \rightarrow \infty$. Вспомнив значение $f(\alpha)$ и учтя, что p — правильная дробь и что ни e , ни e' не могут обращаться в бесконечность, когда λ бесконечно возрастает, легко понять, что второй случай не может иметь места и что для всех значений λ должно выполняться равенство $e = e'$. <...>

§ 11. Обратимся снова к рис. 101, только пусть теперь тело C будет не черное, а любое. Тогда точно так же в обоих представ-

ленных там случаях будет иметь место тепловое равновесие и живая сила, которой тело C лишается при удалении черной площадки 3 , будет равна живой силе, которая подводится к телу C с помощью заменившего эту площадку вогнутого зеркала. Используемые в § 3 обозначения сохраняют здесь прежний смысл; обозначения E и A применяются в том же смысле, что и в § 1. Живая сила, которой лишается тело C при удалении поверхности 3 , с учетом сказанного в § 7 будет определяться выражением

$$\int_0^{\infty} d\lambda e r A.$$

Живая сила, которую тело C приобретает через посредство вогнутого зеркала, состоит из трех частей. Первая часть — это живая сила лучей, испускаемых самим телом C :

$$\int_0^{\infty} d\lambda E r^2 A.$$

Вторая часть — это живая сила лучей, которые вышли из противоположащей зеркалу черной стенки, прошли сквозь пластинку P , претерпели одно отражение от вогнутого зеркала и второе от пластинки. Она, согласно § 9, равна

$$\int_0^{\infty} d\lambda e r (1 - r) A.$$

Наконец, третья часть — это живая сила лучей, которые из различных точек черной оболочки, окружающей тело C , упали на него, были им отброшены на площадку 2 вследствие отражений и преломлений и возвращены обратно через отверстие 1 в результате одного отражения от пластинки P , второго — от вогнутого зеркала и третьего — снова от пластинки P . Если использовать обозначение M , разъясненное в § 10, то эта часть живой силы равна

$$\int_0^{\infty} d\lambda M r^2 A.$$

Может возникнуть сомнение в правильности выражений для первой и третьей частей, если тело C расположено как раз так, что конечная часть пучка лучей, посылаемого площадкой 2 через отверстие 1 к телу C , отражается им обратно к площадке 2 . Поэтому такие случаи мы пока исключим.

Согласно § 10, $M = M'$ и, по определению,

$$M' = e(1 - A).$$

Тогда для третьей части имеем

$$\int_0^{\infty} d\lambda e(1 - A)r^2 A,$$

и в результате получаем уравнение

$$\int_0^{\infty} d\lambda (E - Ae) Ar^2 = 0.$$

Проводя те же рассуждения, как и в § 3 по поводу аналогичного уравнения, можно прийти к выводу, что для каждого значения λ , $E/A = e$, или, если подставить значение e из § 5,

$$\frac{E}{A} = 1 - \frac{w_1 w_2}{s^2}.$$

Таким образом, утверждение, которое требовалось доказать, доказано в предположении, что из пучка лучей, попадающих от площадки 2 через отверстие 1 на тело C , ни одна конечной величины часть не возвращается назад телом C к площадке 2. Это утверждение справедливо и без такого ограничения, что явствует из следующего. Если упомянутое предположение не выполняется, то надо только бесконечно мало повернуть тело C , чтобы оно выполнялось, а при такого рода повороте величины E и A претерпят лишь бесконечно малые изменения.

Величина, обозначенная через I , как замечено в § 5, есть функция длины волны и температуры. Нахождение этой функции представляет задачу огромной важности. На пути экспериментального определения функции I стоят большие трудности. Несмотря на это, существует надежда определить ее опытным путем, так как она, без сомнения, имеет простую форму, как и все полученные до настоящего времени функции, не зависящие от свойств отдельных тел. Только после решения такой задачи можно будет полностью увидеть плодотворность доказанного утверждения; но уже и сейчас из него можно сделать важные заключения.

§ 12. Если взять определенное тело (например, платиновую проволоку) и постепенно его нагревать, то оно будет испускать лучи с длинами волн, большими, чем у видимых лучей, до тех пор, пока не достигнет определенной температуры. При определенной температуре появляются лучи с длиной волны, соответствующей крайнему красному цвету. При все большем и большем повышении температуры добавляются лучи все меньших и меньших длин волн таким образом, что при каждой температуре возникают лучи соответствующей длины волны, в то время как интенсивность лучей более длинных волн растет. Если применить доказанное утверждение к данному случаю, то увидим, что функция I для некоторой длины волны равна нулю для всех температур ниже определенной температуры, соответствующей данной длине волны, и возрастает при более высоких температурах. Отсюда следует, если применить это утверждение и к другим телам, что все тела при постепенном повышении их температуры начинают испускать лучи одной и той же длины волны при одной и той же температуре, т. е. при одной и той же температуре накаляются докрасна, при более высокой, но одинаковой для всех

начинают испускать желтые лучи и т. д. Интенсивность же лучей определенной длины волны, которые различные тела испускают при одинаковой температуре, может, однако, сильно различаться. Она пропорциональна поглотительной способности тел для лучей данной длины волны. Поэтому при одинаковых температурах металл светится ярче, чем стекло, а последнее ярче, чем газ. Тело, которое при самых высоких температурах остается совершенно прозрачным, никогда не будет светиться. Я помещал в согнутое из платиновой проволоки кольцо диаметром примерно 5 мм немного фосфорнокислого натрия и накаливал его в слабо светящем пламени бунзеновской горелки. Соль расплавлялась, образовывала жидкую линзу и оставалась при этом полностью прозрачной, но она также и совсем не светила, в то время как соприкасавшееся с ней кольцо испускало ярчайший свет. <...>

§ 16. В заключение приведем здесь еще одно следствие из доказанного утверждения. Если некоторое пространство окружено телами одинаковой температуры и через эти тела лучи не могут проникать, то каждый пучок лучей внутри этого пространства будет по своим свойствам и интенсивности таким, как если бы он был испущен абсолютно черным телом той же температуры, т. е. он не зависит от свойств и формы тел и определяется только температурой. Со справедливостью этого утверждения легко согласиться, если учесть, что пучок лучей, имеющий ту же самую форму, что и выбранный, но противоположное направление, после бесконечного числа отражений от предполагаемых тел полностью поглощается. Внутри непрозрачного раскаленного тела определенной температуры сохраняется вследствие этого также всегда одинаковая яркость, какими бы ни были в остальном свойства этого тела.

Гейдельберг, январь 1860

Комментарий

Перевод с немецкого статьи Р. Бунзена и Г. Кирхгофа выполнен Р. Б. Сегалем и Л. С. Полаком. Название на языке оригинала: *Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen* (1860).

Перевод с немецкого статьи Р. Кирхгофа выполнен Л. Г. Мищенко при участии А. Е. Рубинского. Отрывки из нее воспроизводятся по изданию: Шепф Х.-Г. От Кирхгофа до Планка. М., 1981, с. 124—143. Название на языке оригинала: *Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme* (1860).

¹ Речь идет о так называемой «горелке Бунзена», описанной в 1856 г.

² Имеется в виду статья Г. Кирхгофа, написанная в 1860 г.

³ Друммондовым (известковым или астральным) светом называется яркое свечение, возникающее при нагреве конуса из мела в пламени грамучого

газа (смеси кислорода и водорода). В прошлом использовался для освещения маяков. Назван по имени изобретателя Друммонда, предложившего этот способ освещения в 1826 г.

⁴ Речь идет об опытах французских физиков Ф. Провоста и П. Десэна по исследованию теплового излучения нагретых тел, поставленных в 1840—1850 гг.

Литература

- [1] Собрание сочинений Р. Бунзена: *Bunsen R. Gesammelte Abhandlungen*. Bd. 1—3. Leipzig, 1904.
- [2] Lockemann G. Robert Wilhelm Bunsen. Lebensbild eines deutschen Naturforschers. Stuttgart, 1949.
- [3] Роберт Вильгельм Бунзен. — В кн.: Биографии великих химиков. М., 1981, с. 231—236.
- [4] Сочинения Г. Кирхгофа:
а) *Kirchhoff G. R. Gesammelte Abhandlungen*. Leipzig, 1882 (Nachtrag., Leipzig, 1891).
- б) *Kirchhoff G. R. Vorlesungen über mathematische Physik*. Bd. 1—4. Leipzig, 1876—1894.
- [5] Столетов А. Г. Г. Р. Кирхгоф. — В кн.: Столетов А. Г. Собрание сочинений. Т. 2. М. — Л., 1941, с. 31—52.
- [6] Горюштин Т. Н. Густав Роберт Кирхгоф и его исследования по тепловому излучению. — Труды института истории естествознания и техники АН СССР. 1960. Т. 34. С. 110—156.



Дж. К. Максвелл

1831—1897

О кинетической теории газов Об электромагнитном поле

В истории физики XIX в. трудно, если вообще возможно, указать ученого, который бы своим творчеством охватил столь широкий диапазон проблем, как это сделал выдающийся английский физик Дж. К. Максвелл. Небесная механика, теория газов, теория цветового зрения, электродинамика — это далеко не полный перечень областей, в которые внес вклад Максвелл. Его исследования как бы символизируют апогей в развитии классической физики.

Джемс Клерк Максвелл родился 13 июня 1831 г. в Эдинбурге, в семье юриста — обладателя поместья в Шотландии. В мальчике рано проявились любовь к технике и стремление постичь окружающий мир. Большое влияние на него оказал отец — высокообразованный человек, глубоко интересовавшийся проблемами естествознания и техники. В школе Максвелла увлекала геометрия, и первой его научной работой, выполненной в пятнадцать лет, было открытие простого, но не известного ранее способа вычерчивания овальных фигур. Максвелл получил хорошее образование сначала в Эдинбургском, а затем в Кембриджском университетах.

В 1856 г. молодого, подающего надежды ученого приглашают на преподавательскую работу в качестве профессора колледжа шотландского города Абердина. Здесь Максвелл увлеченно работает над проблемами теоретической и прикладной механики, оптики, физиологии цветового зрения. Он блестяще решает загадку колец Сатурна, математически доказав, что они образованы из отдельных частиц. Имя ученого становится известным, и его приглашают занять кафедру в Королевском колледже в Лондоне. Лондонский период (1860—1865) был самым плодотворным в жизни ученого. Он возобновляет и доводит до завершения теоретические исследования по электродинамике, публикует фундаментальные работы по кинетической теории газов.

В 1871 г. Кембриджский университет предлагает своему бывшему студенту возглавить вновь образованную кафедру экспериментальной физики с условием создания при ней научно-исследовательской лаборатории. До конца жизни (Максвелл скончался 5 ноября 1879 г.) всю свою энергию ученый отдает строительству и организации физической лаборатории, названной в честь Г. Кавендиша и ставшей впоследствии одной из самых знаменитых физических лабораторий мира.

Одной из первых научных работ, принесших Максвеллу авторитет в научных кругах, было исследование по кинетической теории газов. В 1859 г. ученый выступил на заседании Британской ассоциации содействия развитию наук с докладом, в котором дал вывод распределения молекул по скоростям, позволяющего определить «среднее число частиц, скорости которых лежат между определенными пределами, хотя скорость каждой отдельной частицы изменяется при каждом столкновении». Максвелл уточнил представления своего непосредственного предшественника в деле разработки кинетической теории газов Р. Клаузиуса, который рассматривал лишь среднеквадратичные скорости молекул. Максвелл пришел к выводу: «Скорости распределяются между частицами по тому же закону, по которому распределяются ошибки между наблюдениями в теории «метода наименьших квадратов», т. е. в соответствии со статистикой Гаусса». Так впервые в описание физических явлений вошла статистика, и этот факт знаменует новый этап в развитии физики. Максвелл считал, что единичные акты столкновения между молекулами подчиняются законам Ньютона и в этом смысле строго детерминированы. При этом, однако, из-за невозможности точно описывать громадные ансамбли частиц для получения общей картины поведения газа приходится пользоваться вероятностными методами.

В рамках кинетической теории газов Максвелл объяснил закон Авогадро, определил среднюю длину свободного пробега, средний диаметр молекул. Он построил также теорию явлений переноса в газах (диффузии, внутреннего трения и теплопроводности). Максвелл, предложив известный мысленный эксперимент с так называемым «демоном», стимулировал поиски статистической интерпретации второго принципа термодинамики.

Еще в студенческие годы Максвелл знакомится с «Экспериментальными исследованиями по электричеству» Фарадея, и этот труд захватывает его. Позднее он вспоминал: «Прежде чем начать изучение электричества, я принял решение не читать никаких математических работ по этому предмету до тщательного прочтения фарадеевских «Экспериментальных исследований по электричеству». Я был осведомлен, что высказывалось мнение о различии между фарадеевским методом понимания явлений и методами математиков, так что ни Фарадей, ни математики не были удовлетворены языком друг друга». Таким образом, Максвелл решил с самого начала не поддаваться гипнозу мате-

матически совершенных работ А.-М. Ампера, Ф. Неймана и других представителей концепции дальнего действия электромагнитных сил. Он первым осознал глубину рассуждений Фарадея и интуитивно почувствовал в его идее о силовых линиях решение проблем электродинамики. Почти всю свою творческую жизнь Максвелл планомерно, шаг за шагом, развивал идею о поле. На первом этапе исследований он убеждается в том, что теория дальнего действия не способна последовательно и непротиворечиво объяснить электромагнитные явления. Следуя Фарадею, Максвелл разрабатывает гидродинамическую модель силовых линий. Широко пользуясь механическими аналогиями, он выражает известные соотношения электродинамики на математическом языке, соответствующем механическим моделям Фарадея. Этот математический аппарат он заимствует из работ ирландского математика У. Р. Гамильтона. Основные результаты этого этапа исследований отражены в первой большой работе Максвелла «О фарадеевских линиях сил», которая была написана в 1855 г., а опубликована позднее.

В дальнейшем на смену гидродинамическим приходят модели-аналоги теории упругости. Работая с такими понятиями, как натяжение, деформация, давление, вихри, Максвелл непостижимым для нас образом приходит к уравнениям поля, еще не приведенным на данном этапе в единую систему. Рассматривая электрические явления в диэлектриках, он выдвигает гипотезу о токах смещения. В общем виде высказывается мысль о связи света с электротоническим состоянием (первоначально Максвелл пользуется этим термином Фарадея для обозначения поля). Этот этап работы отражен в труде «О физических линиях сил», который печатался по частям в течение 1861—1862 гг.

Заключительный этап электродинамических исследований Максвелла характеризуется синтезом электромагнетизма и оптики. Ученый приходит к ясному определению электромагнитного поля как вида материи, выражая все его проявления с помощью систем из двадцати уравнений. (Впоследствии О. Хевисайд и Г. Герц приведут систему уравнений Максвелла к более простому виду, принятому в наши дни.) На основании своей теории Максвелл решает и конкретные задачи: определяет показатель преломления тел ($n = \sqrt{\epsilon\mu}$), рассчитывает коэффициенты самоиндукции катушки и взаимной индукции двух круговых токов. Самому Максвеллу казалось, что он создал механику эфира — всепроникающей среды, которую можно принять за абсолютно неподвижную систему отсчета. Он, таким образом, стимулировал попытки ученых уловить «неподвижный эфир», предложив свою собственную идею опыта по его обнаружению. Опыт был осуществлен в 1887 г. А. Майкельсоном и Э. Морли и, как известно, дал отрицательный результат. Выход был найден А. Эйнштейном в специальной теории относительности, которая оказалась в полном соответствии с электродинамикой Максвелла. Ученый, исходя из уравнений поля, предсказал существование поперечных

электромагнитных волн, распространяющихся по скорости света. Этот завершающий этап был отражен в работе «Динамическая теория электромагнитного поля», изданной в 1864 г. Итог работы Максвелла по электродинамике подвел его знаменитый «Трактат об электричестве и магнетизме» (1873).

При жизни Максвелла его теория не получила всеобщего признания: она считалась непонятной, математически нестрогой, логически необоснованной. Лишь после работ Г. Герца, доказавшего существование электромагнитных волн, и опытов П. Н. Лебедева, в которых было измерено давление света, предсказанное Максвеллом, его теория завоевала признание среди ученых.

Пояснения к динамической теории газов

ЧАСТЬ I

О движениях и столкновениях совершенно упругих шаров

Из гипотезы, согласно которой мельчайшие части материи находятся в быстром движении, причем скорость этого движения возрастает с температурой, может быть выведено так много свойств материи, в особенности если ее взять в газообразной форме, что истинная природа этого движения является предметом естественного интереса.

Бернулли, Герапат, Джоуль, Крениг, Клаузиус и другие показали, что отношения между давлением, температурой и плотностью в идеальном газе могут быть объяснены, если предположить, что частицы движутся с постоянной скоростью по прямолинейным путям, ударяясь о стенки сосуда, содержащего газ, и вызывая этим давление. При этом нет необходимости в допущении, что каждая частица проходит большое расстояние по одной и той же прямой линии, так как эффект образования давления остается тем же, если частицы сталкиваются друг с другом; таким образом, прямолинейный отрезок пути, проходимый частицей, может быть очень коротким. Клаузиус определил среднюю длину пути, выразив ее через среднее расстояние между частицами, а также расстояние между центрами двух частиц в тот момент, когда происходит столкновение. У нас в настоящее время не существует каких-либо средств для установления того или другого из этих расстояний. Однако известные явления, как-то: внутреннее трение газов, прохождение теплоты через газ, а также взаимная диффузия газов, — по-видимому, указывают на возможность точного определения средней длины пути, проходимого молекулой в промежутке между двумя последовательными столкновениями. В целях создания основы для подобных исследований на строгих принципах механики я изложу законы движения неопределенного количества малых твердых и совер-

шенно упругих шаров, действующих друг на друга только во время столкновения.

Если окажется, что свойства подобной системы тел соответствуют свойствам газов, то этим будет создана важная физическая аналогия, которая может привести к более правильному познанию свойств материи. Если опыты над газами не находятся в согласии с гипотезой, лежащей в основе этих теорем, тогда наша теория, хотя она и находится в согласии с самой собой, должна быть признана неспособной объяснить явления в газах. В обоих случаях необходимо рассмотреть те следствия, которые вытекают из этой гипотезы.

Вместо того чтобы говорить, что частицы тверды, шарообразны и упруги, мы можем, если нам угодно, говорить, что частицы представляют собой центры силы, действие которой становится заметным лишь на определенном малом расстоянии, когда она внезапно проявляется в виде силы отталкивания очень большой интенсивности. Совершенно ясно, что оба эти предположения приведут к одним и тем же результатам. Для того чтобы избежать повторного употребления длинной фразы относительно этих отталкивательных сил, я буду продолжать исходить из предположения о совершенно упругих шарообразных телах. Если мы предположим, что подобные собранные в группы молекулы, совершающие совместно движение, ограничены поверхностью, отличной от шаровой, тогда вращательное движение системы, как это было доказано Клаузиусом, должно аккумулировать известную часть всей живой силы. В этом случае мы можем считать, что удельная теплоемкость должна быть больше, чем при более простой гипотезе. (...)

Предложение IV. *Определить среднее число частиц, скорости которых лежат между заданными пределами, после большого числа столкновений между большим числом одинаковых частиц.*

Пусть N — общее число частиц. Пусть x, y, z — составляющие скорости каждой частицы по трем взаимно перпендикулярным направлениям и пусть число частиц, для которых x лежит между x и $x + dx$, равно $Nf(x)dx$, где $f(x)$ — некоторая функция от x , которую следует определить.

Число частиц, у которых y лежит между y и $y + dy$, равно $Nf(y)dy$, а число частиц, у которых z лежит между z и $z + dz$, равно $Nf(z)dz$, где f во всех случаях обозначает одну и ту же функцию.

Но существование скорости x никак не должно влиять на существование скоростей y или z , так как все они находятся под прямыми углами друг к другу и не зависят друг от друга¹. Число частиц, скорости которых лежат между x и $x + dx$, между y и $y + dy$ и между z и $z + dz$, равно

$$Nf(x)f(y)f(z)dx dy dz.$$

Если мы предположим, что N частиц вышло в одно и то же мгновение из начала координат, то это будет число частиц в эле-

менте объема $dx dy dz$ спустя единицу времени, а число частиц, отнесенное к единице объема, составит

$$Nf(x)f(y)f(z).$$

Но направления координат совершенно произвольны, поэтому данное число должно зависеть только от расстояния от начала координат, т. е.

$$f(x)f(y)f(z) = \varphi(x^2 + y^2 + z^2).$$

Разрешив это функциональное уравнение, получаем

$$f(x) = Ce^{Ax^2}, \quad \varphi(r^2) = C^3 e^{Ar^2}.$$

Если мы сделаем A положительным, то число частиц будет возрастать вместе со скоростью и мы должны прийти к выводу, что общее число частиц бесконечно велико. Поэтому мы сделаем A отрицательным и равным $-1/\alpha^2$, так что число частиц в интервале от x до $x + dx$ равно

$$NCe^{-x^2/\alpha^2} dx.$$

Интегрируя это выражение от $x = -\infty$ до $x = \infty$, мы найдем общее число частиц:

$$NC\sqrt{\pi} \alpha = N,$$

откуда

$$C = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}},$$

и, таким образом, $f(x)$ равно

$$\frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} e^{-x^2/\alpha^2}.$$

Отсюда мы можем вывести следующие заключения.

1. Число частиц, скорость которых, разложенная в определенном направлении, лежит между x и $x + dx$, равно

$$N \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} e^{-x^2/\alpha^2} dx. \quad (1)$$

2. Число частиц, действительные скорости которых лежат между v и $v + dv$, равно

$$N \frac{4}{\alpha^3\sqrt{\pi}} v^2 e^{-v^2/\alpha^2} dv. \quad (2)$$

3. Для того чтобы определить среднее значение v , следует скорости всех частиц сложить и сумму разделить на число частиц, в результате чего получается:

$$\text{средняя скорость} = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}. \quad (3)$$

4. Для того чтобы определить среднее значение v^2 , следует все эти значения сложить и разделить на N :

$$\text{среднее значение } v^2 = \frac{3}{2} \alpha^2.$$

Последнее больше квадрата средней скорости, как это действительно и должно быть.

Из этого предложения явствует, что скорости распространяются между частицами по тому же закону, по которому распределяются ошибки между наблюдениями в теории «метода наименьших квадратов». Скорости лежат в пределах от 0 до ∞ , однако число молекул, имеющих большие скорости, сравнительно невелико. В дополнение к тем скоростям, которые равны во всех направлениях, может существовать и общее движение переноса всей системы частиц, которое должно быть присоединено к движению частиц относительно друг друга. Одно из этих движений мы назовем движением переноса, а другое — переменным движением. <...>

Предложение VI. Две системы частиц движутся в одном и том же сосуде; доказать, что средняя живая сила каждой частицы одинакова в обеих системах.

Пусть P — масса каждой частицы в первой системе и Q — во второй системе. Пусть p, q — средние скорости обеих систем до столкновения и p', q' — средние скорости после одного столкновения. Пусть $OA = p$ и $OB = q$ и пусть AOB — прямой угол [рис. 102]. Тогда, согласно предложению (V), AB будет средней относительной скоростью, OG будет средней скоростью центра масс. Если провести aGb под прямым углом к OG и отложить $aG = AG$ и $bG = BG$, то Oa , составленная из OG и Ga , будет средней скоростью частицы с массой P после удара, а Ob — средней скоростью частиц с массой Q после удара. Но

$$AB = \sqrt{p^2 + q^2}, \quad AG = \frac{Q}{P+Q} \sqrt{p^2 + q^2},$$

$$BG = \frac{P}{P+Q} \sqrt{p^2 + q^2}, \quad QG = \frac{\sqrt{P^2 p^2 + Q^2 q^2}}{P+Q}.$$

поэтому

$$p' = Oa = \frac{\sqrt{Q^2(p^2 + q^2) + P^2 p^2 + Q^2 q^2}}{P+Q},$$

$$q' = Ob = \frac{\sqrt{P^2(p^2 + q^2) + P^2 p^2 + Q^2 q^2}}{P+Q},$$

$$Pp'^2 - Qq'^2 = \left(\frac{P-Q}{P+Q} \right)^2 (Pp^2 - Qq^2). \quad (5)$$

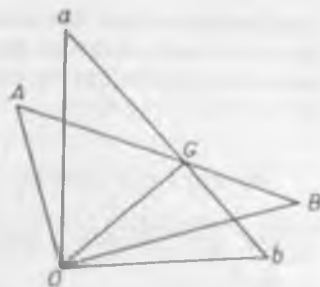


Рис. 102

Отсюда ясно, что величина $Pp^2 = Qq^2$ при каждом столкновении уменьшается в одном и том же отношении, так что после многих ударов она станет равной нулю и тогда

$$Pp^2 = Qq^2.$$

Но средняя живая сила составляет $\frac{3}{2}P\alpha^2 = \frac{3\pi}{8}Pp^2$ для P и $\frac{3\pi}{8}Qq^2$ для Q ; ясно, что эти величины будут равны, когда $Pp^2 = Qq^2$.

Если некоторое количество различных видов частиц, имеющих массы P, Q, R и соответственно скорости p, q, r , движутся в одном и том же сосуде, то после многих столкновений $Pp^2 = Qq^2 = Rr^2$ и т. д. (...)

Предложение XII. *Определить давление на единицу площади стенки сосуда, вызванное ударами частиц о стенку.*

Пусть N — количество частиц в единице объема, M — масса каждой частицы, v — скорость каждой частицы, l — средний путь каждой частицы; тогда число частиц в слое, имеющем площадь, равную единице, и толщину dz , равно Ndz .

Количество столкновений этих частиц в единицу времени составляет

$$Ndz \frac{v}{l}. \quad (7)$$

Число частиц, проходящих после столкновения путь, заключающийся между nl и $(n + dn)l$, равно

$$N \frac{v}{l} e^{-n} dz dn. \quad (8)$$

Доля тех частиц, которые сталкиваются на единице площади на расстоянии z , составляет²

$$\frac{nl - z}{2nl}; \quad (9)$$

средняя скорость этих частиц в направлении z равна³

$$v \frac{nl + z}{2nl}. \quad (10)$$

Перемножив выражения (8) — (10) и умножив их произведение на M , получим импульс при ударе:

$$MN \frac{v^2}{4n^2 l^2} (n^2 l^2 - z^2) e^{-n} dz dn.$$

Интегрируя выражение по z от 0 до nl , получаем

$$\frac{1}{6} MN v^2 n e^{-n} dn.$$

Интегрируя полученное выражение по n от 0 до ∞ , получаем

$$\frac{1}{6} MN v^2.$$

Таково выражение импульса ударяющихся частиц в направлении z . Так как импульс частиц после удара по величине остается неизменным, но меняет свое направление на противоположное, то все давление на единицу площади равно удвоенной его величине, или

$$p = \frac{1}{3}MNv^2.$$

Это значение p не зависит от длины пути l . Применяя этот вывод в теории газов, мы полагаем $MN = p$ и $v^2 = 3k$. Тогда

$$p = kp, \quad (11)$$

что представляет собой закон Бойля и Мариотта. Согласно (4), имеем $v^2 = \frac{3}{2}\alpha^2$, откуда $\alpha^2 = 2k$. (12)

Мы видели, что на основании гипотезы об упругих частицах, движущихся по прямолинейным путям, давление газа может быть объяснено, если исходить из допущения, что квадрат скорости прямо пропорционален абсолютной температуре и обратно пропорционален удельному весу газа при постоянной температуре, так что при одном и том же давлении и одной и той же температуре значение MNv^2 является общим для всех газов. Но в предложении VI мы установили, что когда две группы частиц передают друг другу свое движение, то Mv^2 в каждой из них имеет одно и то же значение. Отсюда следует, что N , число частиц в единице объема, является при равном давлении и равной температуре одинаковым для всех газов. Этот вывод находится в согласии с законом химии, по которому равные объемы газов химически эквивалентны.

Теперь нам следует определить значение l — среднюю длину пути частицы между двумя последовательными столкновениями. Наиболее прямой метод разрешения этой проблемы основан на том факте, что когда два слоя газа скользят один по другому с различными скоростями, то они действуют друг на друга с тангенциальной силой, стремящейся пресечь это скольжение, а также на аналогичном влиянии газа на трение в промежутке между двумя твердыми поверхностями, скользящими одна мимо другой. Согласно нашей гипотезе, объяснение трения газов заключается в том, что частицы, принадлежащие к одному слою газа и обладающие некоторой средней скоростью перемещения, уходят из последнего и вступают в другой слой, обладающий иной скоростью перемещения. Сталкиваясь с частицами газа второго слоя, они воздействуют на них с тангенциальной силой, которая и образует внутреннее трение газа. Все трение между двумя массами газа, отделенными друг от друга плоской поверхностью, зависит от общего действия между всеми слоями, расположенными на одной стороне от этой поверхности, на все слои, расположенные на другой стороне.

Предложение XIII. *Определить внутреннее трение в системе движущихся частиц.*

Пусть система частиц разделена на слои, параллельные плоскости xy , пусть скорость перемещения каждого слоя в направлении x равна u и пусть $u = A + Bz$. Нам следует рассмотреть взаимодействие между слоями, расположенными на положительной и отрицательной сторонах плоскости xy . Определим прежде всего взаимодействие между двумя слоями dz и dz' , расположенными на расстояниях z и z' с противоположных сторон плоскости, причем каждый слой имеет своим основанием единицу площади. Согласно (8), число частиц, которые, исходя из dz в единицу времени, проходят расстояние от nl до $(n + dn)l$, равно

$$N \frac{v}{l} e^{-n} dz dn.$$

Число тех частиц, которые заканчивают свой путь в слое dz' , равно

$$N \frac{v}{2nl^2} e^{-n} dz dz' dn.$$

Средняя скорость по направлению x , которой обладает каждая из этих частиц до столкновения, составляет $A + Bz$, а после столкновения равна $A + Bz'$. Так как масса частицы равна M , то каждая частица сообщает средний импульс $MB(z - z')$. Поэтому все действие, вызванное этими столкновениями, составляет

$$NMB \frac{v}{2nl^2} (z - z') e^{-n} dz dz' dn.$$

Это выражение следует прежде всего проинтегрировать по z' от $z' = 0$ до $z' = z - nl$:

$$\frac{1}{2} NMB \frac{v}{2nl^2} (n^2 l^2 - z^2) e^{-n} dz dn;$$

последнее представляет собой взаимодействие между слоем dz и всеми слоями, лежащими по другую сторону от плоскости xy . Интегрируя его затем от $z = 0$ до $z = nl$, получаем

$$\frac{1}{6} NMBlv n^2 e^{-n} dn.$$

Интегрируя по n от $n = 0$ до $n = \infty$, находим, что все трение между единицами площади, расположенными над плоскостью и под ней, составляет

$$F = \frac{1}{3} MNlvB = \frac{1}{3} \rho lv \frac{du}{dz} = \mu \frac{du}{dz},$$

где μ — обычный коэффициент трения:

$$\mu = \frac{1}{3} \rho lv = \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{Mc}{\pi s^2}. \quad (13)$$

Здесь ρ — плотность, l — средняя длина пути частицы и v — средняя скорость:

$$v = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} = 2\sqrt{\frac{2k}{\pi}}, \quad l = \frac{3}{2} \frac{\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\pi}{2k}}. \quad (14)$$

Профессор Стокс из опытов с воздухом установил, что

$$\sqrt{\mu/\rho} = 0,116.$$

Если мы примем, что $\sqrt{k} = 930$ футов в секунду для воздуха при 60° и что, следовательно, средняя скорость $v = 1505$ футов в секунду, то значение l , среднего расстояния, проходимого частицей между двумя последовательными столкновениями, равно $\frac{1}{447000}$ дюйма и каждая частица испытывает 8 077 200 000 столкновений в секунду.

Уравнение (13) приводит нас к замечательному выводу, который заключается в том, что если изложенное здесь истолкование трения газов правильно, то коэффициент трения не зависит от плотности. Этот вывод из математической теории является крайне поразительным, и единственный опыт, с которым я встретился в этой области, его как будто не подтверждает. Поэтому в ближайшем будущем нам придется сопоставить свою теорию с тем, что известно о диффузии газов и прохождении теплоты через газ⁴. <...>

Динамическая теория электромагнитного поля

ЧАСТЬ I

Введение

3. Та теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией *электромагнитного поля*, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные тела, и она может быть названа также *динамической* теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления.

4. Электромагнитное поле — это та часть пространства, которая содержит в себе и окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии.

Это пространство может быть наполнено любым родом материи, или мы можем попытаться удалить из нее всю плотную материю, как в трубках Гейссlera или в других, так называемых вакуумных трубках. Однако всегда имеется достаточное количество материи для того, чтобы воспринимать и передавать волновые движения света и тепла. И так как передача излучений не слишком сильно изменяется, если так называемый вакуум заменить прозрачными телами с заметной плотностью, то мы вынуждены допустить, что эти волновые движения относятся к эфирной субстанции, а не к плотной материи, присутствие которой только в какой-то мере изменяет движение эфира.

Мы поэтому имеем некоторое основание предполагать, исходя из явлений света и тепла, что имеется какая-то эфирная среда,

заполняющая пространство и пронизывающая все тела, которая обладает способностью приводиться в движение, передавать это движение от одной своей части к другой и сообщать это движение плотной материи, нагревая ее и воздействуя на нее разнообразными способами.

5. Энергия, сообщенная телу нагреванием, должна была ранее существовать в движущейся среде, ибо волновые движения оставили источник тепла за некоторое время до того, как они достигли самого нагреваемого тела, и в течение этого времени энергия должна была существовать наполовину в форме движения среды и наполовину в форме упругого напряжения. Исходя из этих соображений, профессор В. Томсон доказал, что эта среда должна обладать плотностью, сравнимой с плотностью обычной материи, и даже определил нижнюю границу этой плотности.

6. Поэтому мы можем как данное, выведенное из отрасли науки, независимой от той, с которой мы (в рассматриваемом случае) имеем дело, принять существование проникающей среды, обладающей малой, но реальной плотностью и способностью приводиться в движение и передавать движения от одной части к другой с большой, но не бесконечной скоростью.

Следовательно, части этой среды должны быть так связаны, что движение одной части каким-то способом зависит от движения остальных частей, и в то же время эти связи должны быть способны к определенному роду упругого смещения, поскольку сообщение движения не является мгновенным, а требует времени.

Поэтому эта среда обладает способностью получать и сохранять два вида энергии, а именно: «актуальную» энергию, зависящую от движения ее частей, и «потенциальную» энергию, представляющую собой работу, которую среда выполнит вследствие своей упругости, возвращаясь к первоначальному состоянию, после того смещения, которое она испытала.

Распространение колебаний состоит в непрерывном преобразовании одной из этих форм энергии в другую попеременно, и в любой момент энергия во всей среде разделена поровну, так что половина энергии является энергией движения, а другая половина — энергией упругого напряжения.

7. Среда, имеющая такого рода структуру, может быть способна к другим видам движения и смещения, чем те, которые обуславливают явления света и тепла; некоторые из них могут быть таковы, что они воспринимаются нашими чувствами при посредстве тех явлений, которые они производят.

8. Сейчас мы знаем, что светоносная среда в отдельных случаях испытывает действие магнетизма, так как Фарадей открыл, что когда плоскополяризованный луч проходит через прозрачную диамагнитную среду в направлении магнитных силовых линий, образуемых магнитами или токами, то плоскость поляризации начинает вращаться.

Это вращение всегда происходит в том направлении, в котором положительное электричество должно проходить вокруг диа-

магнитного тела для того, чтобы образовать действующее магнитное поле.

Верде с тех пор открыл, что если заменить диамагнитное тело парамагнитным, например раствором треххлористого железа в эфире, то вращение происходит в обратном направлении.

Профессор В. Томсон указал, что никакое распределение сил, действующих между частями какой-либо среды, единственным движением которой является движение световых колебаний, недостаточно для объяснения этих явлений, но что мы должны допустить существование в среде движения, зависящего от намагничивания, в дополнение к тому колебательному движению, которое представляет собой свет.

Совершенно правильно, что вращение плоскости поляризации вследствие магнитного воздействия наблюдалось только в средах, обладающих заметной плотностью. Но свойства магнитного поля не так уж сильно изменяются при замене одной среды другой или вакуумом, чтобы допустить, что плотная среда делает нечто большее, чем простое изменение движения эфира. Мы поэтому имеем законное основание поставить вопрос: не происходит ли движение эфирной среды везде, где бы ни наблюдались магнитные эффекты? Мы имеем некоторое основание предположить, что это движение является движением вращения, имеющим своей осью направление магнитной силы.

9. Мы можем теперь обсудить другое явление, наблюдаемое в электромагнитном поле. Когда тело движется, пересекая линии магнитной силы, оно испытывает то, что называют электродвижущей силой; два противоположных конца тела электризуются противоположно, и электрический ток стремится пройти через тело. Когда электродвижущая сила достаточно велика и действует на некоторые химические сложные тела, она их разлагает и заставляет одну из компонент направляться к одному концу тела, а другую — в противоположную сторону⁵.

В данном случае мы имеем очевидное проявление силы, вызывающей электрический ток вопреки сопротивлению и электризующей концы тела противоположным образом. Это особое состояние тела поддерживается только воздействием электродвижущей силы, и, как только эта сила устраняется, оно стремится с равной и противоположно направленной силой вызывать обратный ток через тело и восстановить его первоначальное электрическое состояние. Наконец, если эта сила достаточно велика, она разлагает химические соединения и перемещает компоненты в двух противоположных направлениях, в то время как их естественной тенденцией является тенденция к взаимному соединению с такой силой, которая может породить электродвижущую силу обратного направления.

Эта сила, следовательно, является силой, действующей на тело вследствие его движения через электромагнитное поле или вследствие изменений, возникающих в самом этом поле. Действие этой силы проявляется или в порождении тока и нагревании

тела, или в разложении тела, или если она не может сделать ни того, ни другого, то в приведении тела в состояние электрической поляризации — состояние вынужденное, при котором концы тела наэлектризованы противоположно и от которого тело стремится освободиться, как только будет удалена возмущающая сила.

10. Согласно предлагаемой мной теории, эта электродвижущая сила является силой, возникающей при передаче движения от одной части среды к другой, так что именно благодаря этой силе движение одной части вызывает движение другой. Когда электродвижущая сила действует вдоль проводящего контура, она производит ток, который в том случае, если он встречает сопротивление, вызывает постоянное превращение электрической энергии в тепло; последнее уже нельзя восстановить в форме электрической энергии каким-либо обращением процесса.

11. Но когда электродвижущая сила действует на диэлектрик, она создает состояние поляризации его частей, которое аналогично поляризации частей массы железа под влиянием магнита и которое, подобно магнитной поляризации, может быть описано как состояние, в котором каждая частица имеет противоположные концы в противоположных состояниях.

В диэлектрике, находящемся под действием электродвижущей силы, мы можем представлять, что электричество в каждой молекуле так смещено, что одна сторона молекулы делается положительно наэлектризованной, а другая — отрицательно наэлектризованной, однако электричество остается полностью связанным с молекулами и не переходит от одной молекулы к другой. Эффект этого воздействия на всю массу диэлектрика выражается в общем смещении электричества в определенном направлении. Это смещение не равноценно току, потому что, когда оно достигает определенной степени, то остается неизменным, но оно есть начало тока и его изменения образуют токи в положительном или отрицательном направлениях сообразно тому, увеличивается или уменьшается смещение. Внутри диэлектрика нет признаков какой-либо электризации, так как электризация поверхности любой молекулы нейтрализуется электризацией поверхности молекулы, находящейся в соприкосновении с ней. На граничной поверхности диэлектрика, где электризация не нейтрализуется, мы обнаруживаем явления, указывающие на положительную или отрицательную электризацию этой поверхности.

Отношение между электродвижущей силой и электрическим смещением, которое она вызывает, зависит от природы диэлектрика, причем та же самая электродвижущая сила обычно производит большее электрическое смещение в твердых диэлектриках, например в стекле или сере, чем в воздухе.

12. Здесь, таким образом, мы усматриваем еще один эффект электродвижущей силы, а именно электрическое смещение, которое, согласно нашей теории, является некоторым родом упругой податливости действию силы, похожей на ту, которая имеется в сооружениях и машинах из-за неполной жесткости связей

13. Практическое исследование индуктивной емкости диэлектриков⁶ делается затруднительным вследствие двух мешающих явлений. Первое заключается в проводимости диэлектрика, которая, будучи во многих случаях исключительно малой, тем не менее не является совершенно неощутимой. Второе — явление, называемое электрической абсорбцией и состоящее в том, что, когда диэлектрик подвергается воздействию электродвижущей силы, электрическое смещение постепенно увеличивается, а если электродвижущая сила устраняется, диэлектрик не возвращается моментально в свое первоначальное состояние, но разряжает только часть сообщенной ему электризации и, предоставленный самому себе, постепенно приобретает электризацию на своей поверхности, тогда как внутренность диэлектрика постепенно деполаризуется. Почти все твердые диэлектрики обнаруживают это явление, которое объясняет остаточный заряд лейденской банки и некоторые явления в электрических кабелях, описанных Ф. Дженкином.

14. Мы встречаемся здесь с двумя другими родами податливости, отличными от упругости идеального диэлектрика, которую мы сравнивали с идеально упругим телом. Податливость, относящуюся к проводимостям, можно сравнить с податливостью вязкой жидкости (иначе говоря, жидкости, имеющей большое внутреннее трение) или мягкого тела, в котором малейшая сила производит постоянное изменение формы, увеличивающееся вместе со временем действия силы. Податливость, связанная с явлением электрической абсорбции, может быть сравнена с податливостью упругого тела клеточной структуры, содержащего густую жидкость в своих полостях. Такое тело, подвергнутое давлению, сжимается постепенно, а когда давление устраняется, тело не сразу принимает свою прежнюю форму, потому что упругость материи тела должна постепенно преодолеть вязкость жидкости, прежде чем восстановится полное равновесие. Некоторые твердые тела, хотя и не имеют той структуры, о которой мы говорили выше, обнаруживают механические свойства такого рода*, и вполне возможно, что эти же самые вещества в качестве диэлектриков обладают аналогичными электрическими свойствами, а если они являются магнитными веществами, то обладают соответствующими свойствами, относящимися к приобретению, удерживанию и потере магнитной полярности.

15. Поэтому кажется, что некоторые явления электричества и магнетизма приводят к тем же заключениям, как и оптические явления, а именно: что имеется эфирная среда, проникающая во все тела и изменяемая только в некоторой степени их присутствием; что части этой среды обладают способностью быть приведенными в движение электрическими токами и магнитами; что

* Как, например, состав из клея, патоки и т. п., из которого делаются небольшие пластические фигурки, которые, будучи деформированы, лишь постепенно приобретают свои первоначальные очертания.

это движение сообщается от одной части среды к другой при помощи сил, возникающих от связей этих частей; что под действием этих сил возникает определенное смещение, зависящее от упругости этих связей, и что вследствие этого энергия в среде может существовать только в двух различных формах, одна из которых является актуальной энергией движения частей среды, а другая — потенциальной энергией, обусловленной связями частей в силу их упругости.

16. Отсюда мы приходим к концепции сложного механизма, способного к обширному разнообразию движений, но в то же самое время связанного так, что движение одной части зависит, согласно определенным отношениям, от движения других частей, причем эти движения сообщаются силами, возникающими из относительного смещения связанных между собой частей вследствие упругости связей. Такой механизм должен подчиняться общим законам динамики, и мы должны вывести все следствия этого движения, предполагая, что известна форма отношения между движениями частей. (...)

ЧАСТЬ III

Общие уравнения электромагнитного поля

70. В эти уравнения электромагнитного поля входят 20 переменных величин, а именно⁸:

Для электромагнитного количества движения	F, G, H
» магнитной интенсивности [напряженности]	α, β, γ
» электродвижущей силы	P, Q, R
» тока, обусловленного (истинной) проводимостью	p, q, r
» электрического смещения	f, g, h
» полного тока (включая изменения смещения)	p', q', r'
» количества свободного электричества	e
» электрического потенциала	ψ

Между этими 20-ю переменными величинами мы нашли 20 уравнений, а именно:

Три уравнения магнитной силы	(B)
» » электрических токов	(C)
» » электродвижущей силы	(D)
» » электрической упругости	(E)
» » электрического сопротивления	(F)
» » полных токов	(A)
Одно уравнение свободного электричества	(G)
» » непрерывности	(H)

Этих уравнений, следовательно, достаточно⁹, чтобы определить все величины, встречающиеся в них, если только мы знаем условия задачи. Во многих вопросах, однако, требуются только некоторые из этих уравнений.

73. Я имел уже прежде случай¹⁰ попытаться описать особый вид движения и особый вид напряжения, приспособленные для

объяснения этих явлений. В настоящем докладе я избегаю какой-либо гипотезы такого рода и, пользуясь такими словами, как электромагнитное количество движения и электрическая упругость в отношении известных явлений индукции токов и поляризации диэлектриков, я хочу только направить мысль читателя на механические явления, которые могут помочь ему понять электрические явления. Все подобные выражения в настоящей статье должны рассматриваться как иллюстративные, а не как объясняющие.

74. Однако, говоря об энергии поля, я хочу быть понятным буквально. Всякая энергия есть то же, что механическая энергия, существует ли она в форме обычного движения, или в форме упругости, или в какой-нибудь другой форме. Энергия в электромагнитных явлениях — это механическая энергия. Единственный вопрос заключается в том, где она находится¹¹.

Согласно старым теориям, она находится в наэлектризованных телах, проводящих цепях и магнитах в форме неизвестного качества, называемого потенциальной энергией или способностью производить определенные действия на расстоянии. По нашей теории, она находится в электромагнитном поле, в пространстве, окружающем наэлектризованные и намагниченные тела, а также и в самых этих телах и проявляется в двух различных формах, которые могут быть описаны без гипотез как магнитная поляризация и электрическая поляризация или, согласно весьма вероятной гипотезе, как движение и напряжение одной и той же среды.

75. Заключение, к которым мы пришли в настоящем докладе, независимы от этой гипотезы, так как они выделены из экспериментальных фактов тройякого рода:

1) индукция электрических токов путем увеличения или уменьшения силы соседних токов сообразно изменениям в силовых линиях, пронизывающих контур;

2) распределение магнитной напряженности сообразно изменениям магнитного потенциала;

3) индукция (или влияние) статического электричества через диэлектрики.

Теперь, исходя из этих принципов, мы можем приступить к доказательству существования и нахождению законов механических сил, действующих на электрические токи, магниты и наэлектризованные тела, помещенные в электромагнитное поле. (...)

ЧАСТЬ VI

Электромагнитная теория света

91. В начале этого доклада мы пользовались оптической гипотезой упругой среды, через которую распространяются колебания света, чтобы показать, что мы имеем серьезные основания искать в этой же среде причину других явлений в той же мере, как и причину световых явлений. Мы рассмотрели электромагнитные

явления, пытаюсь их объяснить свойствами поля, окружающего наэлектризованные или намагниченные тела. Таким путем мы пришли к определенным уравнениям, выражающим определенные свойства электромагнитного поля. Мы исследуем теперь, являются ли свойства того, что составляет электромагнитное поле, которые выведены только из электромагнитных явлений, достаточными для объяснения распространения света через ту же самую субстанцию.

92. Предположим, что плоская волна, направляющие косинусы которой равны l, m, n , распространяется через поле со скоростью V . Тогда все электромагнитные функции будут функциями от $w = lx + my + nz - Vt$. Уравнения магнитной силы (B) примут вид

$$\mu\alpha = m \frac{dH}{dw} - n \frac{dG}{dw},$$

$$\mu\beta = n \frac{dF}{dw} - l \frac{dH}{dw},$$

$$\mu\gamma = l \frac{dG}{dw} - m \frac{dF}{dw}.$$

Если мы умножим эти уравнения соответственно на l, m, n и сложим, то найдем

$$l\mu\alpha + m\mu\beta + n\mu\gamma = 0. \quad (62)$$

Следовательно, направление намагничивания должно находиться в плоскости волны.

93. Если мы скомбинируем уравнения магнитной силы (B) с уравнениями электрических токов (C) и положим для краткости

$$\frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} = I, \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \nabla^2, \quad (63)$$

то получим

$$\begin{aligned} 4\pi\rho' &= \frac{dI}{dx} - \nabla^2 F, \\ 4\pi q' &= \frac{dI}{dy} - \nabla^2 G, \\ 4\pi r' &= \frac{dI}{dz} - \nabla^2 H. \end{aligned} \quad (64)$$

Если среда в поле является идеальным диэлектриком, то там не может быть истинной проводимости и токи ρ', q', r' являются только изменениями электрического смещения, или, согласно уравнениям полных токов (A),

$$\rho' = \frac{dI}{dt}, \quad q' = \frac{dG}{dt}, \quad r' = \frac{dH}{dt}. \quad (65)$$

Но эти электрические смещения производятся электродвижущими силами и, по уравнениям электрической упругости (E),

$$P = kf, \quad Q = kg, \quad R = kh. \quad (66)$$

Эти электродвижущие силы обусловлены изменениями электромагнитных или электростатических функций, так как в поле нет движущихся проводников. Таким образом, уравнения электродвижущей силы (D) будут

$$P = -\frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx}, \quad Q = -\frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy}, \quad R = -\frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}. \quad (67)$$

94. Комбинируя эти уравнения, мы получаем

$$\begin{aligned} k\left(\frac{dI}{dx} - \nabla^2 F\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2 F}{dt^2} + \frac{d^2 \psi}{dx dt}\right) &= 0, \\ k\left(\frac{dI}{dy} - \nabla^2 G\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2 G}{dt^2} + \frac{d^2 \psi}{dy dt}\right) &= 0, \\ k\left(\frac{dI}{dz} - \nabla^2 H\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2 H}{dt^2} + \frac{d^2 \psi}{dz dt}\right) &= 0. \end{aligned} \quad (68)$$

Если продифференцировать третье из этих уравнений по y , а второе — по z и вычесть одно из другого, то I и ψ исчезнут и, принимая во внимание уравнения (B) магнитной силы, результат можно написать следующим образом:

$$\begin{aligned} k\nabla^2 \mu\alpha &= 4\pi\mu \frac{d^2}{dt^2} \mu\alpha, \\ k\nabla^2 \mu\beta &= 4\pi\mu \frac{d^2}{dt^2} \mu\beta, \\ k\nabla^2 \mu\gamma &= 4\pi\mu \frac{d^2}{dt^2} \mu\gamma. \end{aligned} \quad (69)$$

95. Если мы допустим, что α , β , γ являются функциями $lx + my + nz - Vt = w$, то первое уравнение примет вид

$$k\mu \frac{d^2 \alpha}{dw^2} = 4\pi\mu^2 V^2 \frac{d^2 \alpha}{dw^2}, \quad (70)$$

или

$$V = \pm \sqrt{k/4\pi\mu}. \quad (71)$$

Другие уравнения дадут то же самое значение для V , так что волна будет распространяться в любом направлении со скоростью V .

Эта волна состоит полностью из магнитных возмущений, причем направление намагничения находится в плоскости волны. Никакое магнитное возмущение, направление намагничения которого не находится в плоскости волны, вообще не может распространяться как плоская волна.

Отсюда магнитные возмущения, распространяющиеся через электромагнитное поле, сходятся со светом в том отношении, что возмущения в любой точке поперечны к направлению распространения и такие волны могут обладать всеми свойствами поляризованного света.

96. Единственной средой, в которой производились опыты для определения значения k , был воздух, в котором μ равно единице, откуда по уравнению (46) имеем

$$V = v. \quad (72)$$

Согласно электромагнитным опытам Вебера и Кольрауша,

$$v = 310\,740\,000 \text{ м/с}$$

является количеством электростатических единиц в одной электромагнитной единице электричества, и это, согласно нашему результату, должно быть равно скорости света в воздухе или вакууме.

Скорость света в воздухе по опытам Физо равна $V = 314\,858\,000 \text{ [м/с]}$, а согласно более точным опытам Фуко, $V = 298\,000\,000 \text{ [м/с]}$.

Скорость света в пространстве, окружающем Землю, выведенная из коэффициента аберрации и из радиуса земной орбиты, равна $V = 308\,000\,000 \text{ [м/с]}$.

97. Следовательно, скорость света, определенная экспериментально, достаточно хорошо совпадает с величиной v , выведенной из единственного ряда экспериментов, которыми мы до сих пор располагаем. Значение v было определено путем измерения электродвижущей силы, используемой для зарядки конденсатора известной емкости, который затем разряжается через гальванометр, чтобы выразить количество электричества в нем в электромагнитных единицах. Единственным применением света в этих опытах было использование его для того, чтобы видеть инструменты. Значение V , найденное Фуко, было получено путем определения угла, на который поворачивается вращающееся зеркало, пока отраженный им свет прошел туда и обратно вдоль измеренного пути. При этом не пользовались каким-либо образом электричеством и магнетизмом. Совпадение результатов, по-видимому, показывает, что свет и магнетизм являются проявлениями свойств одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через поле в соответствии с законами электромагнетизма. {...}

100. Уравнения электромагнитного поля, выведенные из чисто экспериментальных фактов, показывают, что могут распространяться только поперечные колебания. Если выйти за пределы нашего экспериментального знания и предположить определенную плотность субстанции, которую мы могли бы назвать электрической жидкостью, и выбрать стеклянное или смоляное электричество в качестве представителей этой жидкости, тогда мы могли бы иметь продольные колебания, распространяющиеся

со скоростью, зависящей от этой плотности. Однако мы не имеем никаких данных, относящихся к плотности электричества, и мы даже не знаем, считать ли нам стекляннное электричество субстанцией или отсутствием субстанции.

Следовательно, наука об электромагнетизме ведет к совершенно таким же заключениям, как и оптика в отношении направления возмущений, которые могут распространяться через поле; обе эти науки утверждают поперечность этих колебаний и обе дают ту же самую скорость распространения. С другой стороны, обе науки бессильны, когда к ним обращаются с вопросом о подтверждении или отрицании существования продольных колебаний.

Комментарий

Перевод с английского доклада «Пояснения к динамической теории газов» выполнен В. С. Гохманом. Название на языке оригинала: *Illustrations on the dynamical theory of gases*. Отрывки из доклада публикуются по изданию: Основатели кинетической теории материи. Сб. ст. под ред. А. К. Тимирязева. М. — Л., 1937.

Перевод с английского статьи «Динамическая теория электромагнитного поля» выполнен З. А. Цейтлиным. Название на языке оригинала: *A dynamical theory of the electromagnetic field*. Отрывки из статьи публикуются по изданию: Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., 1954.

¹ Это положение впоследствии подвергалось критике, основательность которой признал и сам Максвелл. Оно представляет самое уязвимое место данного вывода распределения молекул по скоростям. В настоящее время закон Максвелла доказывается более строго.

² Приведенное выражение можно получить следующим образом. На сфере радиуса nl строим кольцо $2\pi nl \sin\theta n l d\theta$, после интегрирования в пределах от θ до θ_1 имеем $2\pi n^2 l^2 [1 - \cos\theta_1]$, величина же $\cos\theta_1 = z/(nl)$. Подставив это значение $\cos\theta_1$ и разделив на величину поверхности сферы $4\pi n^2 l^2$, находим (9).

³ Среднее значение $\cos\theta$ для частиц (9) получается умножением $v \cos\theta$ на $1/2 \sin\theta d\theta$, интегрированием от 0 до θ_1 (см. предыдущее примечание) полу-

чаем $\frac{1}{4} v [1 - \cos\theta_1] = \frac{1}{4} v \left[1 - \frac{z^2}{n^2 l^2} \right]$, а разделив это выражение на (9), т. е. на общее число частиц этого сорта, находим выражение (10).

⁴ Этот вывод, показавшийся Максвеллу парадоксальным, в дальнейшем блестящим образом подтвердился на опыте.

⁵ Максвелл придерживается здесь еще старой точки зрения о разложении электролитов электрическим полем, которая была подвергнута критике Клаузиусом в 1857 г.

Терминами удельная «индуктивная» или «диэлектрическая» емкость Максвелл обозначает то, что сейчас называют диэлектрической проницаемостью диэлектрика.

Эта особенность метода Максвелла — механические модели для уяснения электромагнитных взаимосвязей — нередко вызвала осуждение в первую очередь среди сторонников «чистого описания». Метод построения моделей вполне законен и широко применялся и применяется в теоретической физике, помогая глубже раскрыть природу изучаемых взаимосвязей.

Приведем систему уравнений, описанную Максвеллом в п. 54—69 этого раздела, на которую он здесь ссылается.

Уравнения магнитной силы

$$\begin{aligned}\mu\alpha &= \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}, \quad \mu\beta = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx}, \\ \mu\gamma &= \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}.\end{aligned}\quad (B)$$

Уравнения электрических токов

$$\begin{aligned}\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} &= 4\pi\rho', \quad \frac{dz}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} = 4\pi q', \\ \frac{d\beta}{dx} - \frac{dz}{dy} &= 4\pi r'.\end{aligned}\quad (C)$$

Уравнения электродвижущей силы

$$\begin{aligned}P &= \mu \left(\gamma \frac{dy}{dt} - \beta \frac{dz}{dt} \right) - \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx}, \\ Q &= \mu \left(\alpha \frac{dz}{dt} - \gamma \frac{dx}{dt} \right) - \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy}, \\ R &= \mu \left(\beta \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}.\end{aligned}\quad (D)$$

Уравнения электрической упругости

$$P = kf, \quad Q = kg, \quad R = kh. \quad (E)$$

Отметим, что из основного максвелловского соотношения для электрического смещения $D(f, g, h) =$

$= \frac{1}{4\pi} E(P, Q, R)$ видно, что входящий в уравнения

(E) коэффициент $k = 4\pi/\epsilon$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Уравнения электрического сопротивления

$$P = -\rho p, \quad Q = -\rho q, \quad R = -\rho r. \quad (F)$$

Уравнения (F) представляют собой закон Ома для тока. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что Максвелл стремится выразить этот закон в форме своеобразной силы вязкости. Электрическое поле уравновешивает силу сопротивления, пропорциональную скорости, причем роль скорости играет вектор полного тока. Отсюда и отрицательный знак в формулах.

Уравнения полных токов

$$p' = p + \frac{df}{dt}, \quad q' = q + \frac{dg}{dt}, \quad r' = r + \frac{dh}{dt}. \quad (A)$$

Уравнение свободного электричества

$$\epsilon + \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0. \quad (G)$$

Это известное уравнение Пуассона $\text{div} \vec{D} = 4\pi e$, где e (у Максвелла обозначенное через ϵ) — объемная плотность электричества.

Уравнение непрерывности

$$\frac{de}{dt} + \frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0. \quad (H)$$

Максвелл не дает отдельно уравнения $\text{div} \vec{B} = 0$, так как оно автоматически следует из уравнений (B). Уравнения электромагнитного поля (B) — (H) не совпадают полностью с современной их формой, которая была дана впервые Герцем (1884) и независимо от него Хевисайдом (1885).

Речь идет о работе Максвелла «О физических силовых линиях».

- 11 Максвелл, указывая на вспомогательный, иллюстративный характер механических образов в электродинамике, настаивает, однако, на полной применимости понятия энергии, как кинетической, так и потенциальной, к электрическому полю, причем эта энергия, по Максвеллу, в отличие от старых теорий локализована в поле.

Литература

- [1] Основные научные сочинения Дж. К. Максвелла:
 - a) Maxwell J. C. The Scientific Papers. Vols. 1—2. Cambridge, 1890;
 - b) Maxwell J. C. A treatise on electricity and magnetism, vols. 1—2, Oxford, 1873.
- [2] Карцев В. П. Максвелл. М., 1976.
- [3] Кудрявцев П. С. Максвелл. М., 1956.



Н. А. Умов

1846—1915

О движении энергии

Открытие закона сохранения энергии явилось одним из высших достижений физики XIX в. Уже в знаменитой работе Г. Гельмгольца «О сохранении силы» была доказана эвристическая мощь этого закона, позволяющего с единых позиций рассмотреть явления, относящиеся к различным разделам физики. В дальнейшем идея сохранения энергии была развита в работах других физиков. Однако освоение обобщенного понятия энергии встречало немалые трудности. В частности, дискуссии развернулись вокруг понятия «потенциальная энергия». Суть проблемы можно понять из высказывания А. Пуанкаре: «Чтобы материализовать энергию, ее нужно локализовать; в отношении кинетической энергии это просто, но не так дело обстоит с энергией потенциальной. Где локализовать потенциальную энергию, вызванную притяжением двух небесных тел? В одном из двух? В обоих? В промежуточном пространстве?» Уточнению многих вопросов, связанных с энергетическими процессами, в значительной мере способствовало исследование русского физика Н. А. Умова, в котором впервые был поставлен вопрос о движении самой энергии.

Николай Алексеевич Умов родился 4 февраля 1846 г. в Симбирске в семье военного врача. Отец проявлял большую заботу об образовании детей, и Николай и его брат получили хорошую домашнюю подготовку. Гимназию Умов закончил в Москве в 1863 г. и в том же году поступил на математическое отделение физико-математического факультета Московского университета. В 1867 г. он окончил университет со степенью кандидата и был оставлен для подготовки к профессорскому званию. Примерно в это же время начинается преподавательская деятельность Умова в женской гимназии и народной школе.

В 1869 г. Умов стал доцентом Новороссийского (Одесского) университета по кафедре физики. С этим учебным заведением связаны последующие двадцать лет жизни ученого. В это время были выполнены его важнейшие теоретические исследования. В 1871 г. он защитил магистерскую диссертацию «Теория термомеханических явлений в твердых упругих телах», а в 1874 г. — докторскую диссертацию «Уравнения движения энергии в телах».

В середине 70-х годов Умов решил задачу о распределении электрических токов на поверхности произвольного типа. Эти работы Умова были с интересом восприняты зарубежными учеными, с которыми он познакомился во время поездки в Германию, Францию и Англию.

В 1893 г. Умов вернулся в Москву и начал читать курс теоретической физики в университете. После смерти А. Г. Столетова в 1896 г. он возглавил кафедру физики. Вместе с П. Н. Лебедевым Умов принял деятельное участие в составлении проекта и постройки здания Физического института университета, в котором он заведовал физическим кабинетом и имел небольшую лабораторию. Будучи талантливым теоретиком, Умов живо интересовался физическим экспериментом и сам ставил опыты. В Москве он провел цикл исследований по хроматической депolarизации рассеянного света. В 1900-е годы Умов проводит глубокий анализ сложных формул Гаусса в теории земного магнетизма, что позволило определить вековые изменения магнитного поля Земли.

На протяжении всей жизни Умов активно участвовал в общественной жизни. Он был организатором ряда просветительских обществ, в течение 17 лет избирался президентом Московского общества испытателей природы, редактировал научно-популярные журналы. Умов часто выступал с пропагандой научных знаний. Успеху просветительской деятельности Умова способствовал его талант педагога. Лекции Умова в университете непременно собирали обширную аудиторию. Для характеристики Умова как ученого и человека следует добавить, что он живо откликался на достижения физической науки начала XX в., был одним из первых русских ученых, кто оценил значение теории относительности. Высокая гражданская позиция Умова проявилась в его уходе вместе с группой ведущих профессоров из Московского университета (1911) в знак протеста против реакционных действий царского министра просвещения Кассо. Н. А. Умов умер 28 января 1915 г.

Научное творчество Умова и судьба его работ отражает состояние физической науки в России в конце XIX — начале XX вв. Теоретическую физику Умов изучал самостоятельно по трудам Г. Ламе, Р. Клебша и Р. Клаузиуса — в русских университетах такого курса до Умова не читали. Отсюда происходил и интерес к проблемам механики и термодинамики, характерный для первых работ ученого. Самообразование во многом определило независимость и оригинальность суждений и идей Умова. Это прежде всего относится к его работе «Уравнение движения энергии в телах», в которой впервые были введены такие понятия, как плотность энергии в данной точке среды, поток энергии, представления о направлении и скорости движения энергии. Сам Умов, однако, не обобщил эти понятия на другие виды энергии, ограничившись подробным рассмотрением движения энергии в упругих телах. В 1884 г. понятие о потоке

электромагнитной энергии было введено английским физиком Дж. Пойнтингом, который ввел для описания распространения энергии вектор, называемый ныне «вектором Умова—Пойнтинга». Причина, по которой Умов не развил свои идеи в более общем виде, возможно, связана с тем, что в период подготовки докторской диссертации Умовым идеи теории Максвелла еще не стали общепринятыми. Кроме того, могло сказаться и отсутствие питательной научной среды, способной оценить эти идеи. Серьезная школа теоретической физики сложилась в России лишь после Октябрьской революции.

Уравнения движения энергии в телах

1. Общее выражение закона сохранения энергии в элементе объема среды

§ 1. Определения и задачи исследования. Элемент объема, произвольно взятый внутри какой-нибудь среды, частицы которой находятся в движении, включает в данный момент времени определенное количество энергии. Эта энергия складывается из двух частей: из живой силы движения частиц элемента объема и потенциальной энергии, т. е. работы, которая может быть отдана этими частицами при возвращении их из данного положения в некоторое начальное, соответствующее устойчивому равновесию. Под энергией элемента я буду разумею сумму живых сил частиц элемента и его потенциальной энергии, определенной, как было сказано выше.

Законы перехода энергии с одного элемента среды на другой определялись до сих пор только для частных форм движений. Задача настоящего труда заключается в установлении на общих началах учения о движении энергии в средах.

Раскрытие общей связи между распределением и движением энергии в средах и перемещениями их частиц независимо от частных форм движений должно дать возможность из известных законов движения и распределения энергии в теле выводить заключения о роде движений его частиц. Задачи подобного рода имеют важность ввиду стремления современной физики сводить все явления природы на явления движения.

Простейшие опытные данные, на которые могли бы опереться теоретические изыскания современной физики, идущие в указанном направлении, представляют распределения и движения энергии в различных явлениях природы. Орудия опытного исследования не настолько, однако, усовершенствованы, чтобы давать возможность определять законы каждой из составных частей энергии в отдельности. Поэтому важно отыскать метод, который позволил бы перейти из определенных путем опыта законов

движения энергии к дифференциальным уравнениям движения частиц тела, которое, по предположению, дает место наблюдаемому явлению.

§ 2. Уравнение сохранения энергии в элементе тела. Представим себе однородную среду с определенными границами, конечными или бесконечно большими. Пусть на частицы этой среды не действуют внешние силы и прилив энергии к частицам обуславливается принятием или отдачей энергии средой через ее границы.

Если мы выделим мысленно элемент объема, изменение его энергии (т. е. суммы его живой силы и потенциальной энергии) по закону сохранения энергии может совершиться только за счет прибыли или убыли последней в смежных элементах. Математическое выражение связи приращения количества энергии в элементе объема с ее потерями в смежных элементах и будет математическим выражением элементарного закона сохранения энергии в средах.

Математическое выражение указанной связи может быть нами почерпнуто из явления иного рода, опирающегося на закон, аналогичный закону сохранения энергии. Распределение вещества при движениях непрерывной сжимаемой среды подчиняется закону сохранения вещества. Насколько движение энергии и движение сжимаемого вещества обуславливаются законом их сохранения, настолько мы имеем право уподоблять движение энергии движению подвижного и сжимаемого вещества.

Количество энергии в элементе объема среды, отнесенное к единице объема, может быть названо плотностью энергии в данной точке среды.

Мы можем следить за изменениями, происходящими в количестве энергии и ее скоростях в одной и той же точке пространства или же в одном и том же движущемся количестве [массе] энергии.

Обозначим $\mathcal{E}$ плотность энергии в произвольной точке среды, т. е. частное из количества энергии, заключенного внутри бесконечно малого элемента объема, на этот элемент. Назовем через l_x , l_y , l_z слагающие по прямоугольным осям координат x , y и z скорости, с которой энергия движется в рассматриваемой точке среды.

Вообразим себе элемент объема $dx dy dz$. При введенных нами обозначениях количества энергии, входящие и выходящие через различные стороны элемента, будут: -
через сторону $dy dz$ и ей параллельную

$$\mathcal{E} l_x dy dz \text{ и } -(\mathcal{E} l_x + \frac{\partial \mathcal{E} l_x}{\partial x} dx) dy dz;$$

через сторону $dx dz$ и ей параллельную

$$\mathcal{E} l_y dx dz \text{ и } -(\mathcal{E} l_y + \frac{\partial \mathcal{E} l_y}{\partial y} dy) dx dz;$$

через сторону $dydz$ и ей параллельную

$$\mathcal{E}l_z dx dy \text{ и } -\left(\mathcal{E}l_x + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} dz\right) dx dy.$$

Сумма этих величин, представляющих токи энергии, дает нам отнесенное к единице времени изменение количества энергии $\mathcal{E} dx dy dz$ в элементе объема с временем t . Следовательно, делая сокращения, имеем

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \frac{\partial \mathcal{E}l_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E}l_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{E}l_z}{\partial z}. \quad (1)$$

Здесь $\partial \mathcal{E} / \partial t$ есть частная производная от $\mathcal{E}$ по времени. Выражение (1), аналогичное с выражением закона сохранения вещества в гидродинамике, есть выражение элементарного закона сохранения энергии в телах.

Означая через $d\mathcal{E}/dt$ полную производную от $\mathcal{E}$ по времени, мы находим следующее выражение для изменения плотности энергии с временем в одной и той же движущейся массе энергии:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} l_x + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial y} l_y + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} l_z. \quad (2)$$

Соединяя выражение (2) с (1), находим

$$-\frac{l}{\mathcal{E}} \frac{d\mathcal{E}}{dt} = \frac{\partial l_x}{\partial x} + \frac{\partial l_y}{\partial y} + \frac{\partial l_z}{\partial z}. \quad (1')$$

Аналогия между дифференциальными законами движения энергии и движения вещества вообще не простирается далее сходства уравнений (1) и (1') с соответствующими уравнениями гидродинамики.

Выражение (1) открывает связь между количеством энергии, отнесенным к единице времени, втекающим в среду через ее границы и изменением количества энергии в среде. Мы находим

$$\iiint \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} dx dy dz + \iint \mathcal{E} l_n d\sigma = 0, \quad (3)$$

где тройной интеграл распространяется на весь объем среды, $d\sigma$ представляет элемент ее границы и l_n есть скорость движения энергии по внешней нормали n к элементу границы, т. е.

$$l_n = l_x \cos(nx) + l_y \cos(ny) + l_z \cos(nz). \quad (4)$$

§ 3. Связь законов движения энергии с законами частичных движений сред. Дифференциальные законы движений частиц различных сред дают, как известно, возможность установить математическое выражение, представляющее закон сохранения энергии для всей среды. Если через δJ обозначим приращение живой силы в элементе объема среды, через δW — приращение работы частичных сил элемента и через δL — приращение работы давлений на элементе $d\sigma$ поверхности тела, причем все эти приращения отнесены к единице времени, мы всегда имеем воз-

можность по основным дифференциальным законам движений частиц среды составить следующее выражение, причем предполагается, что внешние силы не действуют на частицы среды:

$$\iiint (\delta J + \delta W) d\omega + \iint \delta L d\sigma = 0. \quad (5)$$

В этом выражении $d\omega$ представляет элемент объема среды, тройной интеграл распространяется на всю среду, а двойной — на ее поверхность. Выражение (5) представляет не что иное, как закон сохранения энергии для всей среды.

Для данной среды подобное выражение может быть составлено еще другим образом исходя из уравнения (1). Умножим обе части этого уравнения на элемент объема $d\omega$ и интегрируя на всю среду, мы находим

$$\iiint \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} d\omega + \iiint \left[\frac{\partial (\mathcal{E} l_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\mathcal{E} l_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\mathcal{E} l_z)}{\partial z} \right] d\omega = 0, \quad (6)$$

или, преобразовывая второй тройной интеграл,

$$\iiint \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} d\omega + \iint \mathcal{E} l_x d\sigma = 0. \quad (7)$$

Тройной интеграл, входящий в это выражение, представляющее закон сохранения энергии для всей среды, должен быть тождествен с тройным интегралом, входящим в выражение (5). Но двойной интеграл, входящий в выражение (7), преобразуется во второй тройной интеграл выражения (6); следовательно, и двойной интеграл, входящий в выражение (5), должен преобразовываться в тройной интеграл, тождественный со вторым тройным интегралом, входящим в выражение (6). Математическое выражение этого тождества и приводит к выражениям, связывающим законы движения и распределения энергии с частичными движениями сред.

II. Уравнения движения энергии в различных телах

§ 4. Уравнения движения энергии в твердых телах постоянной упругости. Обозначим через u , v , w перемещения по осям прямоугольных координат центра тяжести элемента объема, через p_{xx} , p_{yy} , p_{zz} — нормальные и через p_{xy} , p_{yz} , p_{xz} — тангенциальные силы упругости, действующие на стороны бесконечно малого параллелепипеда (причем натяжения принимаются положительными, а давления — отрицательными), и через ρ — плотность в какой-нибудь точке среды. Полагая, далее,

$$\delta u = \frac{du}{dt} = u', \quad \delta v = \frac{dv}{dt} = v', \quad \delta w = \frac{dw}{dt} = w', \quad (8)$$

мы найдем следующее выражение закона сохранения энергии для всего упругого тела:

$$\begin{aligned} & \iiint \left[-\frac{\rho}{2} \delta(u'^2 + v'^2 + w'^2) d\omega + \iiint \left[p_{xx} \frac{\partial \delta u}{\partial x} + p_{yy} \frac{\partial \delta v}{\partial y} + p_{zz} \frac{\partial \delta w}{\partial z} + \right. \right. \\ & + p_{yz} \left(\frac{\partial \delta v}{\partial z} + \frac{\partial \delta w}{\partial y} \right) + p_{xz} \left(\frac{\partial \delta w}{\partial x} + \frac{\partial \delta u}{\partial z} \right) + p_{xy} \left(\frac{\partial \delta u}{\partial y} + \frac{\partial \delta v}{\partial x} \right) \Big] d\omega - \\ & - \iint \left[\delta u [p_{xx} \cos(nx) + p_{xy} \cos(ny) + p_{xz} \cos(nz)] + \right. \\ & + \delta v [p_{xy} \cos(nx) + p_{yy} \cos(ny) + p_{yz} \cos(nz)] + \\ & \left. + \delta w [p_{xz} \cos(nx) + p_{yz} \cos(ny) + p_{zz} \cos(nz)] \right] d\sigma = 0. \quad (9) \end{aligned}$$

Первые два тройных интеграла представляют приращение энергии, отнесенное к единице времени, во всей упругой среде. Двойной интеграл распространяется на всю поверхность среды и представляет работу внешних давлений. Мы опускаем действие внешних сил на элементы упругой среды. Обращая внимание на значение величин δu , δv и δw по формуле (8), мы замечаем, что двойной интеграл выражения (9) преобразуется в следующий тройной интеграл:

$$\begin{aligned} & \iiint \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (p_{xx} u' + p_{xy} v' + p_{xz} w') + \frac{\partial}{\partial y} (p_{xy} u' + p_{yy} v' + p_{yz} w') + \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} (p_{xz} u' + p_{yz} v' + p_{zz} w') \right\} d\omega. \quad (10) \end{aligned}$$

Так как первые два тройных интеграла выражения (9) тождественны с первым тройным интегралом выражения (6), то двойной интеграл, входящий в выражение (9), взятый с тем знаком, с которым он входит в это выражение, или тождественный с ним тройной интеграл (10), взятый с отрицательным знаком, должен быть тождествен со вторым тройным интегралом, входящим в выражение (6).

Следовательно, подынтегральная функция тройного интеграла (10), взятая с отрицательным знаком, должна быть тождественна подынтегральной функции второго тройного интеграла выражения (6), или, что все равно, второй части уравнения (1). Это заключение легко проверяется при помощи основных уравнений упругости, дающих возможность преобразовать сумму подынтегральных функций первых двух тройных интегралов, входящих в выражение (9), тождественную с $\partial \mathcal{E} / \partial t$, в отрицательную подынтегральную функцию выражения (10). Из тождества этой последней со второй частью уравнения (1) вытекают следующие равенства:

$$\begin{aligned} -\mathcal{E}_x &= p_{xx} u' + p_{xy} v' + p_{xz} w', \\ -\mathcal{E}_y &= p_{xy} u' + p_{yy} v' + p_{yz} w', \\ -\mathcal{E}_z &= p_{xz} u' + p_{yz} v' + p_{zz} w', \end{aligned} \quad (11)$$

откуда заключаем: количество энергии, протекающее через бесконечно малый плоский элемент в бесконечно малое время, равно отрицательной работе сил упругости, действующих на этот элемент.

Найденные выражения (11) представляют связь законов движения энергии с законами частичных движений твердого тела постоянной упругости. К правым частям этих выражений не прибавлены функции, зависящие только от координат (y, z) , (z, x) , (x, y) , ибо левые части должны обращаться в нуль, когда $u' = v' = w' = 0$.

§ 5. Для выяснения найденных нами заключений приложим формулы (10) к определению скорости распространения в упругой среде плоских волн с продольными и поперечными колебаниями.

Рассмотрим колебания продольные. Пусть несущие их плоские волны перпендикулярны оси x . Следовательно,

$$v = 0, \quad w = 0. \quad (12)$$

Положим, кроме того,

$$u = A \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{\Omega} \right), \quad (13)$$

где Ω — искомая скорость распространения продольных колебаний. Пользуясь выражением сил упругости, данным Ламе, мы имеем в нашем случае:

$$\begin{aligned} p_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x}, & p_{yz} &= 0, \\ p_{yy} &= \lambda \frac{\partial u}{\partial x}, & p_{xy} &= 0, \\ p_{zz} &= \lambda \frac{\partial u}{\partial x}, & p_{xz} &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Кроме того,

$$\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t} = \frac{\rho}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + p_{xx} \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (15)$$

Интегрируя это выражение по времени, имеем

$$\mathfrak{E} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\lambda + 2\mu}{2} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2. \quad (16)$$

Учитывая (13), находим

$$\mathfrak{E} = \frac{2\pi^2 A^2}{T^2} \left(\rho + \frac{2\mu + \lambda}{\Omega^2} \right) \sin^2 \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{\Omega} \right). \quad (17)$$

С другой стороны, подставляя (13) и (14) в (11), находим:

$$\begin{aligned} -\mathfrak{E} l_x &= -(\lambda + 2\mu) \frac{4\pi^2 A^2}{\Omega T^2} \sin^2 \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{\Omega} \right), \\ -\mathfrak{E} l_y &= 0, \quad -\mathfrak{E} l_z = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Последние два соотношения дают $l_y = 0$, $l_z = 0$. Следовательно, $l_x = \Omega$ и первое из соотношений (18) после сокращения общих факторов дает соотношение

$$\Omega \left(\rho + \frac{2\mu + \lambda}{\Omega^2} \right) = - \frac{2\lambda + 2\mu}{\Omega}, \quad (19)$$

откуда получается известный результат

$$\Omega^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}. \quad (20)$$

В случае распространения плоской волны с поперечными колебаниями мы нашли бы точно так же известное выражение для скорости распространения поперечных колебаний.

Выражения (11) дают возможность найти общие соотношения между формой волн, несущих продольные или поперечные колебания, и движениями частиц упругого тела.

Известно, что скорость распространения тех или других волн постоянна и что волны, исходящие из одной и той же поверхности сотрясения, имеют общие нормали. Обозначая c скорость распространения волны, мы имеем

$$i_x = \frac{c \partial B / \partial x}{\Delta_1 B}, \quad i_y = \frac{c \partial B / \partial y}{\Delta_1 B}, \quad i_z = \frac{c \partial B / \partial z}{\Delta_1 B}, \quad (21)$$

где

$$B = \text{const} \quad (22)$$

есть уравнение какой-нибудь волновой поверхности, а $\Delta_1 B$ — ее дифференциальный параметр первого порядка. Мной было доказано («Закон колебаний в неограниченной среде постоянной упругости»)¹, что, выбирая за параметр B волны отрезок луча между некоторым начальным положением волны и последующим, мы имеем

$$\Delta_1 B = 1. \quad (23)$$

Принимая последнее выражение и подставляя (21) в (11), находим:

$$\begin{aligned} -\mathcal{E}c \frac{\partial B}{\partial x} &= p_{xx}u' + p_{xy}v' + p_{xz}w', \\ -\mathcal{E}c \frac{\partial B}{\partial y} &= p_{xy}u' + p_{yy}v' + p_{yz}w', \\ -\mathcal{E}c \frac{\partial B}{\partial z} &= p_{xz}u' + p_{yz}v' + p_{zz}w'. \end{aligned} \quad (24)$$

Эти выражения показывают, что

$$-\frac{p_{xx}u' + p_{xy}v' + p_{xz}w'}{\mathcal{E}c}, \quad -\frac{p_{xy}u' + p_{yy}v' + p_{yz}w'}{\mathcal{E}c}, \quad -\frac{p_{xz}u' + p_{yz}v' + p_{zz}w'}{\mathcal{E}c} \quad (25)$$

суть выражения косинусов углов нормали в какой-нибудь точке волны с осями координат. Так как, по закону общих нормалей, все элементы нормалей, проведенные в соответствующих точках одной и той же волны в различных ее положениях, лежат на

одной прямой, носящей название луча, то выражения (25) остаются неизменными на протяжении одного и того же луча.

Выражения (25) показывают также, что, воображая себе в какой-нибудь точке луча линию, равную по величине произведению из энергии на скорость ее распространения, величины

$$\begin{aligned} &-(p_{xx}u' + p_{xy}v' + p_{xz}w'), \\ &-(p_{xy}u' + p_{yy}v' + p_{yz}w'), \\ &-(p_{xz}u' + p_{yz}v' + p_{zz}w') \end{aligned} \quad (26)$$

представят ее продолжение на оси координат. Возводя выражения (24) в квадрат и складывая, находим

$$\mathcal{E}^2 c^2 = (p_{xx}u' + p_{xy}v' + p_{xz}w')^2 + (p_{xy}u' + p_{yy}v' + p_{yz}w')^2 + (p_{xz}u' + p_{yz}v' + p_{zz}w')^2. \quad (27)$$

Умножая (24) соответственно на l_x , l_y , l_z , складывая и обращая внимание на соотношения (21), находим

$$\mathcal{E}c^2 + (p_{xy}u' + p_{xy}v' + p_{xz}w')l_x + (p_{xy}u' + p_{yy}v' + p_{yz}w')l_y + (p_{xz}u' + p_{yz}v' + p_{zz}w')l_z = 0. \quad (28)$$

Величина $\mathcal{E}c^2$ может быть названа *двойной живой силой движения энергии*.

§ 6. Закон энергии для волновых поверхностей произвольного вида. Вставляя в уравнение (1) выражения (21) и принимая в соображение (23), находим

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathcal{E} \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathcal{E} \frac{\partial B}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathcal{E} \frac{\partial B}{\partial z} \right) = 0. \quad (29)$$

Это соотношение дает связь между энергией и формой волновой поверхности, которая приводится по отношению к энергии к дифференциальному уравнению с частными производными первого порядка. Мы находим, раскрывая выражение (29):

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \mathcal{E} \Delta_2 B + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \frac{\partial B}{\partial z} = 0. \quad (30)$$

Здесь Δ_2 означает дифференциальный параметр второго порядка.

Введем ортогональные координаты, причем параметры двух систем поверхностей, ортогональных между собой и к волновой поверхности B , обозначим ρ_1 , ρ_2 . Принимая во внимание условия ортогональности, мы представим выражение (30) в виде

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \mathcal{E} \Delta_2 B + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial B} = 0. \quad (31)$$

Это выражение интегрируется при помощи совместных дифференциальных уравнений:

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\mathcal{E} \Delta_2 B} = c dt = dB. \quad (32)$$

Обозначая через f произвольную функцию, находим

$$\mathcal{E} = e^{-i\Delta_2 B} f(ct - B, \rho_1, \rho_2). \quad (33)$$

Таково общее выражение энергии для колебаний в одной и той же точке среды, несомых волной произвольного вида B . $\int \Delta_2 B dV$ можно взять в общем виде, как показано будет ниже. Рассмотрим случай волны цилиндрической. Пусть ось цилиндра параллельна оси z и координаты точки ее пересечения с плоскостью xy суть $a, 0, 0$. Мы имеем в данном случае

$$B = r, \quad r^2 = (x - a)^2 + y^2. \quad (34)$$

Следовательно,

$$\Delta_2 B = -\frac{1}{r} \quad (35)$$

и выражение (33) дает нам

$$\mathcal{E} = \frac{1}{r} f(ct - r, z, \varphi), \quad (36)$$

где φ — параметр плоскостей, проходящих через ось цилиндра.

Для волны сферической, центр которой имеет координаты a, b, c , находим

$$B = r, \quad r^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2. \quad (37)$$

Отсюда

$$\Delta_2 B = 2/r, \quad (38)$$

и выражение (33) дает

$$\mathcal{E} = \frac{1}{r^2} f(ct - r, \psi, \varphi). \quad (39)$$

Подобные результаты были известны для живой силы колебательных движений. Здесь они даны для всей энергии движения, не определяя в подробности его формы.

Из выражения (33) мы можем заключить о законе энергии в точке волны по мере ее движения вместе с волной. Я предпочитаю, однако, вывести этот закон непосредственно из основного уравнения (1'). Обращая внимание на указанный выше выбор параметра B волны, мы имеем

$$B = ct + c_1, \quad (40)$$

где c и c_1 — постоянные.

Подставляя в уравнение (1') величины (21) и принимая во внимание (23), находим

$$\frac{1}{\mathcal{E}} \frac{d\mathcal{E}}{dt} + c\Delta_2 B = 0, \quad (41)$$

откуда

$$\mathcal{E} = e^{-c\Delta_2 B} f(\rho_1, \rho_2). \quad (42)$$

Из (40) получаем

$$cdt = dB. \quad (43)$$

Кроме того, обозначая через h , h_1 , h_2 дифференциальные параметры первого порядка волновой поверхности и ортогональных к ней поверхностей ρ_1 , ρ_2 , находим²

$$\Delta_2 B = hh_1 h_2 \frac{dh/(h_1 h_2)}{dB}. \quad (44)$$

Замечая, что в нашем случае $h = 1$, имеем

$$\Delta_2 B = - \frac{d \ln h_1 h_2}{dB}. \quad (45)$$

Подставляя (43) и (45) в (42) и производя интеграцию, находим

$$\mathcal{E} = h_1 h_2 f(\rho_1, \rho_2). \quad (46)$$

Элемент объема будет равен

$$d\omega = \frac{dB d\rho_1 d\rho_2}{h_1 h_2}. \quad (47)$$

Умножая выражение (46) на (47), находим

$$\mathcal{E} d\omega = f(\rho_1, \rho_2) dB d\rho_1 d\rho_2. \quad (48)$$

Так как во все время движения энергии вдоль одного и того же луча величины ρ_1 и ρ_2 остаются неизменными, то их выражения (48) заключаем, что энергия целиком переносится волной от одной точки луча к другой. <...>

Комментарий

Отрывки из работы Н. А. Умова воспроизводятся по изданию: Умов Н. А. Избранные сочинения. М. — Л., 1950, с. 151—200.

Эта работа Умова была опубликована в 1870 г. Здесь Умов ссылается на «Лекции о криволинейных координатах» французского математика Г. Ла-ме, опубликованные в 1859 г.

Литература

- [1] Умов Н. А. Избранные сочинения. М. — Л., 1950.
- [2] Гуло Д. Д. Николай Алексеевич Умов. М., 1971.
- [3] Гуло Д. Д. Из истории учения о движении энергии. История и методология естественных наук. М., 1965, вып. 3, с. 214—241.



Л. Больцман

1844 — 1906

О статистической интерпретации второго начала термодинамики

Разработка в середине XIX в. основ термодинамики явилась одним из наиболее значительных достижений физики. Однако наряду с решением весьма важных теоретических и практических задач возникновение новой области физической науки привело к постановке новых проблем, разрешение которых было невозможно в рамках феноменологической термодинамики. Эти проблемы помогла решить статистическая теория, основывавшаяся на молекулярно-кинетических представлениях. Особую роль здесь сыграло установление выдающимся австрийским физиком Л. Больцманом статистического смысла второго начала термодинамики.

Людвиг Больцман родился 20 февраля 1844 г. в Вене в семье служащего. Он окончил гимназию в Линце и поступил в Венский университет, где учился у И. Стефана и Й. Лошмидта. Влияние этих ученых определило основные области научных интересов Больцмана: кинетическую теорию газов и теорию электромагнитного поля.

В 1866 г. Больцман защитил докторскую диссертацию. В течение некоторого времени он работает ассистентом Стефана, а затем становится приват-доцентом Венского университета.

В 1869 г. Больцман стал профессором теоретической физики в университете Граца, где он с небольшим перерывом проработал до 1890 г. К этому периоду относится расцвет творческой деятельности ученого. В 1866—1872 гг. он проводит важнейшие исследования по кинетической теории. Ему принадлежит обобщение распределения Максвелла на случай, когда на газ действуют внешние силы (знаменитое «распределение Больцмана»). Больцман предложил новый вывод распределения молекул по скоростям, который не зависел от характера взаимодействия между молекулами. В 1872 г. ученый опубликовал работу, содержащую доказательство так называемой «H-теоремы», утвержда-

давшей, что средний логарифм распределения не может возрастать со временем. Там же было записано кинетическое уравнение для идеального газа. В 1877 г. Больцман, доказав пропорциональность энтропии и H -функции, установил связь между статистической теорией и термодинамикой. Он ввел в физику эргодическую гипотезу и исследовал роль флуктуаций в физических процессах. Исследования Больцмана заложили основу термодинамики необратимых процессов.

Больцман не ограничивался исследованиями по статистике и термодинамике. Он много занимался задачами электромагнетизма и был активным пропагандистом теории Максвелла. Следует отметить, что Больцман был не только выдающимся теоретиком, но и талантливым экспериментатором. Он на опыте изучил диэлектрические постоянные различных веществ, в том числе газов, и подтвердил выводы Максвелла о связи между показателем преломления и диэлектрической постоянной вещества. Занимался Больцман и явлением поляризации диэлектриков. Среди его работ можно найти исследования, посвященные теории термоэлектричества, диамагнетизма, эффекта Холла, электро- и магнито-стрикции и других явлений, относящихся к электромагнетизму.

Несколько работ Больцмана посвящено теории упругого последействия, капиллярным явлениям, теплоемкости газов. Особое значение имело теоретическое доказательство закона теплового излучения, получившего впоследствии название закона Стефана — Больцмана, данное Больцманом в 1884 г. (в 1879 г. И. Стефаном была экспериментально установлена пропорциональность интегральной испускательной способности черного тела четвертой степени абсолютной температуры). Г. А. Лоренц назвал эту работу Больцмана «перлом физики».

В 1890 г. Больцман переезжает из Граца в Мюнхен, где занимает кафедру теоретической физики (до 1894 г.). Затем следует переход в Венский, а затем в Лейпцигский университет. В последние годы жизни Больцман читал лекции по физике в своей alma mater.

Больцман был членом многих научных обществ, в том числе членом-корреспондентом Петербургской АН.

Жизнь Больцмана оборвалась трагически. Он покончил с собой 5 сентября 1906 г.

Значение работ Больцмана по физической статистике выходит за рамки физики. Установление связи между вторым началом термодинамики и теорией вероятностей указано на несостоятельность гипотезы о «тепловой смерти» Вселенной. На протяжении всей жизни ученый отстаивал идеи атомизма от нападок «энергетиков» (Э. Маха, В. Оствальда, П. Дюгема и др.). Он много занимался вопросами теории познания. В. И. Ленин в книге «Материализм и эмпириокритицизм» писал: «Из немецких физиков систематически боролся против махистского течения умерший в 1906 году Людвиг Больцман... увлечению новыми гносеологическими догмами он противопоставлял простое и ясное све-

дение механизма к солипсизму... Больцман, конечно, боится называть себя материалистом и даже специально оговаривается, что он вовсе не против бытия божия. Но его теория познания по существу дела материалистическая, и выражает она ... мнение большинства естествоиспытателей»^{*}.

Большая работа Больцмана, в которой был показан статистический характер второго начала термодинамики, была опубликована в 1877 г. в трудах Венской Академии наук. Позднее ученый подготовил краткий реферат этой статьи, опубликованный в издании «Успехи физики в 1877 г.» (Берлин, 1882), где сжато изложил суть своего подхода к проблеме.

О связи между вторым началом механической теории теплоты и теорией вероятностей в теоремах о тепловом равновесии

В этой статье автор¹ прежде всего решает следующую задачу: «Из отношений между числами различных распределений состояний рассчитать их вероятности». В качестве исследуемого тела в первой части берется самое простое, а именно газ, заключенный между твердыми, абсолютно упругими стенками, молекулы которого представляют собой жесткие, абсолютно упругие шары (или силовые центры, которые действуют друг на друга по некоторому произвольно выбранному закону, если их взаимное расстояние становится меньше некоторой произвольно заданной величины).

Далее в первой главе предполагается, что каждая молекула способна обладать определенным конечным числом скоростей, к примеру

$$0, 1/q, 2/q, \dots, p/q,$$

и что в результате столкновений различные молекулы могут получить только те скорости, которые находятся среди приведенных выше. Полагая p и q произвольными целыми числами, которые могут принимать и бесконечные значения, очевидно, можно отождествить эту задачу с действительно возникающими в теории. Задача еще более упрощается, если вместо скоростей ввести живые силы молекул с ограничением, аналогичным вышеупомянутому, что все возможные живые силы содержатся в следующей арифметической прогрессии: $0, e, 2e, \dots, pe$. Наибольшая живая сила pe обозначается через P . Число молекул принимается равным n .

Г-н Больцман отыскивает все комбинации, возможные при распределении $p+1$ живых сил между n молекулами, и устанавливает, сколько этих комбинаций соответствует каждому из рас-

^{*} Ленин В. И. Полн. собр. соч. Т. 18. С. 304.

пределений состояний. Тогда последнее число позволяет определить вероятность соответствующего распределения состояний (кратко называемую вероятностью распределения). Для всех допустимых распределений выполняется условие, что полная сумма живых сил всегда одна и та же, т. е. приблизительно равна $\lambda e = L$. Каждое отдельное возможное распределение называется *комплексией*. Ставится вопрос о числе B комплексий, в которых w_0 молекул могут иметь живую силу, равную нулю, w_1 молекул — живую силу e и т. д., w_p молекул — живую силу pe . Это число B определяет вероятность одного из распределений состояний такого рода, так как число B , разделенное на число всех возможных комплексий, дает вероятность этого распределения состояний. B представляет собой не что иное, как число перестановок из элементов распределения состояний, поэтому будет называться *перестановочностью* соответствующего распределения состояний. Если, например, имеется семь молекул, то $p = 7$, и, далее, пусть $\lambda = 7$, так что $L = 7e$ и $P = 7e$, тогда возможно 15 распределений состояний такого рода, что живые силы семи молекул имеют одно из восьми значений $0, e, 2e, \dots, 7e$ и что сумма всех живых сил равна $7e$. Одно из этих распределений такое, что шесть молекул имеют живую силу 0 и одна молекула имеет живую силу $7e$; так как имеется семь молекул, то здесь получается семь вариантов, соответствующих одному и тому же распределению состояний. Число B комплексий, приходящихся на долю последнего, таким образом, равно 7 . Наибольшее число перестановок и, следовательно, комплексий возможно для такого состояния, при котором три молекулы имеют живую силу, равную 0 , две молекулы — живую силу 1 , одна молекула — живую силу 2 и одна молекула — живую силу 3 . Для него $B = 420$.

Смысл величины, названной «вероятностью распределения», можно пояснить следующим способом (который будет широко использоваться в дальнейшем). Пусть в урну положено бесконечно много листков; на каждом листке написано одно из чисел $0, 1$ и 7 , причем каждое число имеется на одинаково большом числе листков. Вероятность того, что будет вытянуто какое-либо из этих чисел, таким образом, одинакова для всех чисел. Теперь вынимается семь листков и этим определяется распределение состояний: *первая* молекула наделяется живой силой, которая равна e , умноженному на число, записанное на листке, вынутом первым, аналогично для второй молекулы и т. д. Все семерки, полученные таким образом, для которых сумма живых сил не равна $7e$, выкидываются. Число оставшихся семерок все еще будет бесконечно большим. Семерки, для которых имеет место одно и то же распределение состояний (они различаются только способом распределения одних и тех же живых сил между молекулами), можно объединить в группы. Число семерок, находящихся в этих группах, ведет себя тогда как фигурирующее в вышеприведенном примере число перестановок B , потому что каждое число вынимается с одинаковой вероятностью.

Сумма числа перестановок обозначается J ; $B/J=W$ представляет собой вероятность распределения. Для наивероятнейшего распределения состояний B максимально.

Если теперь w_0 молекул могут иметь живую силу 0, w_1 молекул — живую силу ε и т. д., то должно быть

$$w_0 + w_1 + \dots + w_p = n, \quad (1)$$

$$w_1 + 2w_2 + 3w_3 + \dots + pw_p = \lambda, \quad (2)$$

первое — потому, что полное число молекул равно n , второе — потому, что сумма всех живых сил должна быть равной $L = \lambda\varepsilon$. Число возможных перестановок среди n молекул с одним и тем же распределением живых сил поэтому равно

$$B = \frac{n!}{(w_0)!(w_1)! \dots}$$

Максимум достигается, когда знаменатель или его логарифм является минимальным; следовательно, можно написать, что минимальным является выражение

$$\lg l'(w_0 + 1) + \lg l'(w_1 + 1) + \dots, \quad (3)$$

если допустить также и дробные значения $w_0, w_1, \dots$. Условие минимума получается, если к (3) добавить левые части (1) и (2) — первую, умноженную на постоянную h , вторую — на постоянную k , а затем положить равным нулю частные производные по w_0, w_1 и т. д. Отсюда получается

$$\frac{\partial \lg l'(w_1 + 1)}{\partial w_1} \frac{\partial \lg l'(w_0 + 1)}{\partial w_0} = \frac{\partial \lg l'(w_2 + 1)}{\partial w_2} \frac{\partial \lg l'(w_1 + 1)}{\partial w_1} = \text{и т. д.}$$

Вместо этого решения устанавливается приближенная формула, которая справедлива, если w_0 и т. д. являются очень большими числами. Из этой приближенной формулы получается

$$\frac{w_1}{w_0} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{w_3}{w_2} = \frac{w_4}{w_3} = \dots,$$

так что

$$w_1 = w_0 x; \quad w_2 = w_0 x^2; \quad \dots$$

Значение x получается из условий (1) и (2). Подставляя в них значения w_1 и т. д., получаем после их деления уравнение

$$(pn - \lambda)x^{p+2} - (pn + n - \lambda)x^{p+1} + (n + \lambda)x - \lambda = 0. \quad (4)$$

Действительных корней (а имеют смысл только одни такие) это уравнение имеет только три. Два корня, равные единице, не имеют смысла, а третий же имеет и для очень больших p равен

$$x = \lambda/(n + \lambda). \quad (5)$$

Полученные результаты применяются к числовым примерам, на которых показывается применимость приближенных решений (4)

и (5). Используемое приближение исходит из того, что вместо (w)! подставляется величина

$$\sqrt{2\pi} (w/e)^n.$$

Для того чтобы эти результаты можно было распространить на задачи теории теплоты, г-н Больцман прежде всего позволяет живым силам пробегать непрерывный ряд значений. Для этого предполагается, что в урне находится очень много листков, на которых записаны живые силы между 0 и ϵ , где ϵ очень мало. Столь же много листков с живыми силами между ϵ и 2ϵ и т. д. Как и ранее, из урны вынимается по листку для каждой из n молекул. И таким способом снова получают различные комплексы. В них w_0 молекул имеют живую силу между 0 и ϵ , w_1 молекул — живую силу между ϵ и 2ϵ и т. д. Тем самым живые силы элементов отдельных групп полагаются равными друг другу. Величины w_0 , w_1 и т. д. рассматриваются как малые величины порядка ϵ , и полагается

$$w_0 = \epsilon f(0); w_1 = \epsilon f(\epsilon); w_2 = \epsilon f(2\epsilon) \text{ и т. д.}$$

Условиями [накладываемыми на значения $w_1, w_2, \dots$] являются

$$n = w_0 + w_1 + \dots, \quad (6)$$

$$L = \epsilon w_1 + 2\epsilon w_2 + \dots \quad (7)$$

Снова, как и в предыдущей задаче, отыскивается вероятность одного определенного распределения состояний. Как и ранее, она равна

$$n! / w_0! w_1! \dots$$

Точно так же далее отыскивается наименее вероятное распределение состояний, которое одновременно оказывается состоянием теплового равновесия. При этом должно быть минимальным $w_0! w_1! \dots$ или вместо этого выражения величина

$$M' = \epsilon [f(0) \lg f(0) + f(\epsilon) \lg f(\epsilon) + f(2\epsilon) \lg f(2\epsilon) + \dots],$$

которая, если написать dx вместо очень малых ϵ , переходит в

$$M' = \int_0^{\infty} f(x) \lg f(x) dx.$$

Уравнения (6) и (7) в этом случае можно представить как интегралы. M' будет минимальным при условиях (6) и (7), если $f(x) = Ce^{-hx}$.

Отсюда следует, что при тепловом равновесии вероятность того, что живая сила некоторой молекулы лежит между x и $x+dx$, равна $f(x)dx = Ce^{-hx}dx$. Следовательно, вероятность того, что скорость лежит между w и $w+dw$, равна

$S \exp \left(-h \frac{mw^2}{2} \right) m w dw$. Это значение верно для упругих шаров;

чтобы получить правильное распределение для упругих шаров, надо взять другой вид распределения листков в урне.

Вместо живых сил предполагаются определенными компоненты скорости u, v, w . Они записываются на листках. Число листков, для которых u лежит между 0 и ε , v — между 0 и ξ , w — между 0 и η , должно быть одинаковым или вообще одинаково число листков, для которых u, v, w лежат между границами u и $u + \varepsilon$, v и $v + \xi$, w и $w + \eta$. Далее поступают, как и раньше.

Для наивероятнейшего распределения состояний минимальным должно быть

$$\Omega = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(u, v, w) \lg f(u, v, w) du dv dw. \quad (8)$$

Эта величина называется мерой перестановочности. При этом выполняются условия:

число молекул

$$n = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(u, v, w) du dv dw,$$

живая сила

$$L = \frac{m}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (u^2 + v^2 + w^2) f(u, v, w) du dv dw.$$

Это те же условия, из которых автор ранее вывел постоянные теплового равновесия, из чего был сделан вывод, что наивероятнейшее состояние и состояние теплового равновесия идентичны.

Автор подробно обосновывает, почему в урне должно иметь место именно выбранное распределение листков.

Полученные результаты распространяются, наконец, далее на случай, в котором молекулы предполагаются многоатомными и подверженными действию внешних сил. Утверждается, что эти молекулы больше не задаются с помощью их трех пространственных координат, а в общем случае — с помощью r однозначно определенных обобщенных координат $p_1, p_2, \dots, p_r$. Далее, в наличии могут иметься различные сорта молекул, что будет обозначаться верхними индексами p, p', p'' до p' . Кроме того, вследствие сохранения энергии необходимо знать импульсы молекул с $q_1, q_2, \dots, q_r$ до $q_1^{(r)}, q_2^{(r)}, \dots, q_r^{(r)}$. Под этими импульсами понима-

ются величины $c_1 \frac{dl}{dp_1}$ и т. д., где l — полная живая сила молекулы, $\dot{p}_1$ — производная p_1 по времени, а c_1 — некоторая произвольная постоянная. Для $r+1$ сортов газа берутся $r+1$ урн, в которых находятся, как и раньше, листки с написанными p и q . Затем посредством жеребьевки листков отыскивается наивероятнейшее распределение состояний. В результате получается, что минимумом должно быть следующее значение:

$$\Omega = -\left[\iint \dots f(p_1, p_2, \dots, q, \lg f(p_1, p_2, \dots, q)) dp_1 dp_2 \dots dq, + \right. \\ \left. + \iint \dots f'(p'_1, p'_2, \dots, q') \lg f'(p'_1, p'_2, \dots, q') dp'_1 dp'_2 \dots dq' + \dots \right]. \quad (9)$$

Функции f определяются именно с помощью этого условия минимума. Это же условие минимума автор ранее вывел для теплового равновесия.

В дальнейшем в своей работе г-н Больцман определяет, опираясь на простейшие предпосылки, условие максимума произведений $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_r$, где ω_0 и т. д. имеют тот же смысл, что и ранее.

В пятой главе обсуждается взаимность этого объяснения со вторым началом. Указывается, что между энтропией и мерой перестановочности (9) существует глубокая внутренняя связь, состоящая в том, что для обратимых состояний последняя величина прямо пропорциональна энтропии. <...>

Это выполняется прежде всего для обратимых состояний, потому что только для них имеет место тепловое равновесие. Однако для необратимых процессов мера перестановочности, так же как и энтропия, должна возрасти. <...>

Комментарий

Перевод с немецкого реферата работы Л. Больцмана выполнен И. С. Алексеевым. Он с небольшими сокращениями воспроизводится по изданию: Больцман Л. Избранные труды. М., 1984. Название работы на языке оригинала: *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht.*

¹ Форма изложения от третьего лица объясняется тем, что это реферат оригинальной работы.

Литература

- [1] Собрание сочинений Л. Больцмана: Boltzmann L. Wissenschaftliche Abhandlungen. Bd. 1—3. Leipzig, 1909.
- [2] Больцман Л. Лекции по теории газов. М., 1956.
- [3] Больцман Л. Статьи и речи. М., 1970.
- [4] Broda E. Ludwig Boltzmann: Mensch, Physiker, Philosoph. Berlin, 1957.
- [5] Полан Л. С. Людвиг Больцман. М., 1987.
- [6] Спиридонов О. П. Л. Больцман. М., 1987.



А. Майкельсон

1852—1931



Э. Морли

1838—1923

Об эфирном ветре

Создание Максвеллом теории электромагнитного поля поставило перед физикой новые задачи, одной из которых была проблема применимости принципа относительности, сформулированного Галилеем в XVII в., к электродинамическим явлениям. Решение этой проблемы, как указал сам Максвелл, могло быть получено при исследовании относительного движения Земли и «светоносного» электромагнитного эфира, который в теории Максвелла заменил упругий (механический) эфир Юнга — Френеля. Если бы существовал эфир, на электромагнитные процессы в котором не влияют движения тел, то его можно было бы принять за абсолютную систему отсчета, что означало бы отказ от принципа относительности. К моменту создания теории электромагнитного поля уже имелись наблюдения и эксперименты (наблюдения аберрации света, опыты Физо по исследованию распространения света в движущейся воде и др.), результаты которых позволили высказать определенные гипотезы о свойствах эфира. Однако непосредственные доказательства существования эфира мог дать только прямой эксперимент. Идею такого опыта сформулировал еще Максвелл, предложивший использовать в качестве движущегося тела Землю, которая перемещается по орбите со скоростью $v \approx 30$ км/с. Однако Максвелл справедливо указал, что основная трудность в постановке этого эксперимента состоит в том, что он должен быть опытом «второго порядка», т. е. в нем требуется зафиксировать величину, пропорциональную квадрату отношения скорости Земли к скорости света c : $(v/c)^2 \approx 10^{-8}$ (это обстоятельство обусловлено замкнутостью пути света во всех подобных опытах, проводимых на Земле). Столь высокая точность, уникальная для экспериментальной физики XX в., была достигнута в опытах американских ученых А. Майкельсоном и Э. Морли.

Альберт Абрахам Майкельсон родился в г. Стрельно (ныне Польша) 19 декабря 1852 г. Вскоре после рождения Альберта семья переехала в США. Там юный Майкельсон окончил среднюю школу, а затем Военно-морскую академию. Однако после выпуска из академии Майкельсон всего два года плавал на кораблях, а затем был назначен преподавателем физики той же академии. В это время началась его науч

ная деятельность. Первым большим успехом начинающего ученого было повторение опыта Фуко по измерению скорости света в различных средах, причем точность полученных результатов оказалась существенно выше, чем у Фуко. В 1880—1882 гг. Майкельсон провел в Европе, стажирясь в ведущих научных центрах Германии и Франции. Работая в Берлине, в лаборатории Гельмгольца, Майкельсон заинтересовался проблемой обнаружения «эфирного ветра» и для проведения соответствующего опыта изобрел интерферометр, названный впоследствии его именем. Однако эксперименты, проведенные Майкельсоном в Берлине и Потсдаме, не дали положительного результата из-за недостаточной точности, которую обеспечивал первый вариант установки.

После возвращения на родину Майкельсон вышел в отставку и начал преподавать в школе Кейса, где провел важное исследование распространения света в сероуглероде, подтвердившее теорию Рэлея о связи между групповой и фазовой скоростями волн применительно к свету. Экспериментальное искусство Майкельсона получило высокую оценку ведущих европейских физиков. Рэлей, У. Томсон (Кельвин) убедили Майкельсона вернуться к опытам, начатым в Европе.

Над проведением нового цикла экспериментов в поисках эфирного ветра Майкельсон начал работать вместе с Э. Морли, в сотрудничестве с которым он проводил опыты по определению скорости света в сероуглероде. Новый, усовершенствованный, интерферометр позволил достичь необходимой точности, и в 1887 г. Майкельсон и Морли получили результат, который английский ученый Дж. Бернал назвал «величайшим из всех отрицательных опытов в истории науки». Этот результат гласил: «эфирного ветра» не наблюдается, следовательно, абсолютной системы отсчета не существует. После создания специальной теории относительности опыт Майкельсона — Морли стал рассматриваться как фундаментальное подтверждение эйнштейновского принципа относительности.

В 90-е годы Майкельсон решил важную метрологическую задачу: провел измерение эталона метра в единицах длины волны излучения кадмия. В те же годы он занимался астрономической спектроскопией; с его интересами в области спектроскопии связано изобретение знаменитого «эшелона Майкельсона». Он стал первым американским лауреатом Нобелевской премии (1907).

В первые десятилетия XX в. Майкельсон играл ведущую роль в деятельности многих научных обществ США. Однако Майкельсон не прерывал активной научной работы до конца жизни. В 1920 г. он с помощью изобретенного им так называемого «звездного интерферометра» провел измерения угловых размеров звезды Бетельгейзе. Во второй половине 20-х годов Майкельсон с сотрудниками повторил опыт Майкельсона — Морли, добившись значительно большей точности. Последним исследова-

нием Майкельсона, завершать которое пришлось уже его ученикам, было новое измерение скорости света, но уже не в воздухе, а в вакууме. Выдающийся мастер оптических экспериментов умер 9 мая 1931 г.

Эдвард Уильямс Морли родился 29 января 1838 г. в Ньюарке (США) в семье священника. Он получил теологическое образование и некоторое время даже был священником конгрегационалистской церкви. Однако постепенно интересы Морли сместились в область естествознания. Он начал преподавать химию и одновременно вести экспериментальные исследования. В химии Морли был страстным поборником точных количественных экспериментов и к началу сотрудничества с Майкельсоном уже завоевал репутацию серьезного исследователя. Однако наибольшую известность получили его работы в области интерферометрии, выполненные совместно с Майкельсоном. В химии же высшим достижением Морли было точное сравнение атомных масс элементов с массой атома водорода, за которое ученый был удостоен награды нескольких научных обществ. Умер Морли 24 февраля 1923 г.

История опыта Майкельсона — Морли изобилует интересными и поучительными эпизодами. Первый вариант интерферометра был построен немецкими мастерами в Берлине на средства, предоставленные изобретателем телефона американцем А. Беллом. Неудача европейского цикла исследований Майкельсона была связана с тем, что прибор оказался чрезвычайно чувствительным к вибрациям, которые не удавалось устранить даже при помещении его в глубокий подвал знаменитой Потсдамской обсерватории. Кроме того, в первом варианте интерферометра, где использовалась одна пара зеркал, оптическая длина пути световых лучей была слишком малой, вследствие чего ожидаемый эффект оказывался на грани точности измерений. К тому же в первой публикации, посвященной поиску «эфирного ветра», Майкельсон сделал одну довольно элементарную теоретическую ошибку...

При проведении опытов в США все эти обстоятельства были учтены, что резко повысило точность и достоверность результатов. Именно поэтому выводы Майкельсона и Морли остались незыблемыми и после множества повторений опыта, проведенных с конца XIX в. до наших дней.

Об относительном движении Земли и светоносного эфира

За открытием абберации света вскоре последовало ее объяснение на основе эмиссионной теории. Эффект приписывался простому сложению скорости света со скоростью Земли на ор-

бите. Трудностей этого кажущегося удовлетворительным объяснения не замечали до тех пор, пока не было предложено объяснения на основе волновой теории света. Это новое объяснение было поначалу столь же простым, как и предыдущее. Но оно оказалось бессильным перед экспериментально доказанным фактом, что абберация не меняется, когда проводятся наблюдения с помощью телескопа, заполненного водой. Действительно, если тангенс угла абберации равен отношению скорости Земли к скорости света, то, поскольку последняя скорость в воде составляет три четвертых скорости света в вакууме, абберация, наблюдаемая с помощью телескопа, заполненного водой, должна составлять четыре третьих ее истинного значения*.

Согласно Френелю, в волновой теории эфир, во-первых, предполагается находящимся в покое, за исключением внутренности прозрачных сред, в которых, во-вторых, он считается движущимся со скоростью, меньшей скорости среды в отношении $\frac{n^2-1}{n^2}$,

где n — коэффициент преломления. Эти две гипотезы дают полное и удовлетворительное объяснение абберации. Вторая гипотеза, несмотря на ее кажущееся неправдоподобие, должна считаться полностью доказанной, во-первых, замечательным опытом Физо¹ и, во-вторых, нашим собственным исследованием². Экспериментальная проверка первой гипотезы составляет цель настоящей работы.

Если бы Земля была прозрачным телом, то, учитывая только что упомянутые эксперименты, вероятно, можно было бы допустить, что межмолекулярный эфир находится в пространстве в покое, несмотря на движение Земли по орбите; но мы не имеем права распространять выводы из этих экспериментов на непрозрачные тела. Однако вряд ли можно сомневаться, что эфир может проходить и действительно проходит через металлы. Лоренц приводит в качестве иллюстрации трубку ртутного манометра. Когда трубка наклонена, эфир, находящийся в пространстве над ртутью, безусловно, выталкивается оттуда, поскольку он несжимаем**. Но опять-таки мы не имеем права предположить, что он выходит совершенно свободно, и если бы существовало какое-то сопротивление, хотя и слабое, мы не могли бы, конечно, полагать, что непрозрачное тело, такое, как Земля в целом, обеспечивает свободное прохождение эфира через всю эту массу. Но, как удачно отмечает Лоренц, «как бы то ни было, по моему мнению, в этом вопросе, также важном, лучше не позволять себе

* Можно отметить, что большинство авторов считают удовлетворительным объяснение на основе эмиссионной теории света, хотя в действительности здесь трудностей даже больше, чем в случае волновой теории. Согласно эмиссионной теории, скорость света в телескопе с водой должна быть больше, а угол абберации должен быть меньше; поэтому, чтобы свести его к истинному значению, мы должны принять абсурдную гипотезу, что движение воды в телескопе переносит лучи света в обратном направлении!

** Можно возразить, что он может выходить через пространство между ртутью и стенками; но это можно предотвратить путем амальгамирования стенок.

частично отражается по ad . Тогда, если пути ab и ac равны, два луча интерферируют вдоль ad . Предположим теперь, что эфир находится в покое, а весь прибор движется в направлении sc со скоростью движения Земли по орбите. Направления и расстояния, проходимые лучами, изменяются так. Луч sa отражается по ab [рис. 104], причем угол bab_1 равен углу абберации α , возвращается по ba_1 ($aba_1 = 2\alpha$) и попадает в фокус зрительной трубы, направление которой не меняется. Пропущенный луч идет по ac , возвращается по ca и отражается в a_1 , образуя угол ca_1e , равный $90^\circ - \alpha$, и поэтому все-таки совпадает с первым лучом. Можно отметить, что теперь лучи ba_1 и ca_1 не встречаются в точности в одной и той же точке a_1 , хотя разность составляет величину второго порядка малости; это не влияет на справедливость рассуждений. Пусть теперь требуется найти разность двух путей света aba_1 и aca_1 .

Пусть V — скорость света; v — скорость движения Земли по орбите; D — расстояние ab или ac [рис. 102]; T — время, которое требуется свету для прохождения от a до c ; T_1 — время, необходимое свету для возвращения от c к a_1 [рис. 103].

Тогда $T = \frac{D}{V-v}$, $T_1 = \frac{D}{V+v}$. Полное время движения туда и обратно равно $T + T_1 = 2D \frac{V}{V^2 - v^2}$, и расстояние, пройденное за это время, равно $2D \frac{V^2}{V^2 - v^2} \cong 2D \left(1 + \frac{v^2}{V^2}\right)$, если пренебречь членами четвертого порядка. Длина другого пути, очевидно, равна $2D \sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}$, или с той же точностью $2D \left(1 + \frac{v^2}{2V^2}\right)$. Поэтому разность равна $D \frac{v^2}{V^2}$. Если теперь повернуть весь прибор на 90° , то разность будет наблюдаться в противоположном направлении; следовательно, смещение интерференционных полос должно быть $2D \frac{v^2}{V^2}$. Учитывая только орбитальное движение Земли, это должно быть равно $2D \cdot 10^{-8}$. Если, как было в первом эксперименте, $D = 2 \cdot 10^6$ длин волн желтого света, то ожидаемое смещение должно составлять 0,04 расстояния между интерференционными полосами.

В первом эксперименте одна из основных встретившихся трудностей состояла в приведении прибора во вращение без создания искажений, другая же — его крайняя чувствительность к вибрациям. Она была столь велика, что при работе в городе, даже в два часа ночи, невозможно было наблюдать интерференционные полосы, кроме как в течение коротких промежутков времени. В итоге, как уже отмечалось, величина, которая должна была наблюдаться, а именно смещение, несколько меньшее, чем одна двадцатая часть расстояния между интерференционными полосами, могла быть слишком малой, чтобы быть зарегистрированной, когда она маскируется погрешностями эксперимента.

Первая из названных трудностей была полностью устранена путем установки прибора на массивный камень, плавающий в ртути; вторая же была преодолена посредством увеличения пути света вследствие повторных отражений до величины, почти в десять раз превосходившей первоначальную.

Вид прибора показан на рис. 105, его вертикальное сечение — на рис. 106, а ход лучей в нем — на рис. 107. Камень *a* [рис. 107] имел площадь около $1,5 \times 1,5$ м и толщину 0,3 м. Он покоился на кольцеобразном деревянном поплавке *bb* с внешним диаметром 1,5 м, внутренним диаметром 0,7 м и толщиной 0,25 м. Поплавок располагался на ртути, содержащейся в чугунном лотке *cc* толщиной 1,5 см и таких размеров, что вокруг полавка в нем оставалось свободное пространство около сантиметра.

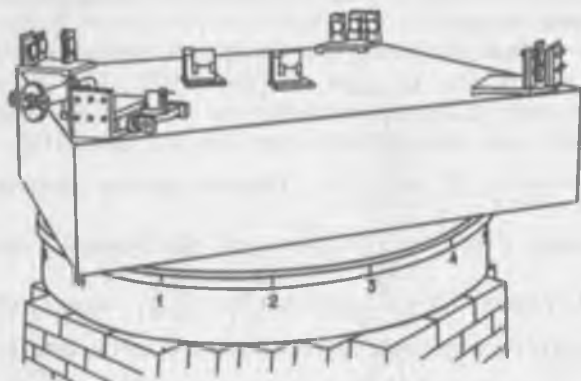


Рис. 105

Шпилька *d*, направляемая рычагами *gggg*, совпадает с гнездом *e*, проданным в полавке. Посредством ручки, надетой в *f*, она может либо вставляться в гнездо, либо выниматься из него. Эта шпилька делает поплавок соосным с лотком, но не несет ни малейшей части веса камня. Кольцеобразный чугунный лоток опирается на цементную подложку, лежащую на низком кирпичном основании, выложенном в форме полого восьмиугольника.

В каждом углу камня помещалось по четыре зеркала *ddde* [рис. 106]. Вблизи центра камня находилась плоскопараллельная стеклянная пластинка *b*. Все это было расположено так, что свет от горелки Аргана⁵ *a*, проходя через линзу, падал на *b* таким образом, чтобы частично отражаться к *d*₁. Два пучка, показанные на рисунке, проходили пути *bdedbf* и *bd₁e₁d₁bf* соответственно и наблюдались в зрительную трубу *f*. И труба *f*, и горелка *a* вращались вместе с камнем. Зеркала были сделаны из зеркальной бронзы и тщательно обработаны до получения оптически плоских поверхностей 5 см в диаметре; стекла *b* и *c* были плоскопараллельными, одинаковой толщины 1,25 см; их поверхности имели размеры $5,0 \times 7,5$ см. Второе стекло ставилось на пути одного из пучков, чтобы скомпенсировать прохожде-

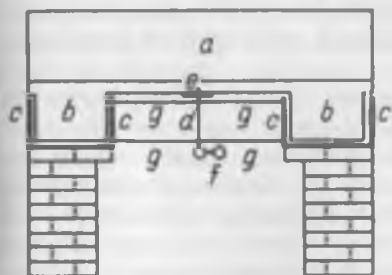


Рис. 106

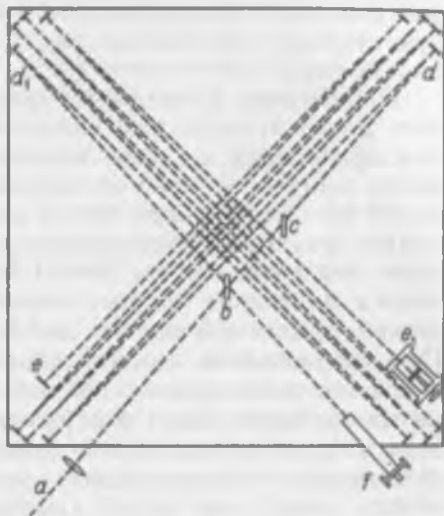


Рис. 107

ние второго пучка через стекло той же толщины. Вся оптическая часть прибора содержалась под деревянным кожухом для предотвращения воздушных потоков и быстрых изменений температуры.

Настройка проводилась так. С помощью винтов в отливках, удерживавших зеркала, к которым последние прижимались пружинами, зеркала устанавливались так, чтобы свет обоих пучков мог быть виден в зрительную трубу. Посредством легкого деревянного стержня, достававшего по диагонали от зеркала до зеркала, измерялись длины двух путей, причем расстояния отсчитывались по маленькой стальной шкале с точностью до десятых долей миллиметра. Затем разность длин двух путей ликвидировалась путем передвижения зеркала e_1 . Это зеркало имело три регулировки; имелись регулировки по высоте и азимуту, как и у других зеркал, но только более тонкие, а также регулировка в направлении падающего пучка, благодаря ему оно скользило назад и вперед, оставаясь, однако, с высокой точностью параллельным своей начальной плоскости. Все три регулировки могли производиться при закрытом деревянном кожухе.

Поскольку теперь пути были приближенно равны, два изображения источника света или какого-либо другого хорошо очерченного предмета сводились вместе и зрительная труба оказывалась настроенной на отчетливое наблюдение ожидаемых интерференционных полос. Когда они появлялись, белый свет заменялся на свет натрия. Путем регулировки зеркала e_1 полосы делались настолько отчетливыми, насколько это было возможно; затем возвращался белый свет, а винт, меняющий длину пути, приводился в очень медленное вращение (один оборот винта с сотней шагов резьбы на один дюйм менял путь примерно на 1000 длин волны) до тех пор, пока окрашенные интерференцион-

ные полосы не покажутся вновь в белом свете. Это давало удобную ширину и положение полос, и теперь прибор был готов для наблюдений.

Наблюдения проводились следующим образом. Вокруг чугунного лотка имелось шестнадцать эквидистантных отметок. Прибор приводился в очень медленное вращение (один оборот за шесть минут), и через несколько минут в момент прохождения одной из отметок пересечение нитей микрометра наводилось на самую яркую интерференционную полосу. Вращение происходило столь медленно, что это можно было сделать легко и точно. Отмечалось показание головки винта микрометра и делался очень легкий и плавный толчок для поддержания движения камня. При прохождении следующей отметки процедура повторялась, и все это продолжалось до тех пор, пока прибор не завершал шесть оборотов. Было обнаружено, что при поддержании прибора в состоянии медленного равномерного движения результаты оказывались гораздо более однородными и согласующимися между собой, чем когда камень останавливался для каждого наблюдения, поскольку эффекты деформаций могли быть заметными по крайней мере в течение полуминуты после того, как камень остановился, а за это время вступали в действие эффекты изменения температуры.

Следующие таблицы дают среднее шести отсчетов; первая — для наблюдений, выполненных около полудня, вторая — для наблюдений около шести часов вечера. Отсчеты — это деления

Полуденные наблюдения

	16	1	2	3	4	5	6
8 июля	44,7	44,0	43,5	39,7	35,2	34,7	34,3
9 июля	57,4	57,3	58,2	59,2	58,7	60,2	60,8
11 июля	27,3	23,5	22,0	19,3	19,2	19,3	18,7
Среднее	43,1	41,6	41,2	39,4	37,7	38,1	37,9
Среднее в длинах волн	0,862	0,832	0,824	0,788	0,754	0,762	0,758
Конечное среднее	0,706	0,692	0,686	0,688	0,688	0,678	0,672
	0,784	0,762	0,755	0,738	0,721	0,720	0,715

Вечерние наблюдения

	16	1	2	3	4	5	6
8 июля	61,2	63,3	63,3	68,2	67,7	69,3	70,3
9 июля	26,0	26,0	28,2	29,2	31,5	32,0	31,3
12 июля	66,8	66,5	66,0	64,3	62,2	61,0	61,3
Среднее	51,3	51,9	52,5	53,9	53,8	54,1	54,3
Среднее в длинах волн	1,026	1,038	1,050	1,078	1,076	1,082	1,086
Конечное среднее	1,068	1,086	1,076	1,084	1,100	1,136	1,144
	1,047	1,062	1,063	1,081	1,088	1,109	1,115

головки винта. Ширина полос менялась от 400 до 60 делений, причем среднее значение составляло около 50, так что одно деление означает 0,02 длины волны. При полуденных наблюдениях вращение производилось против часовой стрелки, при вечерних — по часовой стрелке. Результаты наблюдений представлены графически

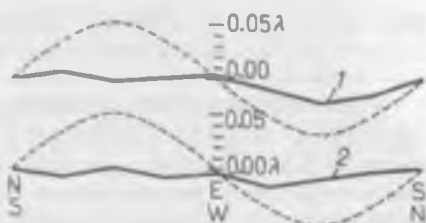


Рис. 108

на рис. 108. Кривая 1 соответствует полуденным наблюдениям, кривая 2 — вечерним. Пунктирные линии показывают одну восьмую теоретического смещения¹. Из рисунка возможно сделать вывод о том, что если и существует какое-либо смещение благодаря относительному движению Земли и светонесущего эфира, оно не может быть значительно больше, чем 0,01 расстояния между полосами.

При учете лишь движения Земли по орбите это смещение должно быть равно $2D \frac{v^2}{V^2} = 2D \cdot 10^{-8}$. Расстояние D составляло около 11 м, или $2 \cdot 10^7$ длин волн желтого света; следовательно, ожидавшееся смещение равно 0,4 полосы. Действительное смещение было, безусловно, меньше, чем одна двадцатая часть этой величины, и, вероятно, меньше, чем одна сороковая. Но поскольку смещение пропорционально квадрату скорости, относи-

7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
32,5	28,2	26,2	23,8	23,2	20,3	18,7	17,5	16,8	13,7
62,0	61,5	63,3	65,8	67,3	69,7	70,7	73,0	70,2	72,2
18,8	16,2	14,3	13,3	12,8	13,3	12,3	10,2	7,3	6,5
37,8	35,3	34,6	34,3	34,4	34,4	33,9	33,6	32,4	30,8
0,756	0,706	0,692	0,686	0,688	0,678	0,678	0,672	0,628	0,616

0,628 0,616

0,692 0,661

69,8	69,0	71,3	71,3	70,5	71,2	71,2	70,5	72,5	75,7
31,7	33,0	35,8	36,5	37,3	38,8	41,0	42,7	43,7	44,0
59,7	58,2	55,7	53,7	54,7	55,0	58,2	58,5	57,0	56,0
53,7	53,4	54,3	53,8	54,2	55,0	56,8	57,2	57,7	58,6
1,074	1,068	1,086	1,076	1,084	1,100	1,136	1,144	1,154	1,172

1,154 1,172

1,114 1,120

тельная скорость Земли и эфира, вероятно, меньше, чем одна шестая часть орбитальной скорости Земли, и безусловно меньше, чем одна четвертая.

В вышеизложенном учитывалось только орбитальное движение Земли. Если его сложить с движением Солнечной системы, относительно которого, однако, мало что известно с достоверностью, вероятно, результаты следует модифицировать; и вполне возможно, что результирующая скорость во время наблюдений была мала, хотя против этого и очень много шансов. Поэтому эксперимент должен быть повторен с интервалами в три месяца, и таким образом будут преодолены все неопределенности.

Из всего изложенного довольно определенно следует, что если существует какое-либо относительное движение Земли и светоносного эфира, то оно должно быть настолько мало, чтобы полностью отказаться от френелевского объяснения аберрации. Стокс дал теорию аберрации⁶, которая предполагает, что эфир на поверхности Земли находится по отношению к ней в состоянии покоя, и в дополнение требует, чтобы относительная скорость имела потенциал; но Лоренц показал, что эти условия несовместимы. Тогда Лоренц предложил усовершенствованную теорию, которая соединяет некоторые идеи Стокса и Френеля и предполагает существование потенциала наряду с коэффициентом Френеля. Если теперь из настоящей работы позволительно заключить, что эфир поконится относительно поверхности Земли, то, согласно Лоренцу, не может быть потенциала скорости и его собственная теория также терпит неудачу.⁷ <...>

Комментарий

Перевод с английского статьи А. Майкельсона и Э. Морли выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. «American Journal of Science», Ser. 3, 1887, vol. 34, p. 203, p. 333—345. При переводе исключены Приложение к статье и некоторые второстепенные примечания. Большая часть литературных ссылок взята из текста работы: изменена лишь их форма (в соответствии с принятыми сейчас правилами).

¹ Fizeau H. Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux ... Comptes Rendus, 1851, vol. 33, p. 349 (см. также с. 000 настоящего издания).

² Michelson A. A., Morley E. Influence of Motion of the Medium on the velocity of Light. American Journal of Science, Ser. 3, 1886, vol. 31, p. 377—386.

³ Lorentz H. A. De l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux. Archives Néerlandaises, 1886, vol. 21, 2^{me} livr.

⁴ Michelson A. A. The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. American Journal of Science. Ser. 3, 1881, vol. 22, p. 120—129.

⁵ Этот осветительный прибор в XIX в. часто исполь-

зовался для проведения оптических экспериментов. Он был изобретен швейцарским часовщиком Арганом и обеспечивал постоянство светового потока при выгорании части фитиля.

⁶ Дж. Стокс исследовал проблему абберации света в 1845—1848 гг. и опубликовал на эту тему ряд работ, в частности: *On the aberration of light*. *Philosophical Magazine*, 1845, vol. 27, p. 9—15; *On the constitution of the luminiferous aether, viewed with reference to the phenomenon of the aberration of light*. Там же, 1846, vol. 28, p. 6—10.

⁷ В Приложении авторы рассматривают другие эксперименты и наблюдения, которые в принципе могли бы способствовать решению вопроса, обсуждаемого в данной работе.

Литература

- Собрание сочинений А. Майкельсона не издавалось. Частично его оптические исследования отражены в двух книгах, изданных при жизни ученого и переведенных на русский язык:
- [1] Майкельсон А. А. Исследования по оптике. М. — Л., 1928.
 - [2] Майкельсон А. А. Световые волны и их применение. М. — Л., 1934.
 - [3] Биография А. Майкельсона, написанная его дочерью: Livingston Michelson D. *The master of light*. N. Y., 1973.
 - [4] Джафф Б. Майкельсон и скорость света. М., 1963.
 - [5] Swenson L. S. *The ethereal Aether: A History of the Michelson—Morley—Miller Aether—Drift Experiments 1880—1930*. Austin (Tex.), 1972.
 - [6] Франкфурт У. И., Френк А. М. Оптика движущихся тел. М., 1972.
 - [7] Williams H. R. *Edward William Morley*. Easton (Pa.), 1957.



Г. Герц

1857—1894

Об электромагнитных волнах

Создание Дж. К. Максвеллом теории электромагнитного поля явилось важнейшим событием в истории физики. Однако признание этой теории пришло далеко не сразу. Еще практически в течение двадцати лет физики обсуждали альтернативные подходы к описанию электромагнитных явлений. Решающую роль в подтверждении справедливости полевых представлений Фарадея—Максвелла сыграли опыты немецкого физика Г. Герца, в которых были получены и исследованы электромагнитные волны, существование которых предсказал Максвелл.

Генрих Рудольф Герц родился 22 февраля 1857 г. в Гамбурге, в семье адвоката. Еще во время учебы в частной школе и гимназии Герц проявил большие способности к изобретательству и ручному труду. Он овладел мастерством столяра и токаря. Естественно, что после окончания гимназии Герц хотел стать инженером. Однако после годичной подготовки к карьере инженера и службы в армии (1875—1877) Герц решил посвятить себя физике и поступил в Мюнхенский университет.

Во время учебы в университете он много занимался математикой, изучал произведения классиков физики. Однако наибольшее удовлетворение Герц получает от работы в лабораториях университета и мюнхенской Высшей технической школы. В 1878 г. Герц переходит в Берлинский университет, где его учителем становится глава немецких физиков Г. Гельмгольц. Еще будучи студентом, Герц по совету Гельмгольца принимает участие в конкурсе, объявленном философским факультетом. Темой конкурса была экспериментальная проверка следствий электродинамики В. Вебера. Герц доказал, что эффекты, которые следуют из теории Вебера, не наблюдаются. За свою работу он был удостоен премии.

В 1780 г. Герц с блеском защищает докторскую диссертацию, посвященную электромагнитной индукции во вращающихся проводниках (это было чисто теоретическое исследование), и становится ассистентом Гельмгольца. В течение трех лет работы в

Берлине он подготовил пятнадцать статей, на самые разнообразные темы — от электромагнетизма до твердости материалов и конструирования научных приборов до испарения жидкостей. Хотя в этот период Герц вряд ли мог пожаловаться на плохие условия работы, он все же задумывался о самостоятельной деятельности.

В 1883 г. Герц становится приват-доцентом в Кильском университете, а в 1885 г. переходит в Высшую техническую школу в Карлсруэ. Именно в Карлсруэ начинаются исследования Герца, приведшие к открытию электромагнитных волн.

В 1890 г. Герц переходит в Боннский университет, где становится преемником выдающегося немецкого физика Р. Клаузиуса. Здесь он продолжает заниматься электродинамикой, но постепенно его интересы смещаются в область механики. В течение нескольких лет он с увлечением разрабатывает новый подход к построению механики. Результаты этих исследований были обобщены Герцем в сочинении «Принципы механики, изложенные в новой связи», опубликованном уже после смерти ученого, в 1894 г. В нем Герц, сторонник механицизма, попытался изложить механику без использования понятия «сила». Хотя подход Герца к построению механики не нашел последователей, его «Принципы» сыграли важную роль в развитии философии XIX в.

Заслуги Герца в исследовании электромагнитных явлений получили международное признание. Он был удостоен наград Венской, Парижской, Туринской академий наук, итальянского научного общества, Лондонского Королевского общества и избран членом ряда научных обществ и академий, в том числе Прусской Академии наук.

Последние годы жизни Герца были омрачены тяжелой болезнью. Он умер 1 января 1894 г., в расцвете таланта, когда ему было всего тридцать шесть лет.

Интерес Герца к электродинамике был стимулирован его учителем Г. Гельмгольцем, который в 70-х годах поставил своей целью «упорядочить» эту область физики, решив с помощью эксперимента, какая же из конкурирующих теорий соответствует реальности. Еще в 1879 г., когда Герц завершал свое исследование, удостоенное премии философского факультета, Гельмгольц предложил ему заняться исследованием процессов, протекающих в незамкнутых электрических цепях. В то время Герц, стремившийся побыстрее получить докторскую степень и, вероятно, не видевший реальных возможностей решить поставленную задачу, отказался от темы, предложенной учителем.

Герц вспомнил о задаче Гельмгольца в 1886 г., когда оказался в Карлсруэ, где обнаружил приборы, подходившие для изучения процессов в незамкнутых цепях. Немаловажную роль в обращении к этой проблеме сыграло и то, что еще в Киле Герц написал теоретическую статью, посвященную электродинамике Максвелла, и, следовательно, был хорошо подготовлен к работе в данной области.

В короткий срок Герцу удалось провести выдающийся по полноте и убедительности цикл исследований, в ходе которого были разработаны методы генерации и детектирования электромагнитных волн и путем наблюдения таких явлений, как отражение, преломление, интерференция, дифракция и поляризация, доказать тождественность их свойств со свойствами излучения, предсказанного Максвеллом. В ходе экспериментов в 1888 г. Герц обнаружил явление внешнего фотоэффекта, исследование которого в дальнейшем сыграло важную роль в развитии физики.

Следует отметить, что успех Герца был обусловлен не только его талантом экспериментатора, но и большим мастерством теоретического анализа. Дело в том, что для правильной постановки опытов ему пришлось решить ряд задач, подробно не рассмотренных Максвеллом. Кроме того, уже после проведения основных экспериментов с электромагнитными волнами, в 1890 г., Герц опубликовал теоретическую работу, в которой придал максвелловской теории форму, очень близкую к той, которой мы пользуемся в наши дни.

Ниже приводятся отрывки из двух работ Герца, посвященных электромагнитным волнам, по которым можно составить представление о стиле и характере его экспериментов.

О весьма быстрых электрических колебаниях

Предварительные опыты

Если в разрядную цепь индукционной катушки последовательно с искровым промежутком включить искровой микрометр Рисса, полюсы которого соединены между собой длинным металлическим ответвлением, то, если только длина воздушного промежутка микрометра не превысит известного предела, разряд пройдет скорее через воздушный промежуток, чем через металлический провод. Это явление не ново; как известно, построение громоотводов для телеграфных проводов имеет своим основанием именно это явление. Только в том случае, если металлическое ответвление коротко и обладает небольшим сопротивлением, можно рассчитывать на исчезновение искры в микрометре. И на самом деле длина получаемой искры уменьшается вместе с длиной ответвления, но полного ее погашения едва ли можно достигнуть. Даже в том случае, когда оба шарика микрометра соединены толстой медной проволокой длиной всего в несколько сантиметров, можно наблюдать искорки, хотя и очень короткие. Непосредственно этот опыт показывает, что в момент разряда потенциал изменяется вдоль замыкающей цепи на величину в сотни вольт на протяжении всего лишь нескольких сантиметров, косвенно же он дает указание на исключительно большую скорость, с которой происходит разряд. Разность потенциалов

между шариками микрометра может рассматриваться только как результат действия самоиндукции в металлической замыкающей цепи.

Время, в течение которого потенциал на одном шарике испытывает заметные изменения, будет того же порядка, что и время, в продолжение которого эти изменения доходят до другого шарика через короткий отрезок хорошего проводника. Можно было бы предположить, пожалуй, столь большую плотность разрядного тока, что одно лишь сопротивление ответвления обусловит разность потенциалов на шариках микрометра. Но приблизительное рассмотрение количественных условий показывает, что это предположение неосновательно, а в дальнейших опытах такого рода предположение вообще не может быть выдвинуто.

Замкнем опять искровой микрометр при помощи хорошего металлического провода, например медной проволоки диаметром 2 мм и длиной 0,5 м, согнутой в прямоугольник. При этом мы не включаем его в разрядную цепь индукционной катушки, а соединяем только один из ее полюсов с какой-нибудь точкой разрядной цепи при помощи промежуточной проволоки. На рис. 109 представлено расположение приборов: *A* — индукционная катушка, *B* — разрядник, *M* — микрометр. Во время действия индукционной катушки мы будем опять наблюдать в микрометре поток искр, достигающий иногда длины в несколько миллиметров. Этот опыт показывает, во-первых, что в момент разряда интенсивные электрические движения происходят не только в самой цепи, замыкающей разрядник, но и во всех соединенных с ним проводах; во-вторых, он показывает нагляднее, чем предыдущий опыт, что эти движения происходят очень быстро и поэтому должен быть принят во внимание даже тот промежуток времени, в продолжение которого электрические волны проходят через короткие металлические провода. В самом деле, опыт этот можно объяснить только таким образом, что изменение потенциала, создаваемого индукционной катушкой, достигает шарика 1 заметно раньше, чем шарика 2. Это явление становится поразительным, если принять во внимание, что электрические волны, насколько нам известно, распространяются в медных проволоках почти со скоростью света.

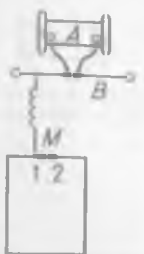


Рис. 109

Индукционные действия незамкнутых токов

Искры, появившиеся при предыдущих опытах, возникают, по нашему предположению, благодаря самоиндукции. Но если принять во внимание, что это индукционное действие вызывается крайне слабыми токами в коротких прямых проводах, то мы

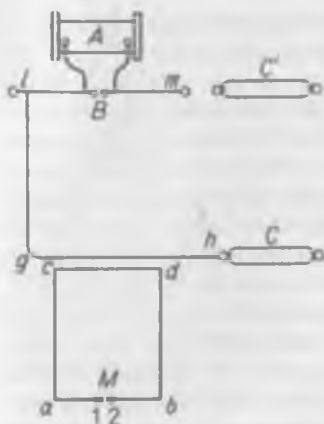


Рис. 110

вираве усомниться, действительно ли его можно считать достаточным объяснением появления искры. Для того чтобы устранить это сомнение, я старался узнать, не вызывают ли наблюдаемые электрические движения соответственных по силе действий также и в соседних проводах. Для этого я согнул из медной проволоки прямоугольнички со сторонами 10—20 см, имевшими весьма короткий искровой промежуток. Эти прямоугольнички, будучи изолированными, приближались к прямым проводам, в которых происходило движение электричества, и притом так, что одна сторона прямоугольничка была параллельна проводу. При достаточном приближении в том проводнике, который приближали, всегда появлялся поток искр, сопровождающий разряды индукционной катушки. Интенсивнее всего эти индуцированные искры появились вблизи разрядника, но они наблюдались также и около провода, ведущего к смежной цепи, равно как и у ветвей этой последней. Между индуцирующим и индуцируемым проводами разряд не происходил — это было тщательно констатировано; возможность такого разряда специально устранялась еще прокладкой твердого изолятора. В этом отношении ошибка в истолковании явления едва ли возможна. То обстоятельство, что индукция между двумя простыми короткими отрезками проволоки, в которых движутся лишь небольшие количества электричества, может все-таки возрасти до образования искры, снова указывает, что время, в продолжение которого эти небольшие количества электричества движутся в проводах туда и обратно, чрезвычайно мало.

Для того чтобы изучить эти явления поближе, я воспользовался прямоугольничком, который раньше служил смежной цепью, применяя его в качестве индуцируемого проводника. Как показывает рис. 110, вдоль короткой стороны прямоугольничка на расстоянии 3 см была натянута вторая медная проволока gh , которая соединялась с какой-нибудь точкой разрядника. Пока конец h проволоки gh был свободен, в микрометре M появлялись лишь совершенно ничтожные искорки, которые возникали под влиянием разрядных токов проволоки gh . Но в микрометре появлялись искры длиной от 1 до 2 мм, когда к h был подвешен изолированный кондуктор C , отделенный от электростатической машины, так что через проволоку должны были проходить большие количества электричества. Причиной этого не была электростатическая индукция кондуктора: когда он был подвешен вместо h в g , он не оказывал никакого действия. Зарядный ток кондуктора также не был тому причиной; это было исключитель-

но действие внезапного разряда, вызванного искрой. В самом деле, когда шарики разрядника кондуктора были раздвинуты настолько, что между ними не проскакивала искра, то и в индуцированной цепи искра также совсем не появлялась. Не всякого рода искра вызывала достаточно сильное действующий разряд. Только те искры, которые вызывали раньше сильные

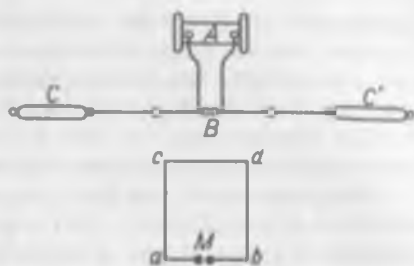


Рис. 111

смежные искры, оказывались способными возбудить в данном случае индукционное действие. Во вторичной цепи возбужденные искры переходили не только между шариками микрометра, но также и от последних к другим изолированным проводникам, которые приближались ко вторичной цепи. Искры заметно укорачивались при соединении шариков с кондукторами большой емкости или при прикосновении к одному из них рукой. Очевидно, количества электричества, приведенные в движение, были слишком малы, чтобы зарядить до полного напряжения проводник большой емкости. Наоборот, соединение обоих шариков микрометра посредством короткой влажной нитки не оказывало особого влияния на появление искры. Физиологические действия индуцированного тока не замечались; можно было, не ощущая сотрясения, прикасаться ко вторичному проводу, замыкать его через тело. <...>

Так как при только что описанном опыте индуцированные искры достигали длины в несколько миллиметров, то я не сомневался, что при значительно большем расстоянии между действующими отрезками проволок можно было еще получить искры, и поэтому я произвел в опыте несколько изменений, представляющих интерес. Индуцирующему току я придал вид прямой линии [рис. 111], когда его образовывали кондукторы C и C'. Последние находились на расстоянии 3 м один от другого и были соединены медной проволокой толщиной 2 мм, в середине которой находился разрядник индукционной катушки. Индуцируемая цепь была такой же, как и в предыдущих опытах, т. е. шириной 80 см, длиной 120 см. Когда наименьшее расстояние между обоими проводами было взято в 50 см, то еще получались индукционные искры длиной 2 мм; когда же расстояние увеличилось, длина искры быстро уменьшалась, но и при наименьшем расстоянии 1,5 м еще замечался регулярный поток искр. Без нарушения опыта можно было двигать между индуцирующим проводом и индуцируемым. То обстоятельство, что наблюдаемое явление действительно имело своей причиной прямолинейный ток, было подтверждено опять несколькими проверочными опытами. Когда я удалял одну или обе половины прямолинейного провода, искры в микрометре прекращались, хотя индукционная

катушка и продолжала действовать. Точно так же искры прекращались, когда шарики разрядника были раздвинуты настолько, что это препятствовало появлению в нем искр. Так как при этом электростатические напряжения на концах кондукторов C и C' только возрастают, то это и служит доказательством того, что эти напряжения не являются причиной искр в микрометре.

Индукционный ток был до сих пор замкнутым, но легко можно было предположить, что в незамкнутом проводнике индукция проявилась бы в не меньшей степени. Поэтому параллельно прямолинейной проволоке предыдущего опыта на расстоянии 60 см была натянута вторая медная изолированная проволока. Она была несколько короче первой, на ее концах были укреплены два изолированных шара диаметром 10 см, в середину ее был введен искровой микрометр. Когда индукционная катушка была приведена в действие, поток искр катушки сопровождался потоком искр во вторичном проводе. Здесь, однако, нужно быть осторожным в толковании опыта, так как наблюдаемые искры не являются исключительно следствием индукции. Переменное движение в проводе CC' налагается на собственный разряд катушки Румкорфа. Последний же в продолжение всего своего действия обуславливает заряд кондуктора C одним знаком, кондуктора C' — другим. Эти заряды не оказывали никакого действия на замкнутую цепь предыдущего опыта, но теперь в разомкнутом проводе благодаря исключительно электростатической индукции они обуславливают противоположные заряды обеих его частей, а вместе с этим и искры в микрометре. И на самом деле, если мы в данном случае раздвинем шарики разрядника до погашения в нем искр, то в микрометре будут все еще проскакивать искры, хотя и более слабые. Эти искры зависят от электростатической индукции, присоединяющейся к тому действию, которое мы хотим выделить.

Между тем существует простой способ устранить мешающие искры. Они исчезнут, если мы устроим плохо проводящее соединение между шариками микрометра, проще всего при помощи влажной нитки. Очевидно, что проводимость этой нитки достаточна для того, чтобы позволить току следовать за сравнительно медленными изменениями разряда катушки Румкорфа, но она недостаточна, как мы уже видели, для того чтобы способствовать выравниванию электричества при крайне быстрых колебаниях в прямолинейном проводе. Если мы после присоединения нитки вызовем опять в первичной цепи искру, то и во вторичном проводе опять появятся сильные искры, но они обусловлены уже исключительно действием быстрых колебаний в первичном прямолинейном проводе. Я испытывал, на каком расстоянии будет все еще проявляться это действие. При расстоянии 1,2 м между параллельными проволоками искры были еще вполне заметны: наибольшее расстояние по перпендикуляру, на котором можно еще было устойчиво наблюдать появление искр, было 3 м. Так как электростатическое действие уменьшается с расстоянием

быстрее индукционного, то при больших расстояниях было излишним усложнять опыт применением влажной нитки; даже и без последней только такие разряды, которые возбуждают в первичной проволоке колебания, вызвали искры во вторичном проводе.

Я думаю, что здесь впервые было показано на опыте взаимодействие прямолинейных разомкнутых токов, имеющее такое большое значение для теории. (...)

Об электродинамических волнах в воздухе и их отражении

Недавно я пытался доказать на опыте, что индукционное действие распространяется в воздухе с конечной скоростью¹. Соображения, на которых базировалось это доказательство, представляются мне вполне убедительными. Однако они выводились сравнительно сложным образом из довольно сложных фактов и поэтому могут показаться не вполне очевидными тем, кто с самого начала относится к этим рассуждениям с некоторым предубеждением. Поэтому целесообразно дополнить предыдущее доказательство рассмотрением описываемых ниже явлений, в которых волнообразное распространение индукции в воздухе делается почти непосредственно осязаемым. Кроме того, эти новые явления допускают возможность непосредственного измерения длины волны в воздухе. То обстоятельство, что эта непосредственно измеренная длина лишь очень мало отличается от косвенных измерений, произведенных ранее с тем же аппаратом, служит свидетельством, что и предыдущее доказательство в основном было правильным.

Производя опыты по изучению влияния прямолинейного вибратора на некоторый вторичный проводник, я неоднократно наблюдал явления, которые, по-видимому, объяснялись отражением индукционного влияния от стен помещения. Так, например, во многих случаях удавалось наблюдать слабые искры во вторичной цепи в таких положениях, для которых они никак не могли получиться благодаря непосредственному воздействию уже из геометрических соображений симметрии, а именно главным образом вблизи твердых стен. Особенно показательными представляются мне следующие наблюдения: изучая искры во вторичном проводнике на больших расстояниях от первичного, где, разумеется, искры были очень слабыми, я замечал, что во многих положениях вторичной цепи искры явно усиливаются, когда же я приближался к твердой стене, то в непосредственной близости к последней они почти внезапно исчезали. Простейшим объяснением казалось мне следующее: волнообразно распространяющееся индукционное действие отражается от стен, причем отраженные волны в некоторых местах усиливают падаю-

щие, в других — ослабляют, так что благодаря интерференции обеих волн в воздухе образуются стоячие волны. По мере улучшения условий отражения явление делалось все более отчетливым и предложенное объяснение казалось все более вероятным. Я не буду останавливаться здесь на предварительных опытах, а непосредственно перейду к описанию основных исследований.

Физическая аудитория, в которой производились эти опыты, имеет примерно 15 м длины, 14 м ширины и 6 м высоты. Параллельно двум длинным стенам расположены два ряда железных колонн, совокупность которых в отношении электродинамического действия ведет себя подобно сплошной стене, вследствие чего пространство, находящееся за ними, не должно приниматься во внимание. Благодаря этому для опытов остается пространство 15 м длины, 8,5 м ширины, 6 м высоты. Из этого пространства я удалил висячие части газовых труб и металлические подсвечники, так что в нем остались только деревянные столы и скамейки, вынести которые было затруднительно, но которые едва ли могли оказать заметное влияние. Одна из стен, от которой должно было происходить отражение, представляла массивную стену из песчаника, в ней имелись две двери; на стене находилось значительное количество газовых труб. Чтобы придать стене свойства проводящей поверхности, на ней был укреплен цинковый лист 4 м высоты и 2 м ширины. При помощи проволок он был соединен с газопроводами и близким водопроводом, причем особое внимание уделялось тому, чтобы по возможности облегчить утечку электричества, которое может накапливаться на верхнем и нижнем концах листа.

Против середины этого листа на расстоянии 13 м, т. е. в 2 м от противоположной стены, был установлен первичный провод. Это был тот же самый провод, который применялся при прежних исследованиях скорости распространения. Этот провод был теперь установлен вертикально, так что исследуемые силы колебались в вертикальном направлении. Середина первичного проводника была поднята над полом на 2,5 м. На такой же высоте производились и наблюдения, причем между столами и скамьями был оставлен проход для наблюдателя. Назовем перпендикуляр, опущенный из середины первичной цепи на отражающую поверхность, нормалью. Наши наблюдения производились вблизи нее. Опыты при большом угле падения значительно усложняются тем, что нужно считаться с возможностью различной поляризации волн. Вертикальная плоскость, параллельная нормали, является в наших опытах плоскостью колебаний; плоскость, перпендикулярную нормали, назовем плоскостью волн.

Вторичная цепь представляла собой уже использованный ранее проводник, согнутый по кругу радиуса 35 см. Он мог вращаться вокруг оси, проходящей через его середину и перпендикулярной его плоскости. Эта ось при опытах была горизонтальной. Она была укреплена в деревянной подставке таким образом, что можно было вращать ее вместе с контуром вокруг верти-

кальной оси. Правда, в большинстве опытов проводник, закрепленный в деревянной подставке, можно было держать в руке и устанавливать в наилучшем из различных положений. Но так как тело наблюдателя всегда оказывает некоторое влияние, то наблюдения, сделанные таким образом, необходимо контролировать потом наблюдениями с большого расстояния. При этом искры были достаточно сильны и их можно было заметить в затемненном помещении на расстоянии нескольких метров, в светлом же помещении описываемые явления незаметны даже на близком расстоянии.

Явление, которое при этих условиях наиболее важно, заключается в следующем: мы совмещаем среднюю точку вторичной цепи с нормалью, располагаем ее плоскость в плоскости колебаний и затем поворачиваем искровой промежуток сначала к отражающей стене, затем в противоположном направлении. Обычно в обоих положениях искры представляются весьма различными. Так, если мы будем производить опыт на расстоянии 0,8 м от стены, искры получатся более сильными, если искровой промежуток обращен к стене. Можно так отрегулировать длину искр, чтобы при обращении искрового промежутка к стене получались устойчивые искры, но в противоположном положении искры совершенно не наблюдаются. Если мы повторим опыт на расстоянии 3 м от стены, то найдем обратное: устойчивые искры получаются при повороте искрового промежутка к стене, а отсутствие искр — при повороте от стены. Если теперь удалиться от стены на 5,5 м, то явление снова изменится на обратное: искры будут получаться на стороне, обращенной к стене, но исчезнут на другой стороне. Наконец, на расстоянии 8 м от стены мы снова будем наблюдать обратную картину, искры получаются более сильными на стороне, удаленной от стены, но различие делается менее отчетливым. В дальнейшем обращения явления не происходит, так как вблизи первичной цепи оно маскируется сильным влиянием первичных колебаний и усложненной картиной поля вблизи первичной цепи. На рис. 112, где указан масштаб расстояния от стены, в местах I, II, III и IV вторичная цепь изображена в положениях, соответствующих наиболее сильному образованию искр. Переменный характер состояния пространства отчетливо выявляется на этой фигуре.

На расстояниях, лежащих между вышеуказанными точками, искры в обоих случаях получают одинаково интенсивными, причем в непосредственной близости к стене различие между искрами также отсутствует. Мы можем, таким образом, назвать эти точки, а именно *A*, *B*, *C*, *D* на фигуре, в известном смысле узловыми точками. Однако мы не должны считать, что расстояние от одной из этих точек до следующей равно половине длины волны. Дело в том, что если бы все электрические движения изменяли свое направление при переходе через одну из подобных точек, то явления во вторичной цепи должны были бы повторяться без всяких изменений, так как направление колебаний не

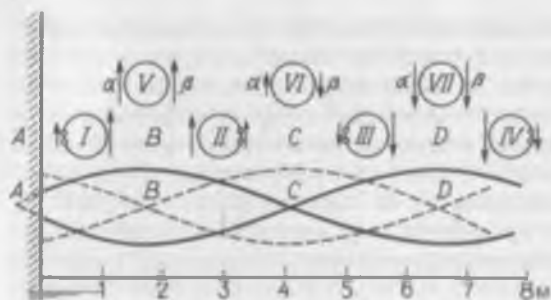


Рис. 112

волны соответствует удвоенное расстояние между подобными точками, так что эти точки могут быть названы концами четверти длины волны. Действительно, исходя из этого предположения и из изложенных выше основных представлений, мы придем к полному истолкованию явления.

Представим себе, что волна вертикальной электрической силы, распространяющаяся к стене, отражается с мало измененной интенсивностью, благодаря чему возникают стоячие волны. Если бы стена была идеально проводящей, то на ее поверхности обязательно образовалась бы узловая точка, так как электрическая сила внутри и на границе идеального проводника может быть лишь исчезающе малой. Но наша стена не является идеально проводящей, так как, во-первых, она не целиком металлическая, во-вторых, участки, покрытые металлом, не слишком велики. Поэтому на ее поверхности сила имеет еще некоторое значение, знак которого определяется проходящей волной. Поэтому узловая точка, которая при наличии идеальной проводимости получилась бы на самой стене, в действительности должна лежать за поверхностью, например в точке, обозначенной А.

Если удвоенное расстояние AB , т. е. расстояние AC , соответствует половине длины волны, то геометрическое изображение стоячей волны определится кривой, изображенной на фигуре сплошными линиями. Силы, действующие на обе стороны кругового проводника в положениях I, II, III, IV, для некоторого момента времени изображаются по величине и направлению стрелками. Таким образом, если вблизи узловой точки искровой промежутка обращен к ней, то большая сила действует в более благоприятных условиях, чем противоположная ей слабая сила, действующая в менее благоприятных условиях. Если же искровой промежутка обращен в сторону, противоположную узловой точке, то большая сила находится в менее благоприятных условиях, чем противоположная ей меньшая сила, условия действия которой более благоприятны. Какая бы из сил ни перевесила в последнем случае, несомненно, что искры окажутся более слабыми, чем в первом случае. Этим и объясняется изменение знака явления через каждую четверть длины волны.

влияет на величину искры. Из этого опыта скорее следует заключить, что при переходе через одну из подобных точек часть действий обращается, другая же часть остается без изменений. Поэтому более приемлемым является допущение, что половине длины

Наше объяснение само дает в руки средство его дальнейшей проверки. Если оно верно, то изменение знаков в точках *B* и *D* должно происходить совсем не так, как в точке *C*. Цифрами V, VI, VII отмечены положения цепи для этих точек и соответствующие силы. Легко видеть, что если мы, находясь в положении *B* или *D*, будем вращать цепь в ее собственной плоскости, то колебание изменит свое направление относительно некоторого фиксированного направления в цепи, а потому при вращении цепи искры должны обращаться в нуль один раз или же нечетное число раз. Напротив, при аналогичном процессе в *C* колебание не изменяет своего направления, а потому искры не должны исчезать совершенно или же должны исчезать четное число раз. Действительно, если произвести соответствующий опыт, то мы заметим, что в *B* интенсивность искр падает при удалении искрового промежутка из положения α , обращается в нуль в наивысшей точке и снова возрастает до первоначального значения при приближении к положению β . То же наблюдается и в *D*. Но в *C* вращение не изменяет картины искр; они лишь немного усиливаются в наивысшей и наинизшей точках. Далее, наблюдатель может установить, что изменение в *C* возникает при значительно меньших смещениях, чем в *B* и *D*, так что и в этом отношении изменение знака в точке *C* происходит отлично от изменений в точках *B* и *D*. (...)

Продолжим теперь наши исследования в другом направлении. До сих пор вторичный проводник находился между отражающей стеной и первичным проводником, т. е. в пространстве, в котором прямая и отраженные волны распространяются во взаимно противоположных направлениях и, интерферируя, образуют стоячие волны. Если же первичную цепь расположить между стеной и вторичной цепью, то последняя будет находиться в пространстве, в котором прямая и отраженная волны распространяются в одинаковом направлении. В этом случае они будут складываться в общую бегущую волну, интенсивность которой будет, однако, зависеть от разности фаз обеих интерферирующих волн. Для получения отчетливой картины этого явления обе волны должны иметь приблизительно одинаковую интенсивность, а потому расстояние первичного проводника от стены не должно быть велико по сравнению с размерами стены и должно быть мало по сравнению с расстоянием до вторичной цепи. Для выяснения вопроса о том, может ли это явление наблюдаться в действительности, я произвел следующий опыт. Вторичная цепь была расположена на расстоянии 14 м от отражающей стены, т. е. примерно в 1 м от противоположной стены. Ее плоскость была параллельна вышеупомянутой колебательной плоскости, а искровой промежуток был обращен к более близкой стене, так что условия для возникновения в нем искр были наиболее благоприятными. Первичная цепь, расположенная параллельно первоначальному положению, находилась против середины отражающей стены, причем сначала была удалена от нее на очень

малое расстояние — около 30 см. При этом искры во второй цепи были весьма слабы; искровой промежуток был отрегулирован так, чтобы искры совершенно исчезли. Теперь первичная цепь постепенно удалялась от стены. Вскоре во вторичной цепи появились отдельные искры, перешедшие в дальнейшем в непрерывную искру, когда первичный проводник находился на расстоянии 1,5—2 м от стены (отражающей), т. е. приблизительно в точке В. Это можно было бы приписать уменьшению расстояния между обоими проводниками. Однако при дальнейшем удалении первичного проводника от отражающей стены, т. е. при приближении его ко вторичному проводнику, искры снова ослаблялись, а непрерывная искра прекратилась, когда первичный проводник достиг точки С. При дальнейшем приближении искры непрерывно усиливались. Точное измерение длины волны в этих опытах невозможно, но из сказанного выше следует, что полученная ранее длина волны соответствует рассматриваемому явлению. Подобные же опыты могут быть очень хорошо проведены и с маленьким аппаратом. Соответствующий первичный проводник был установлен на расстоянии 1 м от отражающей стены, а вторичный проводник — на расстоянии 9 м. При этом искры в последнем были весьма слабы, но все же вполне доступны наблюдению. Они гасли, когда первичный проводник был смещен из первоначального положения, причем его можно было смещать как по направлению к стене, так и по направлению ко вторичному проводнику. Но когда расстояние его до стены составило 3 м, искры снова возникли, а при дальнейшем приближении ко вторичному проводнику уже не исчезали. Замечательно, что на одном и том же расстоянии (около 2 м) присутствие стены оказывается благоприятным в случае более медленных колебаний, но ухудшает условия распространения индукции в случае более быстрых колебаний. Это с очевидностью доказывает, что положение особых точек волны определяется размерами колебательных цепей, но не размерами стены или помещения.

Описанному опыту соответствует в акустике опыт, показывающий, что при приближении камертона к твердой стене звук его на определенных расстояниях усиливается, на других же ослабляется. В оптике аналогией нашему опыту является опыт Ллойда с зеркалами Френеля. В оптике и акустике эти опыты рассматриваются как доказательства волновой природы света и звука; поэтому описанные здесь явления следует рассматривать как доказательства волнового распространения индукционного действия электрических колебаний.

Опыты, описанные в этой статье, как и предшествовавшие опыты по распространению индукции, изложены без ссылок на какую-либо специальную теорию, так как убедительность этих опытов независима от какой бы то ни было теории. Однако ясно, что эти опыты могут служить обоснованием для той теории электродинамических явлений, которую создал Максвелл, осно-

вываясь на воззрениях Фарадея. Мне кажется, что в настоящее время связанная с этой теорией гипотеза о природе света получает еще большую убедительность, чем до настоящего времени. Весьма интересна идея, что изученные нами процессы в воздухе представляют те же явления, которые происходят между ньютоновскими стеклами или вблизи зеркал Френеля, но увеличенные в миллионы раз.

Максвелловская теория, несмотря на ее внутреннюю убедительность, нуждается как в описанных подтверждениях, так и в дальнейших. Это доказывается, если вообще требуется подобное доказательство, тем фактом, что скорость распространения электрических действий по хорошо проводящим проволокам не совпадает со скоростью распространения их в воздухе. До настоящего времени все теории, в том числе и максвелловская, приводят к заключению, что электричество распространяется по проволокам со скоростью света. Я надеюсь, что со временем мне удастся сообщить об опытах, объясняющих причину этого расхождения между теорией и опытом².

Комментарий

Перевод с немецкого работы Г. Герца «О весьма быстрых электрических колебаниях» выполнен И. Мчедловым, работы «Об электродинамических волнах в воздухе и их отражении» — Н. Н. Маловым. Отрывки из них воспроизводятся по изданию: Из предисловия радио. Сост. С. М. Рытов/Под ред. Л. И. Мандельштама. М. — Л. (Первые публикации статей: *Annalen der Physik*, 1887, Bd. 31, s. 421—448; 1888, Bd. 34, s. 609—623.), 1948.

¹ Речь идет о статье Герца «О скорости распространения электродинамического действия», опубликованной в 1888 г.

² В 1891 г. Герц сделал примечание: «Это замечание касается опытов по распространению в проводах, производившихся мною во время писания статьи. (...) Высказанная мною надежда не оправдалась».

Литература

- [1] Собрание сочинений Г. Герца:
Hertz H. Gesammelte Werke.
Bd. 1 *Schriften vermischten Inhalts.* Leipzig, 1895.
Bd. 2 *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft.* Leipzig, 1892.
Bd. 3 *Die Prinzipien der Mechanik, in neuem Zusammenhange.* Leipzig, 1894.
- [2] Heinrich Hertz: *Erinnerungen, Briefe, Tagebücher.* Leipzig, 1927.
- [3] Григорьян А. Т., Вяльцев А. Н. Генрих Герц. М., 1968.



А. Г. Столетов

1839—1896

О фотоэффekte

Фотоэлектрический эффект был одним из первых физических явлений, который был объяснен на основе представления о квантах света. Интересно, что он был обнаружен Г. Герцем в 1887 г. при проведении опытов, которые в конечном счете подтвердили предсказание электродинамики Максвелла, базирующейся на представлении о непрерывности характеристик поля. Герц обнаружил, что при освещении разрядника светом искры в нем возникал более сильный разряд. Исследованием этого эффекта занялись физики разных стран (среди них А. Риги в Италии, Е. Биша, Р. Блондло во Франции, В. Гальвакс, Г. Эберт, Э. Видеман в Германии и др.). В России этими исследованиями занялся А. Г. Столетов, обнаруживший вскоре несколько важных закономерностей фотоэффекта

Александр Григорьевич Столетов родился 10 августа 1839 г. во Владимире в купеческой семье, в которой много внимания уделяли образованию детей. Окончив гимназию в родном городе, Столетов поступил в Московский университет, с которым впоследствии была связана вся его научная и педагогическая деятельность. Студент, аспирант, профессор математической, а затем и экспериментальной физики, создатель первой в России университетской научно-исследовательской лаборатории, признанный глава русских физиков — таков путь, пройденный Столетовым в науке. После окончания университета он совершенствует свое образование в Берлинском университете у Г. Магнуса, а затем в университете Гейдельберга у Р. Кирхгофа. И в дальнейшем ученый широко общается с выдающимися физиками Европы, участвует в работе международных конгрессов и конференций как представитель русской физической науки.

Известность получила защищенная в 1872 г. докторская диссертация А. Г. Столетова «Исследование о функции намагничивания мягкого железа», экспериментальная часть которой была выполнена ученым в лаборатории Кирхгофа. Поставив задачу исследовать зависимость коэффициента восприимчивости (Столетов называл его «функцией намагничивания») от внешнего

магнитного поля, он разработал новый метод измерения магнитных свойств вещества на образцах, имеющих форму кольца. Этот метод, названный баллистическим, получил большое распространение в практике магнитных измерений. Таким образом, Столетов развил работы в этой области, начатые еще Э. Х. Ленцем и Б. С. Якоби.

Получили известность исследования Столетова несамостоятельного газового разряда, в процессе которых он установил, что отношение напряженности электрического поля к давлению газа при максимальном токе есть величина постоянная (она названа константой Столетова).

Столетов одним из первых отметил важность проведения экспериментов, подтверждающих справедливость электромагнитной теории света, и предложил новый метод определения отношения электростатических и магнитных единиц, позволявший получить значение скорости света. О своем методе, названном им «методом абсолютного конденсатора», он сделал сообщение на заседании Французского физического общества в Париже во время проведения первого международного конгресса электриков.

Столетов с энтузиазмом воспринял известие о знаменитых опытах Герца по получению и исследованию свойств электромагнитных волн, в ходе которых был обнаружен фотоэффект. Первые опыты по изучению этого явления ученый начал 20 февраля 1888 г. Вскоре к нему пришел успех, и уже в 1889 г. он публикует свою фундаментальную работу «Актино-электрические исследования» (так Столетов называл фотоэлектрический эффект). Следует отметить, что свои опыты Столетов проводил, не зная о существовании электронов, и поэтому был вынужден ограничиться чисто феноменологическим описанием закономерностей фотоэффекта. Лишь позднее (1899—1900) было доказано, что он заключается в испускании электронов с поверхности металлов под действием падающего света. Объяснение закономерностей, обнаруженных Столетовым, было дано после выдвижения А. Эйнштейном идеи о квантах света (1905). А. Г. Столетов умер 14 мая 1896 г.

Актино-электрические исследования

Повторяя в начале 1888 г. интересные опыты гг. Герца, Э. Видемана и Эберта, Гальвакса относительно действия лучей на электрические разряды высокого напряжения, я вздумал испытать, получится ли подобное действие при электричестве слабых потенциалов. Кроме прямого ответа на заданный вопрос такое видоизменение опытов представляло, на мой взгляд, двоякий интерес: с одной стороны, оно позволило бы ярче выставить на вид загадочное действие лучей, не смешивая его с обыкновенным

рассеиванием электрических зарядов (которое в случае слабых потенциалов бывает вообще ничтожно); с другой стороны, явилась бы возможность подвергнуть явление более точному измерительному изучению, чем это имело место в опытах названных ученых. Методы измерений вообще довольно несовершенны, когда речь идет о высоких потенциалах электрических машин и лейденских банок, и измерительные снаряды такого рода встречаются не везде, между тем как чувствительный гальванометр и обыкновенный квадрант-электрометр имеются во всяком физическом институте и употребление их удобно и надежно.

Моя попытка имела успех выше ожидания. Первые мои опыты начаты около 20 февраля 1888 г. и продолжались непрерывно, насколько позволяли другие занятия, по 21 июня 1888 г. В течение этого времени мне удалось, полагаю, осветить некоторые любопытные вопросы относительно «актиноэлектрических» действий*. Некоторые дополнительные наблюдения произведены во второй половине 1888 г. и в текущем году, и я еще не считаю моего исследования законченным. <...>

1. Основной опыт, который после некоторых неудач, зависевших от выбора гальванометра, совершенно убедительно удался 26 февраля [ст. ст.] 1888 г., состоял в следующем.

Два металлических диска («арматуры», «электроды») в 22 см были установлены вертикально и друг другу параллельно (рис. 113) перед электрическим фонарем Дюбоска, из которого вынуты все стекла. В фонаре имелаась лампа с вольтовой дугой *A* (регулятор Фуко — Дюбоска), питаемая динамомашинкой (обыкновенно около 70 В, 12 А). Один из дисков *C*, ближайший к фонарю, сделан из тонкой металлической сетки (встречаемой в продаже), латунной или железной, иногда гальванопластически покрытой другим металлом, которая была натянута в круглом кольце; другой диск — сплошной (металлическая пластинка).

Диски соединены между собой проволокой, в которую введены гальваническая батарея *B* и чувствительный астатический гальванометр Томсона *G* с большим сопротивлением (5212 Ом), который наблюдался по английской методе (с лампой и скалой). Чувствительность гальванометра без верхнего астазирующего магнита была такова, что одно деление соответствовало $6,7 \cdot 10^{-10}$ А; при астазирующем же магните наивысшая чувствительность, какой я пользовался (время качания около 17 с), давала 1 дел. $2,7 \cdot 10^{-11}$ А. Батареи употреблялись различные (Вольты, Даниэля, Беетца, Гасснера, Л. Кларка) и с различным числом элементов (от 1 до 200); иногда, как увидим ниже, батарея исключалась.

Таким образом, мои два диска представляли род воздушного конденсатора, заряжаемого сравнительно невысокой электродви-

* Этот термин казался мне наиболее естественным для обозначения тех явлений, о которых идет речь; по моему почину он принят и некоторыми другими учеными, например Биша и Блондло, Боргманом и др..

жушей силой. Благодаря свойству передней, сетчатой, арматуры задняя арматура могла быть освещена лучами вольтовой дуги с внутренней стороны, т. е. с той, где преимущественно накапливается электрический заряд. Другая арматура (сетка) освещалась лишь с невыгодной (слабо заряженной) стороны прямыми лучами, с внутренней же стороны — лишь отраженными от сплошного диска. Такая комбинация казалась мне наиболее удобной, чтобы обнаружить разряжающее действие лучей, что и оправдалось вполне. Размеры дисков были рассчитаны так, чтобы при расстоянии их от вольтовой дуги около 20 см (т. е. довольно малом, но не дающем еще слишком быстрого и большого нагревания) арматуры освещались на всем протяжении лучами, выходящими из отверстия фонаря (10 см диаметра).

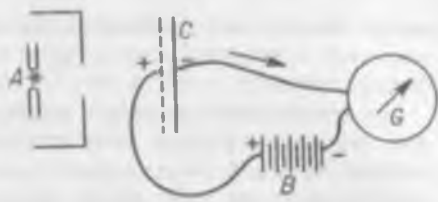


Рис. 113

Этот «сетчатый конденсатор» составляет главную и существенную принадлежность почти всех моих опытов. Уже в течение работы я узнал, что г-н Риги употребляет такое же приспособление для опытов, аналогичных с моими, но произвольных при помощи *электрометра*; думаю, что при моей (гальванометрической) методе оно имеет более существенное значение.

Я назвал пару дисков *конденсатором*. Мы можем, с другой стороны, назвать их парой *электродов*, погруженных в воздух, который при известных условиях освещения должен был обнаружить действительную или кажущуюся электропроводность — пропускать электрический ток, как бы замыкая собой «цепь» (разорванную этим воздушным слоем, пока нет действия лучей). В последующем я называю диски то арматурами, то электродами.

Уже предварительные опыты с другим гальванометром, старой системы (Дюбуа — Реймона), убедили меня, что не только батарея в 100 элементов ($\text{Zn}|\text{Ag}|\text{Cu}$), но и гораздо меньшая дает во время освещения дисков несомненный ток в гальванометре, если только цельный (задний) диск соединен с ее отрицательным полюсом, а сетчатый (передний) — с положительным. Слово *ток* употребляю в самом общем смысле, не решая пока, какого рода процесс здесь происходит — кондуктивный, электролитический или конвективный. С гальванометром Томсона явление стало еще ярче и могло быть прослежено даже при электродвижущих силах, составляющих небольшую долю 1 В — (до 1/20 и даже до 1/100). Как увидим ниже, малые электродвижущие силы дают даже при сближенных электродах сравнительно более сильный ток; другими словами, кажущееся сопротивление освещенного конденсатора с тонким воздушным слоем становится тем меньше, чем меньше разность потенциалов двух арматур (впоследствии я подробнее формулирую это замечание).

Со сравнительно высокими потенциалами (100—200 элементов) ток был заметен даже при расстоянии между арматурами свыше 10 см.

Если задний (изнутри освещаемый) диск конденсатора служит отрицательным полюсом батареи, а передний (сетка) — положительным, в цепи идет электрический ток всякий раз, когда лучи вольтовой дуги беспрепятственно падают на арматуру.

2. Если переместить полюсы батареи, т. е. сделать цельный диск положительным, а сетчатый — отрицательным, то обыкновенно получается некоторый ток (в обратную сторону); но он сравнительно слаб, величина его зависит от свойства сетки и при известной подготовке сетки может быть уменьшена до нуля. Очевидно, что и здесь играет роль исключительно освещение *отрицательного* электрода — освещение *невыгодное* (прямые лучи падают лишь на наружную поверхность сетки, внутренняя освещена отраженными от цельного диска лучами), но все-таки существующее. Если сетка только что вытравлена азотной кислотой и совершенно суха, этот обратный ток еще довольно значителен; если сетка окислена, загрязнена, покрыта лаком — он становится ничтожным; если сетка после очистки кислотой погружена была в воду, так что вся ее поверхность влажна и петли застланы водяной пленкой, обратный ток пропадает совершенно, хотя *прямой* ток (при сплошном диске отрицательном и сетке положительной) несколько не изменился после такой обработки сетки. Объяснение этих последних фактов откроется из последующего.

Ввиду всего этого я с самого начала моих исследований категорически настаивал* на совершенной униполярности актиноэлектрического действия, т. е. на нечувствительности положительных зарядов к лучам. <...>

Уже прежние наблюдатели заметили** громадное влияние чистки на чувствительность металлической поверхности; то же, всегда без исключения, получалось и у меня. Для чистки я употреблял обыкновенно «венскую известь». Даже мало окисляющиеся металлы, например Ni, Ag, Pt, недавно (например, накануне) очищенные и на взгляд сохранившиеся в полной чистоте, становятся в $1\frac{1}{2}$, в 2 раза чувствительнее тотчас после новой чистки; эта пропорция становится еще больше для залежавшихся поверхностей, для легко окисляющихся металлов (Zn): в этих условиях чувствительность может упасть весьма низко с течением времени. По-видимому, тончайший слой окиси (или же слой адсорбированного газа?) играет роль более или менее прозрачного (для активных лучей) вещества, вроде влаги, растворов солей и т. п. С другой стороны, латунный круг, будучи покрыт черной окисью меди, выиграл в чувствительности***. По-

* В первой и второй заметках.

** Hallwachs. Wied. Ann., XXXIII, 30.

*** В новой своей статье (Wied. Ann., XXXVII, 666) Гальвакс рекомендует вместо чистки прокаливание и замечает, что образующийся при этом слой окиси не мешает чувствительности. Я не делал таких опытов.

крытие копотью может усилить чувствительность старой, давно нечищенной металлической поверхности, но далеко не в той мере, как чистка (венской известью). О большой чувствительности анилиновых красок (и в сухом виде) я уже сказал выше.

Нужно заметить, что свежая чистка, всегда усиливая чувствительность металла, вместе с тем придает ей менее стойкий характер; только что вычищенный круг быстрее *утомляется*, особенно под действием лучей, т. е. быстрее теряет чувствительность. Поэтому при опытах, требующих постоянства эффекта в течение некоторого времени, я предпочитаю не употреблять только что очищенного диска, а делать чистку за несколько часов, еще лучше накануне. <...>

6. Единственным источником лучей, пригодным для моих опытов, могла служить *вольтова дуга*, и с помощью ее проведены все мои исследования. Другие источники (пламя бунзеновой горелки, горящий магний, индуктивная искра) давали действие, но весьма слабое, солнечный же свет — никакого. <...>

8. Пропорциональность актиноэлектрических действий в двух совершенно различных и различно заряженных конденсаторах имеет и другое важное значение. Чтобы объяснить себе эту пропорциональность, необходимо допустить, что при равных прочих условиях *действие* (сила тока) *пропорционально напряженности освещения* или, лучше сказать, количеству активных лучей.

Чтобы проверить этот вывод другим путем, я употреблял способ прерывистого освещения. Большой картонный круг с семью окошками по секторам (причем окошки и промежутки все одинаковой ширины) помещался вертикально между фонарем и конденсатором и приводился во вращение с различными скоростями, начиная от весьма медленной (1 оборот в 1 с, причем гальванометр показывал еще постоянное отклонение) до самой большой, какую удобно было получить (11 оборотов в 1 с). Попеременно делались наблюдения актиноэлектрического тока — при покое (постоянном освещении) и при вращении с определенной скоростью; оказалось, что в последнем случае ток весьма точно равен половине полного. Так, в одном ряде наблюдений с возрастанием скорости получились отношения 0,501, 0,493, 0,503, в другом — 0,511, 0,498, 0,501. (Большого согласия нельзя и ожидать, тем более что особого контрольного аппарата не было, а просто чередовались наблюдения при покое и при вращении.) Значит, действительно эффект пропорционален энергии активных лучей.

Этот опыт с прерывистым действием доказывает еще и нечто: доказывает, что лучи производят свое полное действие даже в том случае, когда падают на диск в течение малой доли секунды (около $1/150$ с при моей наибольшей скорости вращения). Но такой опыт не решает еще вопроса о том, состоит ли это действие из ряда отдельных электрических толчков, современных с освещением и разделенных промежутками электрического покоя, или

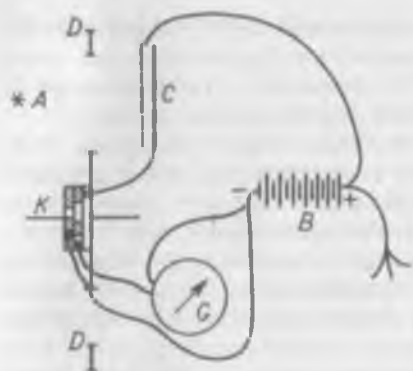


Рис. 114

же происходит более или менее непрерывный, быть может, даже постоянный ток, сила которого соответствует средней силе освещения. (...)

Нижеследующая придуманная мной метода представила немало затруднений, но в конце концов приводит, полагаю, к тому выводу, что время, в течение которого актиноэлектрический ток достигает своей окончательной величины, весьма ничтожно, другими словами, действие лучей можно считать, практически говоря, мгновенным.

На оси картонного круга DD с восемью вырезами по секторам, подобного вышеупомянутому, был насажен особый прерыватель или коммутатор K [рис. 114]. Он состоял из эбонитового кружка с восемью металлическими, никелированными накладками по окружности, к которым прилежали металлические, тоже никелированные кисточки; две из них соединены с отрицательным полюсом батареи, притом одна через гальванометр, другая — особой проволокой, и так, что когда одна кисточка лежит на металле, другая прикасается к эбонитовому промежутку; третья кисточка постоянно упиралась в металл прерывателя и соединялась с диском, а положительный полюс батареи — с сеткой конденсатора C (и с землей). Таким образом, при вращении картона с прерывателем актиноэлектрическая цепь замыкается попеременно то через гальванометр, то мимо него.

При вращении картона диски конденсатора C претерпевают по очереди различные фазы освещения, которые будем обозначать терминами астрономии. Картон и конденсатор стояли в таких расстояниях от лампы, что *полное затмение* последнего продолжалось одно мгновение; в этот момент тень непрозрачного сектора своими боковыми границами (радиусами) как раз касалась окружности отрицательного диска; мгновенно же совершалось и полное освещение (*полнолуние*). Благодаря коммутатору, вращающемуся вместе с картоном, гальванометр собирает только часть актиноэлектрических токов (другая часть проходит через побочное сопротивление); но эта часть уже не половина полного тока (т. е. того, какой соответствовал бы непрерывному полнолунию), а меньше $1/2$, и притом различна, смотря по тому, в какие фазы совершается коммутация.

Допустим, что коммутатор установлен на оси вращения таким образом, что включение гальванометра в цепь происходит в момент *первой четверти* [рис. 115, а], выключение — в момент *последней четверти* [рис. 115, с]. (Подобное сопротивление выключается непосредственно перед включением гальванометра

и включается вслед за выключением последнего.) Гальванометр будет давать ток, соответствующий сумме разрядов, совершающихся в промежутке времени от первой до последней четверти [рис. 115, б]; этот ток, как показывает вычисление, равен 0,394 полного тока (maximum).



Рис. 115

На опыте естественно ожидать несколько большего числа вследствие того, что разряженный диск остается (хотя краткое время) изолированным и в это время несколько изменяет свой потенциал, который затем пополняется. Сдвинув коммутатор настолько, чтобы моменты коммутации совпадали с моментами полнолуния и новолуния, теоретически получим 0,250 полного тока. Сдвинув его еще так, чтобы включение гальванометра совершалось в момент последней четверти, получим 0,106 (minimum).

Но этот расчет должен оправдываться лишь в том случае, если сила тока в каждый момент в точности соответствует наличному освещению; если это не так, теоретические числа получатся на опыте лишь при достаточно медленном вращении, а при возрастающих скоростях должны постепенно меняться в указанных пределах (между 0,106 и 0,394). Пусть, например, коммутатор установлен на maximum (0,394); если ток *опаздывает* и в каждый момент сила его соответствует не современной фазе освещения, а несколько более ранней, мы получим в гальванометре менее чем 0,394 полного тока; с увеличением скорости вращения пропорция будет понижаться до 0,106, потом опять возрастать и т. д. Запаздывание тока отзовется на наблюдениях так же, как отозвалось бы постепенное поворачивание коммутатора на оси — из наиболее *выгодного* (максимального) расположения в менее и менее выгодное и т. д. Если, например, при всех доступных скоростях пропорция тока в гальванометре останется одна и та же, это будет значить, что запаздывание тока незаметно, что он, говоря практически, устанавливается мгновенно и в каждый момент соответствует существующей силе освещения. (...)

13. Итак, окончательный результат этих измерительных попыток представляется в следующем виде.

Электрический ток, который является между armатурами конденсатора вследствие действия лучей на отрицательную armатуру, или же ток из батареи к armатурам, восстанавливающий между ними разность потенциалов, которую стремится понизить освещение, определяется *плотностью* заряда на поверхностях armатур; другими словами, величиной *электрической силы* при этих поверхностях. С возрастанием плотности σ ток i сперва растет быстрее, чем σ , потом все медленнее, стремясь, так сказать, к не-

которому насыщению (которое однако же никогда при опытах не достигалось вполне). <...>

15. Во всем предыдущем изложении мы принимали, что электродвижущая сила, или разность потенциалов между арматурами конденсатора, определяется исключительно той батареей, которая его заряжает. Из того факта, что ток является даже при 1/100 В и что, очевидно, только нечувствительность гальванометра мешает усмотреть его при еще меньших E , следует заключить, что никакой заметной поляризации в нашем снаряде не происходит, что его электроды (если обозначить их этим именем) суть электроды неполяризующиеся. С другой стороны, мы видели (14), что действие лучей не убавляет заметным образом разности потенциалов арматур, которая остается равной E .

Но разность потенциалов в воздушном конденсаторе в точности определяется электродвижущей силой заряжающей батареи лишь при том условии, чтобы ее арматуры были из одинакового металла; иначе эта разность была бы равна $E \pm M/M'$, где M/M' — электрическая разность двух металлов. <...>

17. Не касаясь в этой статье опытов, произведенных мной пока еще в предварительном виде, над актиноэлектрическими разрядами в различных газах и парах и под различными давлениями, постараюсь вкратце сопоставить результаты, найденные для воздуха при обыкновенном давлении.

1. Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносят с него заряд. Смотря по тому, пополняется ли заряд и насколько быстро, это удаление заряда может сопровождаться заметным падением потенциала или нет.

2. Это действие лучей есть строго униполярное; положительный заряд лучами не уносится.

3. По всей вероятности, кажущееся заряджение нейтральных тел лучами объясняется той же причиной.

4. Разряжающим действием обладают, если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими, лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре ($\lambda < 295 \cdot 10^{-6}$ мм). Чем спектр обильнее такими лучами, тем сильнее действие.

5. Для разряда лучами необходимо, чтобы лучи поглощались поверхностью тела. Чем больше поглощение активных лучей, тем поверхность чувствительнее к их разряжающему действию.

6. Такой чувствительностью, без значительных различий, обладают все металлы, но особенно высока она у некоторых красящих веществ (анилиновых красок). Вода, хорошо пропускающая активные лучи, лишена чувствительности.

7. Разряжающее действие лучей обнаруживается даже при весьма кратковременном освещении, причем между моментом освещения и моментом соответственного разряда не протекает заметного времени.

8. Разряжающее действие, *ceteris paribus*¹, пропорционально энергии активных лучей, падающих на разряженную поверхность.

9. Действие обнаруживается даже при ничтожных отрицательных плотностях заряда; причина его зависит от этой плотности; с возрастанием плотности до некоторого предела оно растет быстрее, чем плотность, а потом медленнее и медленнее.

10. Две пластинки разнородных в ряду Вольты металлов, помещенные в воздухе, представляют род гальванического элемента, как скоро электроотрицательная пластинка освещена активными лучами.

11. Каков бы ни был механизм актиноэлектрического разряда, мы вправе рассматривать его как некоторый ток электричества, причем воздух (сам ли по себе или благодаря присутствию в нем посторонних частиц) играет роль дурного проводника. Кажущееся сопровождение этому току не подчиняется закону Ома, но в определенных условиях имеет определенную величину.

12. Актинэлектрическое действие усиливается с повышением температуры.〈...〉

Комментарий

Отрывки из работы «Актинэлектрические исследования» публикуются по изданию: Столетов А. Г. Собрание сочинений, т. I. М. — Л., 1939.

¹ При прочих равных условиях (лат.).

Литература

- [1] Столетов А. Г. Собрание сочинений. В 3 т. М. — Л., 1939—1947.
- [2] Соминский М. С. Александр Григорьевич Столетов. Л., 1970.
- [3] Тепляков Г. М., Кудряцев П. С. А. Г. Столетов М., 1966.



П. Н. Лебедев

1866—1912

О давлении света

Идея о существовании давления света была сформулирована очень давно: еще в начале XVII в. И. Кеплер высказал мысль, что форма кометных хвостов объясняется действием на них излучения Солнца. На протяжении XVIII—XIX вв. не раз предпринимались попытки обнаружить давление света с помощью эксперимента; все они, однако, окончились неудачей. Проблема опытного обнаружения давления света стала особенно острой после создания Дж. К. Максвеллом электромагнитной теории света, из которой непосредственно следовало существование этого эффекта. Тщательные опыты выдающегося русского физика П. Н. Лебедева, в которых была измерена величина давления света на твердые тела, стала не только шедевром экспериментального искусства, но и ярким подтверждением теории Максвелла.

Петр Николаевич Лебедев родился 8 марта 1866 г. в Москве в состоятельной семье коммерсанта. Отца его видел в сыне будущего хозяина большого торгового дома. Поэтому мальчик был отдан в коммерческую школу, а затем в реальное училище.

Однако молодой Лебедев чувствовал непреодолимую тягу к науке. Он отверг карьеру предпринимателя и отправился учиться в Страсбург к немецкому ученому А. Кундту — главе школы экспериментальной физики, где стажировались молодые ученые из многих стран мира, в том числе и русские физики А. А. Эйхенвальд, Б. Б. Голицын и др.

В 1891 г. Лебедев успешно заканчивает Страсбургский университет и возвращается в Москву. А. Г. Столетов берет молодого ученого к себе на кафедру в университет, где Лебедев получает возможность ставить эксперименты в хорошо оборудованной лаборатории.

После смерти Столетова Лебедев берет на себя руководство кафедрой. С 1901 г. П. Н. Лебедев — профессор Московского университета. Добившись расширения лаборатории, основанной Столетовым, и преобразовав ее в научно-исследовательский институт, Лебедев стал во главе творческого коллектива, проводившего экспериментальные исследования по акустике, физике

разреженных газов, земному магнетизму. Созданную им научную школу отличали такие черты, как коллективизм, стремление к техническому и методическому совершенству экспериментов, тщательное планирование исследований. Из школы Лебедева вышли П. П. Лазарев, В. К. Аркадьев, С. И. Вавилов, Т. П. Кравец, А. К. Тимирязев, А. Б. Млодзеевский и др.

В 1911 г. Лебедев в расцвете творческих сил вынужден был подать в отставку вместе с другими прогрессивными преподавателями Московского университета в знак протеста против попыток царского правительства нарушить автономию университета. Для Лебедева принятие этого решения было актом большого гражданского мужества, ибо с уходом из университета он лишился лаборатории и, следовательно, возможности продолжать научные исследования. И хотя ему была предоставлена возможность создать (на частные средства) новую лабораторию в городском университете им. А. Л. Шанявского, полностью оправиться от событий 1911 г. ученый не смог. Лебедев умер от болезни сердца 14 марта 1912 г.

Еще находясь в Страсбурге, Лебедев составил план основных исследований, которого придерживался всю жизнь. Он решил посвятить себя актуальной тогда проблеме пондеромоторных проявлений волн различной природы, в том числе электромагнитных.

В 1895 г. ученый публикует исследование «О двойном преломлении электрической силы», которое свидетельствует о его глубоком интересе к электромагнитной теории света Максвелла и опытам Герца. Уже в этой работе проявился талант Лебедева как экспериментатора. Он создает установку, позволяющую генерировать электромагнитные волны с рекордно короткой длиной волны 6 мм. С помощью этих волн он проводит все основные опыты Герца и дополняет их экспериментами по поляризации.

Лебедев стремился выяснить механизм молекулярного взаимодействия, отождествляя молекулу с электромагнитным вибратором. Изучив действие электромагнитных волн на электрический резонатор, он приступил к изучению механических действий гидродинамических волн, а затем и звуковых. Им были установлены общие закономерности пондеромоторных действий (взаимного притяжения или отталкивания резонатора и вибратора в зависимости от соотношений их частот) всех трех типов волн. Эти исследования были необходимым этапом в достижении конечной цели Лебедева — обнаружения и измерения давления света.

Впервые результаты работы П. Н. Лебедева по световому давлению на твердые тела были обнаружены в августе 1900 г., когда на Всемирном конгрессе физиков в Париже Лебедев сделал доклад о своих экспериментах. Дополненный текст доклада в виде статьи был напечатан в 1901 г. в журнале «Annalen der Physik» под названием «Опытное исследование светового давления». Работа Лебедева была сразу же очень высоко оценена в международных научных кругах. Так, известный немецкий физик-

экспериментатор Ф. Пашен писал Лебедеву: «Я считаю Ваш результат одним из важнейших опытов, тем более что я сам несколько времени назад задался целью доказать световое давление и проделывал подобные же опыты, которые, однако, не дали положительного результата».

Успех окрылил ученого, и он взялся за решение еще более трудной задачи — определить давление света на газы. Сложность опытов состояла в том, что и без того слабый эффект в случае давления на газы уменьшался еще на два порядка (по сравнению с давлением на твердые тела). Кроме того, конвекционные потоки, неизбежно возникающие в газах, создают дополнительные трудности, которых можно избежать при проведении экспериментов с твердыми телами в вакуумированных сосудах. Лебедеву удалось преодолеть все трудности и в 1909 г. завершить исследование. За свои экспериментальные работы Лебедев был избран почетным членом Королевского института Великобритании.

Опытное исследование светового давления

Развивая основные положения электромагнитной теории света, Максвелл (1873) обратил внимание и на те силы, которые являются нам в виде пондеромоторных сил во всякой магнитно- или электрически-поляризованной среде; из его теории неизбежно следует необходимость существования этих сил также во всяком пучке лучей, и Максвелл говорит: «В среде, в которой распространяется волна, появляется в направлении ее распространения давящая сила, которая во всякой точке численно равна количеству находящейся там энергии, отнесенной к единице объема». (...)

Бартоли (1876) пришел к тождественному выводу, следуя по совершенно иному пути и, видимо, не зная указанного Максвеллом свойства луча, Бартоли указывает круговые процессы, которые должны бы дать возможность при помощи подвижных зеркал переводить лучистую энергию от более холодного тела к более тепловому, и вычисляет ту работу, которую надо затратить в этом случае согласно второму закону термодинамики. Необходимость затрачивать работу при передвижении зеркала навстречу падающему лучу заставляет предположить, что падающий луч давит на зеркало. Бартоли вычислил величину этого давления; результат, им полученный, совершенно совпадает с результатом, полученным Максвеллом.

Если пучок параллельных лучей падает отвесно на плоскую поверхность, то величина максвелло-бартолиевского давления определяется количеством падающей в секунду энергии E , коэффициентом отражения поверхности и скоростью распространения луча v ; тогда

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

где ρ заключено между 0 в случае абсолютно черной и 1 в случае абсолютно отражающей поверхности.

Величина этого давления лучей весьма мала. Как Максвелл, так и Бартоли вычислили, что лучи Солнца, падая отвесно на плоскую поверхность 1 м^2 , должны производить давление, которое в случае черной поверхности равно 4 мг, а в случае зеркала — 0,8 мг. <...>

Максвелло-бартолиевы силы давления лучей могут со временем получить большое значение в вопросах физики и астрономии, а потому опытное исследование этих сил является тем более желательным, что теоретические обоснования их как по Максвеллу, так и по Бартоли опираются на определенные элементарные свойства поглощающих и отражающих поверхностей, и потому может возникнуть вопрос, действительно ли только этими элементарными свойствами поверхностей обусловлены силы давления и в случае световых лучей. Этот вопрос может быть разрешен только при помощи дополнительных исследований; самым прямым путем является непосредственный опыт. <...>

II. Расположение опытов и приборы

Как ни просто максвелловское расположение опыта, оно встречает, однако, два существенных затруднения, обусловленных, с одной стороны, *конвекционными токами*, а с другой — *радиометрическими силами*. При самых высоких разрежениях эти побочные силы значительно уменьшаются, но с ними все-таки приходится считаться при измерениях светового давления.

Возникновение конвекционных сил обусловлено тем, что при нагревании крылышка прибора падающими на него лучами одновременно нагреваются и прилегающие слои газа, благодаря чему образуется восходящее течение; если плоскость крылышка хоть немного наклонена по отношению к вертикали, то восходящее течение заставляет крылышко перемещаться, причем направление и величина этого перемещения зависят только от степени нагревания и не зависят от направления, по которому падают нагревающие лучи. Эти силы можно исключить при измерениях, заставляя лучи того же источника попеременно падать то с одной, то в другой стороны крылышка.

Что касается радиометрических сил, то они были сведены при моих опытах до возможного минимума тем, что был взят весьма большой стеклянный баллон ($D = 20 \text{ см}$), при помощи соответствующего светофильтра были исключены все лучи, которые могли бы быть поглощаемы стенками баллона, крылышки были сделаны из тонкого металла, для того чтобы разница температур обеих поверхностей была по возможности мала, и разрежение было доведено (при помощи ртутного насоса и последую-

щего охлаждения охлаждающей смесью) до возможно высокой степени.

Когда радиометрические силы малы, то вызываемую ими поправку при измерении светового давления можно вычислить на следующих основаниях: радиометрические силы обусловлены разницей температур освещенной и неосвещенной поверхностей крылышка, причем для двух равновеликих крылышек из одинакового материала и имеющих одинаковые свойства поверхностей эти силы прямо пропорциональны *толщинам** крылышек; если мы будем одновременно наблюдать два одинаковых крылышка, имеющие очень значительную разницу толщин, то мы можем вычислить, как велико было бы отклонение, вызываемое световым пучком, если бы толщина крылышка была равна нулю, что соответствует и радиометрическим силам, равным нулю. Я позволяю себе здесь же заметить, что эту поправку пришлось делать только для платинированных крылышек. У крылышек с зеркальными поверхностями радиометрические силы были, против ожидания, настолько малы, что исчезали в неизбежных ошибках наблюдений, обусловленных другими причинами.

Помимо приведенных выше, по своей природе известных побочных сил, можно указать еще и на возможную гипотезу, что открытое Ленардом и Вольфом распыление освещенных тел может сопровождаться заметными реакционными силами, которые являются неизбежными спутниками максвелло-бартолиевых сил давления света. Эти гипотетические добавочные силы должны, однако, зависеть как от длины падающего света, так и от химической природы крылышка; приведенные ниже опыты с цветными светофильтрами и с разными крылышками не дали возможности обнаружить сколько-нибудь заметного действия этих гипотетических реакционных сил.

Общее расположение приборов было следующее [рис. 116, план]: изображение кратера *B* (+) угля дуговой лампы (30 А) собиралось при помощи конденсатора *C* на металлическую диафрагму *D* ($d = 4$ мм). Выходящий из диафрагмы расходящийся пучок лучей падал на линзу *K* и шел дальше параллельным пучком; для того чтобы освободить этот пучок от ультракрасных лучей, за линзой *K* находился стеклянный сосуд с плоскопараллельными стенками *W*, наполненный чистой водой** (толщина слоя 1 см); для того чтобы изменять окраску лучей, в этом месте можно было помещать добавочное красное («фотографи-

* В моих опытах разность температур между освещенным крылышком и стенками баллона была во много раз больше, чем разность температур между двумя поверхностями самого крылышка. Какой функции первой разности температур ни соответствует величина радиометрических сил, их поперечное действие на крылышко представляет собой их разность на двух поверхностях крылышка, и эта последняя с достаточной степенью приближения прямо пропорциональна второй разности температур.

** Этим способом исключались все лучи $\lambda > 1,2\mu$; со своей стороны стеклянные линзы задерживают ультрафиолетовые лучи.

ческое») стекло или заменять чистую воду голубым аммиачным раствором медной соли*.

На своем дальнейшем пути пучок параллельных лучей претерпевал трехкратное отражение от стеклянных (амальгамированных) зеркал S_1 , S_2 и S_3 и, собираясь при помощи линзы L_1 , давал действительное увеличенное ($d' = 10$ мм) изображение R диафрагмы D внутри стеклянного баллона; при передвижении двойного зеркала S_1S_4 пучок лучей пробегал аналогичный путь и падал с другой стороны на крылышко, помещенное в стеклянном баллоне. Линзы L_1 и L_2 имели каждая фокусное расстояние 20 см при отверстии 5 см; таким образом, конический пучок света имел угол схождения 15° . Все приспособление с зеркалами было накрепко соединено с фонарем дуговой лампы; этот последний помещался на салазках, при помощи которых его легко было отодвигать от баллона; установочные винты и передвижение на салазках позволяли наводить пучок лучей на исследуемое крылышко.

Оградить результаты наблюдений от влияния тех случайных скачков яркости света, которые неизбежно связаны с вольтовой дугой, возможно было только путем увеличения числа наблюдений.(<...>)

Для опытов служили три различных прибора [рис. 117] с разными крылышками.

1 прибор [рис. 117, 1] состоял из стеклянного стержня G , к которому были прижаты платиновые кольца (без помощи замазки) два креста из листовой платины различной толщины. Для того чтобы крылышки (диаметр = 5 мм) всех приборов сделать равновеликими, их пришлось вырезать стальным штанцем. Два крылышка прибора 1 имели с обеих сторон зеркальные поверхности, два других были с обеих сторон гальванически покрыты платиновой чернью**, причем более толстое крылышко

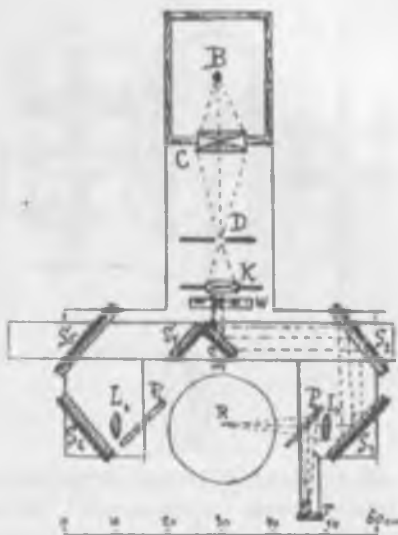


Рис. 116

* При красном, а также при голубом светофильтре количество проходящей световой энергии сокращается до одной пятой белого света; это служит доказательством того, что лучи, с которыми приходилось экспериментировать, почти исключительно принадлежали видимой части спектра.

** См. F. Kurlbaum, Wied. Ann., 67, 848 (1899). Полезно при начале платинирования в течение 30 с непрерывно и сильно двигать крылышко в ванне; поверхность крылышка приобретает слабую, серую, как сталь, окраску. После этого губчатая платина при неподвижной ванне садится на поверхность крылышка очень прочно.

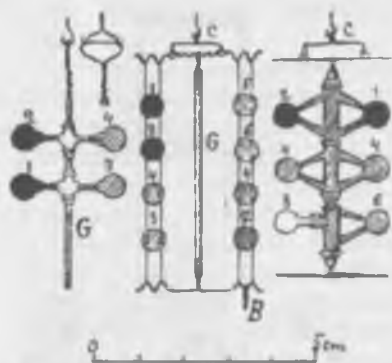


Рис. 117

подвергалось в пять раз более продолжительному платинированию. Для того чтобы подвешивать прибор к крючку крутильной нити, к стеклянному стержню *G* была припаяна платиновая петля *O*. Петля эта лежала в плоскости крылышек, чтобы при подвешивании стержень устанавливался в плоскости крылышек совершенно свободно.

II прибор [рис. 117, *II*] также состоял из стеклянного стержня, к концам которого были припаяны поперечные платиновые прово-

локи. Между этими держалами были натянуты тонкие (0,05 мм) платиновые проволоки, которые проходили через маленькие отверстия в металлических крылышках и удерживали крылышки в вертикальной плоскости; эти проволочки были настолько тонки, что их радиометрическими действиями можно было пренебречь.

II прибор был снабжен кардановым подвесом *C* из платиновой проволоки, при помощи которого он и подвешивался к крючку крутильной нити; добавочный платиновый грузик *B* удерживал стеклянный стержень в вертикальном положении.

III прибор был так же построен, как *I прибор*, с той разницей, что он был снабжен кардановским подвесом. Узкие металлические полоски (ширина 0,3 мм), поддерживающие круглые крылышки, в достаточной мере обеспечивали вертикальное положение последних. Слюдяное крылышко 8 было вставлено в легкую оправу из алюминия. К стеклянному стержню были приделаны сверху и внизу поперечные проволоки из алюминия, для того чтобы при опускании прибора в баллон крылышки не могли ударяться о стенки стеклянной шейки.

Опыты были произведены со следующими крылышками:

Материал

1. Платина, платинированная толстым слоем	
2. Платина, платинированная в пять раз тоньше	
3. Платина металлич. (зеркальн. поверх.), толщина	0,10 мм
4. Платина	0,02 мм
5. Алюминий	0,10 мм
6. Алюминий	0,02 мм
7. Никель	0,02 мм
8. Слюда, толщина	0,01 мм

В качестве крутильной нити служила *стеклянная нить* (длина 30 см), которая на нижнем конце несла плоское зеркало и крючок для подвешивания приборов, а сверху была зажата в железном зажиме [рис. 118] внутри ртутного шлифа; чтобы прикрепить нить без помощи замазки, ее концы были зажаты между

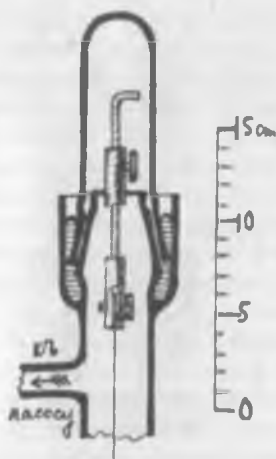


Рис. 118

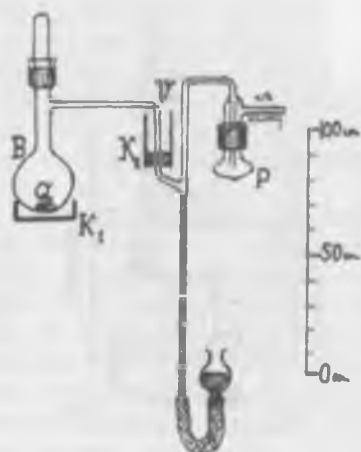


Рис. 119

кусочками прокаленного асбестового картона и эти последние внизу прижаты платиновым кольцом к державе зеркала, а вверх схвачены зажимом.

Зеркало помещалось в платинированной алюминиевой оправе; оно было покрыто (при помощи распыления катода в пустоте) слоем металлической платины, так как серебряные зеркала скоро разъедаются ртутными парами. При сравнительно слабой отражательной способности подобного зеркала и несовершенстве изображения благодаря двойному прохождению луча через стенки баллона освещение шкалы по Велльман — Мартенсу оказалось замечательно удобным.

При определении величины направляющей силы из колебаний на крючок крутильной нити накладывалась медная проволока 4 см длины, масса которой была 0,314 г.

Наблюдения были произведены в трех различными крутильными нитями, направляющие силы которых были так подобраны, что при расстоянии от скалы до зеркала в 1200 делений шкалы двойное отклонение при освещении крылышек с зеркальными поверхностями достигало от 40 до 90 делений шкалы. При этом периоды одного колебания (в одну сторону) вышеописанных трех приборов были 15, 35 и 13 с.

Разрежение производилось автоматическим насосом Кальбаума, измерения давления промером Мак-Леода-Кальбаума показали, что легко достигаются разрежения, при которых парциальное давление воздуха меньше 0,0001 мм (т. е. меньше $1/15$ давления насыщенных паров ртути при комнатной температуре).

Для того чтобы получить еще большее разрежение, служил следующий прием [рис. 119]; капля ртути Q была помещена на дно стеклянного баллона B , затем воздух разрежался насосом и ртутная капля нагревалась в водяной бане K_1 на 5°C выше

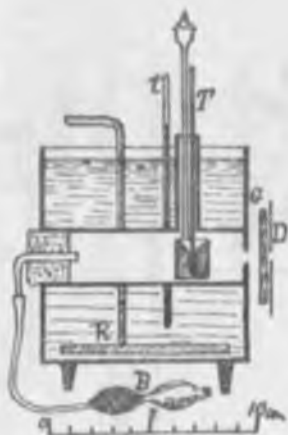


Рис. 120

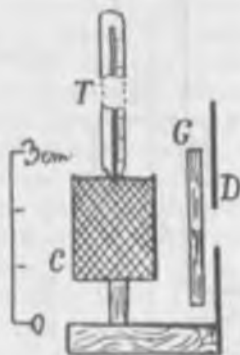


Рис. 121

комнатной температуры; испаряясь, ртуть перегоняется в насос и увлекает с собой остатки воздуха из баллона. Если отделить баллон от насоса и осушителя P при помощи барометрического запора V , то в баллоне останутся только ртутные пары: их давление уменьшится до весьма малой величины, если наполнить сосуды K_1 и K_2 охлаждающей смесью льда и соли.

Энергия падающих на крылышко лучей измерялась калориметрически. Фонарь с зеркалами [рис. 116] отодвигался на салазках от баллона настолько, что крылышко прибора могло быть замещено равной ему по величине ($d = 5$ мм) диафрагмой D [рис. 120 и 121]; все лучи, проходящие через диафрагму, поглощались калориметром. Стекла́нная пластинка G компенсировала ослабление света при отражении от стеклянной стенки баллона; она ставилась между диафрагмой и калориметром, чтобы задерживать тепловое излучение диафрагмы. <...>

III. Опыты

Вышеописанные приспособления позволяют экспериментально решить два основных вопроса:

1) производят ли лучи света какое-либо пондеромоторное действие, независимое от известных уже вторичных (конвекционных и радиометрических) сил, и

2) соответствуют ли эти новые силы света максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии. <...>

Приборы с крылышками были всегда так помещены внутри баллона, чтобы лучи источника, проходящие мимо крылышка, отраженные и снова собранные вогнутой стенкой баллона, не падали на части подвешенного прибора.

После того как прибор с крылышками бывал помещен в баллон, начиналось откачивание, продолжавшееся несколько дней, причем последние откачивания производились при подогревании

стенок баллона и при одновременном освещении отдельных крылышек светом дуги. Перед каждой серией наблюдений нижняя часть баллона, где находилась капля ртути, нагревалась в водяной бане на 5°C выше комнатной температуры*, а затем в течение от одного до двух часов снова производилось откачивание, после чего барометрический запор V поднимался и следовало охлаждение строганым льдом и солью.

Самой существенной помехой при производстве измерений являются конвекционные токи; они сказываются в непрерывном ходе нуля, причем как быстрота, так и направление этого хода зависят от случайных условий (даже для одного и того же крылышка в разные дни наблюдений). В течение одной серии наблюдений указанный «ход» нуля бывает обыкновенно настолько незначителен, что, увеличивая число отдельных наблюдений, его легко было исключить. Эта конвекция остатков ртутных паров обуславливается нагреванием освещаемого крылышка, а также случайным внешним неравномерным нагреванием стенок баллона и в особенности неизбежной разницей температур двух охлаждаемых ртутных поверхностей. При наблюдениях без охлаждения колебания, обусловленные конвекцией, сказываются гораздо резче, чем при охлаждении льдом с солью; при более высоких давлении воздуха наблюдения делаются благодаря конвекции настолько затруднительными, что измерения представляются едва возможными.

Другая причина, вызывающая колебание отсчетов, — это непостоянство вольтовой дуги, которое сказывается и при самых лучших углях. Скачки в яркости дуги сказываются в изменениях (увеличении или уменьшении) отдельных амплитуд колебаний прибора; их возможно исключить только увеличением числа отдельных наблюдений.

При помощи двух труб наблюдатель мог попеременно отсчитывать отклонения прибора с крылышками и гальванометра; помощник, наблюдавший за правильным горением дуги, по команде перемещал двойное зеркало S_1S_4 [рис. 116]. Замыкая освещения с периодическими перерывами, можно довести амплитуду колебаний прибора до нужной величины.

Таблица дает начало одного из протоколов наблюдений.

В этой таблице обозначают:

L_1 и L_2 — точки поворота на скале, когда свет падал на крылышко прибора от линзы L_1 или от линзы L_2 . Средний ряд, «вычисления», дает вычисленное (из трех прилегающих точек поворота) положение равновесия. «Отклон.» обозначает отклонение системы при изменении направления освещения. G_1 и G_2 дают положения гальванометра в первом и во втором случае (в последнем — нулевую точку его). «Гальваном.» — отклонения

* При указанной малой разнице температур ртуть не осаждается на более холодные стенки прибора; это явление, имеющее место при несмачиваемых поверхностях, было указано М. Cantoroni, Wied. Ann., 56, 493 (1985).

III. прибор. Платинированное крылышко 2.
 Расстояние центра кружка от оси вращения 9,2 мм
 Охлаждение льдом с солью
 Расстояние до скалы $A = 1195$ делений скалы

L_1		L_2		L_1		L_2	
Выч.		Выч.		Выч.		Выч.	
306		115		307		174	
176	240	206	295	184	245	210	244
	239 302	118	207		244 303	177	211
177	239	208	296	184	243		212 245
	240 302	124	209		243 300	180	213
178			294	189			
240		208		244		212	
Отклон. 32 дел. скал.				36 дел. скал.		32 дел. скал.	
G_1		G_2		G_1		G_2	
308				314			
305		201		312		201	
312				314			
314				316			
310				314			
Гальваном. 109 дел. скал., 113 дел. скал., 113 дел. скал.							

Отклон. привед.:

($G = 100$) 29,3 дел. скал. 31,8 дел. скал., 28,2 дел. скал.

гальванометра. «Отклон. привед. ($G = 100$)» дают вышеобозначенные отклонения прибора, приведенные к постоянному отклонению гальванометра в 100 делений скалы.

Указанным в таблице способом производилось по семь рядовых отсчетов для L_1 и L_2 и из «Отклонений приведенных ($G = 100$)» выводилось среднее с обозначением средних $\pm$ отступлений отдельных наблюдений. (Для крылышка это двойное отклонение $a = (29,4 \pm 1,6)$ дел. шкалы.) <...>

Для того чтобы определить абсолютную величину давления света на крылышко, необходимо было измерить в абсолютной мере величину направляющей силы крутильной нити. Вместо прибора с крылышками к крючку крутильной нити подвешивалось тело (медный цилиндр) с известным моментом инерции, и из трех серий наблюдений, из которых каждая состояла из десяти простых качаний, выводилось среднее время одного качания.

На основании указанной величины направляющей силы мы получаем для крылышка при одностороннем освещении величину давления света в динах:

$$p = 0,0000308 \pm 0,0000017.$$

Для того чтобы проверить расчеты Максвелла и Бартоли, необходимо *вычислить* ту величину светового давления, которую следует ожидать при опытах согласно упомянутой теории, и сравнить вычисленную величину с наблюдаемой. Для этого необходимо сделать калориметрическое измерение падающей световой энергии, а также фотометрическое измерение коэффициента отражения крылышек. <...>

Отсюда получаем количество падающей в течение секунды энергии:

$$E = \frac{1,55 \cdot 3,61 \cdot 4,18 \cdot 10^7}{300} \text{ эрг} = 7,74 \cdot 10^5 \text{ эрг.}$$

При наших опытах лучи падали не параллельным, а сходящимся пучком; их наклон был, однако, так незначителен, что обусловленная им поправка (около 1 %) могла быть опущена ввиду других, гораздо больших неточностей наблюдений. Мы можем, следовательно, производить вычисления по формулам, данным Максвеллом и Бартоли для пучка параллельных лучей.

Для абсолютно черного тела мы получаем на основании калориметрических измерений <...> величину давления p :

$$p \text{ (дин)} = \frac{E \text{ (эрг)}}{3 \cdot 10^{10}} = 0,0000258 \text{ дин.}$$

Для того чтобы полученные результаты выразить в удобно сравниваемых величинах, мы возьмем единицей сравнения величину максвелло-бартолиева давления на *абсолютно черное тело*, вычисленную из калориметрических наблюдений, и назовем эту произвольную единицу единицей МБ.

В этих единицах результаты таблицы выразятся таким образом:

$$p = \frac{0,0000308 \pm 0,0000017}{0,0000258} = (1,19 \pm 0,07) \text{ МБ. } \langle \dots \rangle$$

IV. Результаты

Результаты опытов приведены в единицах МБ; под каждой наблюденной величиной приведено в тех же единицах и среднее колебание в установках приборов, причем все колебания, меньшие 0,15 МБ, обозначены 0,1 МБ; ниже 0,25 МБ обозначены 0,2 МБ и т. д.

Для того чтобы составить себе представление о точности приведенных измерений, могут служить следующие соображения: колебания при установках прибора во время измерений приведены в таблице.

Определение абсолютной величины давящей силы света (куда входят измерения направляющей силы крутящей нити, расстояния от зеркала до скалы и расстояния центра крылышка до оси вращения) возможно было сделать с точностью около ± 8 ; вычисление абсолютной величины МБ единицы из калориметри-

Время простого качания	Медный цилиндр
Одно зеркало $\frac{I_1}{2} = (5,1 \pm 0,05) \text{ с}$	Длина 4,0 см
Зеркало + медный цилиндр	Масса 0,314 г
$\frac{I_2}{2} = (29,4 \pm 0,1) \text{ с}$	
Направляющая сила $D = 0,00494 \text{ дин} \cdot \text{см}$	

ческих измерений (куда входят общая водяная емкость, повышение температуры калориметра и близкое к единице отношение площади диафрагмы к площади круга крылышка) возможно было сделать с вероятной точностью $\pm 7 \%$; неточности в определении истинной величины коэффициентов отражения, вероятно, не превосходят $\pm 10 \%$.

Указанным неточностям отдельных измерений супернируются случайные неточности установки середины действительного изображения диафрагмы на крылышко и возможность, что излучение нагреваемого светом крылышка отражалось от вогнутой поверхности баллона и падало на другие части подвешенного прибора, причем место этого побочного нагревания изменялось в течение одного колебания прибора. Общая случайная ошибка, возможная при описанных измерениях с *белым светом*, вероятно, не превышает $\pm 20 \%$.

При опытах с красным и синим светом, при которых количество падающей энергии в пять раз меньше, случайные колебания, обусловленные конвекцией, те же и потому точность полученных результатов соответственно меньше; то же самое надо заметить и относительно очень малых отклонений (едва достигающих четырех делений скалы) при слюдяном крылышке. Эти опыты, которые были предприняты в виде проверочных, все же позволяют утверждать, что в этих случаях не появляется новых пондеромоторных сил, которые по величине были бы сравнимы с максвелло-бартолиевыми силами.

Кроме того, я многократно производил сравнительные измерения над тонкими и толстыми металлическими (зеркальными) платиновыми и алюминиевыми крылышками; мне, однако, не удалось обнаружить достаточно ясно выраженной радиометрической разницы; вот почему в пределах погрешностей наблюдений можно считать радиометрические силы тонких металлических крылышек равными нулю.

Полученные результаты можно формулировать таким образом:

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

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

3) Наблюденные силы давления света в пределах погрешностей наблюдений количественно равны максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Таким образом, существование максвелло-бартолиевых сил давления опытным путем установлено для лучей света.

Комментарий

Статья П. Н. Лебедева «Опытное исследование светового давления» публикуется по изданию: Лебедев П. Н. Собрание сочинений. М., 1963.

Литература

- [1] Лебедев П. Н. Собрание сочинений. М., 1963.
- [2] Капцов Н. А. Петр Николаевич Лебедев. 1866—1912. М., 1950.
- [3] Фабрикант В. Работы П. Н. Лебедева по световому давлению // Успехи физических наук. 1950. Т. 42. Вып. 2. С. 282.



Дж. В. Гиббс

1839—1903

О принципах статистической механики

Развитие фундаментальных физических теорий происходит постепенно. Обычно сначала устанавливаются основные закономерности, относящиеся к данной области, и лишь затем выявляются общие принципы, на которых строится теория. В XIX в. примером такого становления важнейших разделов современной физики могут служить термодинамика и статистическая физика. В работах У. Томсона (Кельвина), Р. Клаузиуса, Дж. К. Максвелла, Л. Больцмана и других ученых были сформулированы понятия термодинамики, ее законы, найдены решения существенных проблем статистической механики. Однако сделано было в этих областях, конечно, далеко не все. Многие аспекты термодинамики и статистической физики требовали обобщения, которое позволило бы использовать их методы для решения задач других разделов физики. Большую работу по уточнению и развитию основ термодинамики и физической статистики выполнил американский физик Дж. В. Гиббс.

Джозайя Виллард Гиббс родился 11 февраля 1839 г. в Нью-Хейвене (США) в семье известного филолога, профессора богословской школы. Гиббс получил образование в родном городе, закончив сначала колледж, а затем Йельский университет, специализируясь в области математики и техники.

В 1863 г. Гиббс защитил докторскую диссертацию на сугубо техническую тему «О форме зубьев цилиндрической зубчатой передачи». После защиты он стал преподавателем университета, причем первые два года он преподавал латынь и лишь затем — физику. В этот период он занимается в основном техническими проблемами.

В 1866 г. Гиббс вместе со своими сестрами отправился в Европу для продолжения образования. Он провел по году в университетах Парижа, Берлина и Гейдельберга. Именно в это время Гиббс ознакомился с трудами классиков физической науки и математики.

После возвращения на родину Гиббс становится профессором математической физики Йельского университета без жалования. Такое положение, вероятно, устраивало Гиббса, поскольку

средств, оставшихся после смерти отца, хватало для жизни в провинциальном городке и он не был сильно загружен преподаванием. Позднее Гиббс не раз отказывался от выгодных с материальной точки зрения предложений других учебных заведений: до конца жизни он почти безвыездно прожил в Нью-Хэйвене, занимаясь научными исследованиями и преподаванием.

Гиббс был избран членом Американской Академии искусств и наук в Бостоне, членом Лондонского Королевского общества, награжден медалью Копли и премией Румфорда. Умер Гиббс 28 апреля 1903 г.

После возвращения из Европы в 1869 г. Гиббс продолжил занятия техническими проблемами. В частности, он усовершенствовал регулятор Уатта с коническим маятником и даже получил несколько патентов. Однако постепенно от проблем равновесия и устойчивости механических систем он переходит к задачам термодинамики.

Первую работу в новой для него области Гиббс представил Коннектикутской Академии наук в 1872 г. Она называлась «Графические методы в термодинамике газов и жидкостей». Уже в этой работе Гиббс продемонстрировал эффективность понятия энтропии для описания и анализа термодинамических процессов. Предложенный им метод Гиббс развил в следующей работе «Метод геометрического представления термодинамических свойств вещества при помощи поверхностей». Не надеясь, что его работы, опубликованные в трудах провинциальной академии, будут замечены специалистами, Гиббс рассылал оттиски своих статей всем ведущим ученым в области термодинамики (У. Томсону, Дж. К. Максвеллу, Т. Эндрюсу, Р. Клаузиусу, Дж. Джоулю и многим другим).

Первым обратил внимание на работы Гиббса Максвелл. Он не только пропагандировал метод американского физика среди коллег, но и включил его описание в четвертое издание своей книги «Теория теплоты» (1875), а также собственноручно изготовил несколько моделей термодинамических поверхностей для воды.

В 1876—1877 гг. Гиббс опубликовал важнейшую работу (около 300 страниц!), посвященную равновесию гетерогенных веществ. В ней на основе теории термодинамических потенциалов ученый рассмотрел механические, химические, электрохимические, электромагнитные процессы, продемонстрировав продуктивность методов термодинамики для анализа явлений различной природы.

Однако Гиббс в научных исследованиях не ограничивался проблемами термодинамики. Он много занимался вопросами оптики, в частности развитием электромагнитной теории света, которой он отдавал предпочтение перед альтернативными теориями упругого эфира и вихрей Томсона. Изучая труды Максвелла, Гиббс пришел к выводу, что математический формализм, использованный английским ученым, не является лучшим средством

для представления его физических идей. В связи с этим Гиббс в 1881—1884 гг. опубликовал работы по векторному анализу, который применил для решения задач небесной механики.

В конце жизни Гиббс сосредоточился на проблемах статистической механики (сам термин принадлежит Гиббсу). В 1902 г. вышло в свет фундаментальное сочинение Гиббса на эту тему «Основные принципы статистической механики...». В нем был изложен общий подход к анализу статистических систем, благодаря чему классическая статистическая физика получила свое логическое завершение. И хотя некоторые важные проблемы Гиббсу разрешить не удалось (он не смог распространить свой метод на тепловое излучение, дать исчерпывающее объяснение причин необратимости термодинамических процессов, преодолеть трудности, связанные с законом равнораспределения энергии по степеням свободы), метод Гиббса получил широкое распространение.

Основные принципы статистической механики, излагаемые со специальным применением к рациональному обоснованию термодинамики

Предисловие

Обычной точкой зрения в изучении механики является та, при которой внимание направлено главным образом на изменения, происходящие с течением времени в данной системе. Основной проблемой является определение состояния системы по отношению к скоростям и конфигурации в любой требуемый момент, если ее состояние в этих отношениях было задано для некоторого определенного момента времени и основные уравнения выражают изменения, непрерывно происходящие в системе. Исследования такого рода часто упрощаются путем рассмотрения иных состояний системы, помимо тех, через которые она действительно или по предположению проходит; но наше внимание обычно не выходит за пределы состояний, бесконечно мало отличающихся от тех, которые рассматриваются как действительные.

Для некоторых целей, однако, желательно принять более широкую точку зрения. Мы можем представить себе большое число систем одинаковой природы, но различных по конфигурациям и скоростям, которыми они обладают в данный момент, и различных не только бесконечно мало, но так, что охватывается каждая мыслимая комбинация конфигураций и скоростей. При этом мы можем поставить себе задачей не рассматривать прохождение определенной системы через всю последовательность ее конфигураций, а установить, как будет распределено

все число систем между различными возможными конфигурациями и скоростями в любой требуемый момент, если такое распределение было задано для какого-либо момента времени. Основным уравнением при таком исследовании является уравнение, дающее скорость изменения числа систем, заключенных внутри определенных малых границ конфигурации и скорости.

Такие исследования Максвелл называл *статистическими*. Они принадлежат к отрасли механики, обязанной своим происхождением стремлению объяснить законы термодинамики исходя из механических принципов и основанной главным образом Клаузиусом, Максвеллом и Больцманом. Первые исследования в этой области были в действительности несколько уже, чем описано выше, ибо они применялись скорее к частицам системы, чем к независимым системам. В дальнейшем статистические исследования были распространены на фазы (или состояния по конфигурации и скорости), сменяющие одна другую в данной системе с течением времени. Явное рассмотрение большого числа систем, их распределения по фазам и постоянства или изменения этого распределения с течением времени впервые встречается, вероятно, в статье Больцмана «Zusammenhang zwischen den Sätzen über das Verhalten mehratomiger Gasmoleküle mit Jakob's Prinzip des letzten Multiplikators» (1871)¹.

Но, несмотря на то что статистическая механика исторически обязана своим возникновением исследованиям в области термодинамики, она, очевидно, в высокой мере заслуживает независимого развития как вследствие элегантности и простоты ее принципов, так и потому, что она приводит к новым результатам и проливает новый свет на старые истины в областях, совершенно чуждых термодинамике. Кроме того, самостоятельное построение этой отрасли механики, по-видимому, представляет наилучшую основу для изучения рациональной термодинамики и молекулярной механики.

Законы термодинамики, определенные эмпирически, выражают приблизительное и вероятное поведение систем, состоящих из большого числа частиц, или, точнее, они выражают законы механики подобных систем так, как они представляются существам, не обладающим достаточной тонкостью восприятия для того, чтобы оценивать величины порядка тех, которые относятся к отдельным частицам, и не могущим повторять свои опыты настолько часто, чтобы получить какие бы то ни было результаты, кроме наиболее вероятных. Законы статистической механики применимы к консервативным системам с любым числом степеней свободы и являются точными. Это не значит, что эти законы труднее установить, нежели приближенные законы для систем с очень большим числом степеней свободы или для специальных классов таких систем. Скорее верно обратное, так как наше внимание не отвлекается от того, что существенно обусловлено особенностями рассматриваемой системы, и мы не вынуждены удовлетвориться предположением, что эффект величин и обстоятельств, которыми

мы пренебрегли, в полученном результате можно будет также не принимать во внимание. Законы термодинамики легко могут быть получены из принципов статистической механики, неполным выражением которых они являются, но сами они являются, пожалуй, несколько слепым проводником в наших поисках этих законов. В этом, вероятно, главная причина медленности развития рациональной термодинамики, контрастирующей с быстрым выводом следствий из ее эмпирических законов. К этому необходимо прибавить, что рациональная основа термодинамики относилась к отрасли механики, основные понятия, принципы и характерные операции которой были равно непривычны исследователям, работавшим в области механики.

Мы можем, следовательно, быть достаточно уверенными, что ничто так не способствует ясному пониманию связей термодинамики с рациональной механикой и истолкованию наблюдаемых явлений с точки зрения молекулярного строения тел, как изучение основных понятий и принципов того отдела механики, которому термодинамика особенно родственна.

Более того, мы избегаем серьезнейших затруднений, когда, отказываясь от попытки очертить гипотезу о строении материальных тел, мы пользуемся статистическими исследованиями как отраслью рациональной механики. В настоящей стадии развития науки едва ли возможно дать динамическую теорию молекулярного действия, охватывающую явления термодинамики, излучения и электрические явления, сопутствующие соединению атомов. Однако всякая теория, которая не принимает во внимание всех этих явлений, очевидно, является неполноценной. Даже если мы ограничим наше внимание явно термодинамическими явлениями, мы не избежим затруднений в таком простом вопросе, как число степеней свободы двухатомного газа. Хорошо известно, что, хотя теория приписывает каждой молекуле газа шесть степеней свободы, наши опыты с теплоемкостью приводят к учету не более чем пяти степеней. Конечно, тот, кто основывает свою работу на гипотезах, касающихся строения материи, стоит на ненадежном фундаменте.

Затруднения этого рода удержали автора от попыток объяснения тайн природы и заставили его удовлетвориться более скромной задачей вывода некоторых более очевидных положений, относящихся к статистической отрасли механики. При этом здесь уже не может быть ошибки с точки зрения согласия гипотез с фактами природы, так как в этом отношении ничего и не предполагается. Единственной ошибкой, в которую можно впасть, является недостаточное согласие между предположками и выводами, а этого, при некоторой осторожности, можно надеяться в основном избежать.

Предметом настоящей книги являются в значительной мере результаты, полученные упомянутыми выше исследователями, хотя точка зрения и расположение материала могут быть отличными. Эти результаты, предлагаемые нами читателю один за

другим в порядке их открытия, в их первоначальном изложении по необходимости не были расположены наиболее логичным образом.

В первой главе мы рассматриваем упомянутую уже общую проблему и находим соотношение, которое может быть названо основным уравнением статистической механики. Частный случай этого уравнения дает условие статистического равновесия, т. е. условие, которому должно удовлетворять распределение систем по фазам для того, чтобы распределение было постоянным. В общем случае основное уравнение допускает интегрирование, в результате которого мы получаем принцип, который в зависимости от точки зрения, с какой он рассматривается, можно выражать различно — как принцип сохранения фазовой плотности, фазового объема или вероятности фазы.

Во второй главе мы применяем этот принцип сохранения вероятности фазы к теории ошибок вычисленных фаз системы, когда определение произвольных постоянных интегральных уравнений² является сомнительным. В этом приложении мы не выходим из пределов обычных приближений. Другими словами, мы сочетаем принцип сохранения вероятности фазы, являющийся точным, с теми приближенными соотношениями, которые обычно принимаются в «теории ошибок».

В третьей главе мы применяем принцип сохранения фазового объема к интегрированию дифференциальных уравнений движения. Таким образом, как показал Больцман, мы получаем «последний множитель» Якоби.

В четвертой и последующих главах мы возвращаемся к рассмотрению статистического равновесия и сосредоточиваем наше внимание на консервативных системах. Мы рассматриваем ансамбли систем, в которых показатель (или логарифм) вероятности фазы является линейной функцией энергии. Это распределение благодаря его особенному значению в теории статистического равновесия я решил назвать *каноническим*, а делитель энергии — *модулем* распределения. Модули ансамблей имеют свойства, аналогичные температуре, так как равенство модулей является условием равновесия по отношению к обмену энергией, когда такой обмен является возможным.

Мы находим дифференциальное уравнение, относящееся к средним значениям по ансамблю и идентичное по форме с основным дифференциальным уравнением термодинамики, причем средний показатель вероятности фазы с обратным знаком соответствует энтропии, а модуль — температуре.

Для среднего квадрата флуктуаций энергии мы находим выражение, исчезающее малое по сравнению с квадратом средней энергии, когда число степеней свободы неопределенно возрастает. Ансамбль систем, в котором число степеней свободы того же порядка, что и число молекул в телах, с которыми мы экспериментируем, при каноническом распределении покажется человеческому наблюдению ансамблем систем с одинаковой энергией.

При дальнейшем развитии темы мы встречаемся и с другими величинами, которые при очень большом числе степеней свободы в основном совпадают с модулем и со средним показателем вероятности канонического ансамбля, взятым с обратным знаком, и которые, следовательно, также можно считать соответствующими температуре и энтропии. Однако если число степеней свободы не очень велико, то соответствие является неполным и введение этих величин не имеет никаких оснований, кроме того, что они могут считаться более простыми по определению, нежели величины, упомянутые выше. В главе XIV это исследование термодинамических аналогий развивается несколько подробнее.

Наконец, в главе XV предыдущие результаты подвергаются некоторому видоизменению, необходимому, когда мы рассматриваем системы, состоящие из совершенно подобных частиц или даже из частиц нескольких родов, если только все частицы каждого рода подобны друг другу, и когда одним из подлежащих рассмотрению изменений является изменение чисел частиц различных родов, содержащихся в системе. Это предположение естественно было бы ввести раньше, если бы нашей целью являлось просто выражение законов природы. Нам показалось, однако, желательным четко отделить чисто термодинамические законы от тех их специальных модификаций, которые относятся скорее к теории свойств вещества. {...}

Глава IV

О так называемом каноническом распределении фаз, при котором показатель вероятности является линейной функцией энергии

Посвятим теперь наше внимание статистическому равновесию в ансамбле консервативных систем, в особенности же тем случаям и тем свойствам, которые обещают пролить свет на явления термодинамики.

Условие статистического равновесия может быть выражено в виде*

$$\sum \left(\frac{\partial P}{\partial p_i} \dot{p}_i + \frac{\partial P}{\partial q_i} \dot{q}_i \right) = 0, \quad (88)$$

где P — коэффициент вероятности, или частное от деления фазовой плотности на полное число систем. Чтобы удовлетворить этому условию, необходимо и достаточно, чтобы P являлось функцией p и q (импульсов и координат), не изменяющейся во времени для движущейся системы. Во всех рассматриваемых

* См. уравнения (20), (41) и (42), а также абзац, следующий за уравнением (20). Положения произвольных внешних тел, которые могут влиять на систему, предполагаются здесь одинаковыми для всех систем и постоянными во времени.

нами здесь случаях такой функцией является энергия или любая функция энергии. Таким образом,

$$P=f(\epsilon)$$

удовлетворяет уравнению (88), как это ясно из того, что оно обращается в тождество, если написать в форме

$$\sum \left(\frac{\partial p}{\partial q_1} \frac{\partial \epsilon}{\partial p_1} - \frac{\partial P}{\partial p_1} \frac{\partial \epsilon}{\partial q_1} \right) = 0.$$

Имеются, однако, еще и иные условия, которым подчинено P и которые являются не столько условиями статистического равновесия, сколько условиями, неявно заключенными в определении коэффициента вероятности, независимо от того, имеется или нет равновесие. Это — условие, что P должно быть однозначно и не может быть мнимым и отрицательным ни для какой фазы, как и условие, выражаемое уравнением (46), т. е.

$$\int_{\text{фазы}}^{\text{все}} P dp_1 \dots dq_n = 1. \quad (89)$$

Эти условия исключают $P=\epsilon \cdot \text{const}$, равно как и $P=\text{const}$, из случаев, подлежащих рассмотрению.

Распределение, представляемое выражением

$$\eta = \log P = \frac{\Psi - \epsilon}{\theta} \quad (90)$$

или

$$P = e^{(\Psi - \epsilon)/\theta}, \quad (91)$$

где θ и Ψ — постоянные и θ положительно, по-видимому, является наиболее простым мыслимым случаем, так как оно обладает тем свойством, что, когда система состоит из частей с отдельными энергиями, закон распределения по фазам для отдельных частей обладает одинаковой природой — свойство, которое чрезвычайно упрощает исследование и которое является основанием для весьма важных отношений к термодинамике. Делитель θ (величина, обладающая одинаковой размерностью с ϵ) не усложняет дела, а, наоборот, упрощает его, поскольку наличие его делает распределение независимым от употребляемых единиц. Отрицательный знак у ϵ требуется условием (89), которое определяет также и значение Ψ для любого данного θ , а именно:

$$e^{-\frac{\Psi}{\theta}} = \int_{\text{фазы}}^{\text{все}} e^{-\frac{\epsilon}{\theta}} dp_1 \dots dq_n. \quad (92)$$

Когда ансамбль систем распределен по фазам описанным образом, т. е. когда показатель вероятности является линейной функцией энергии, мы будем говорить, что ансамбль *канонически распределен*, и назовем делитель энергии θ *модулем* распределения.

Доля канонически распределенного ансамбля, лежащая внутри каких-либо заданных фазовых границ, представляется отсюда кратным интегралом

$$\int \dots \int e^{\frac{\psi - \epsilon}{\theta}} dp_1 \dots dq_n, \quad (93)$$

взятым внутри этих границ. Мы можем выразить то же самое, сказав, что наш кратный интеграл выражает вероятность нахождения какой-либо неопределенной системы ансамбля (т. е. такой, о которой мы знаем только, что она относится к ансамблю) внутри данных границ.

Величина кратного интеграла (23)³ (который мы называли фазовым объемом), ограниченного любыми заданными фазами, не зависит от системы координат, в которой он вычисляется. То же самое должно быть справедливым и для кратного интеграла (92), что станет очевидным, если мы разобьем этот интеграл на части, столь малые, чтобы в каждой из них показательный множитель можно было считать постоянным. Таким образом, значение ψ независимо от использованной системы координат.

Очевидно, что ψ можно определить как энергию, для которой коэффициент фазовой вероятности имеет значение, равное единице. Однако, поскольку этот коэффициент имеет размерность, обратную n -й степени произведения энергии на время, энергия, обозначенная через ψ , не зависит от выбора единиц энергии и времени. Но если эти единицы выбраны, то определение ψ содержит ту же самую произвольную постоянную, что и ϵ , так что, хотя для любого заданного случая числовые значения ψ или ϵ будут совершенно неопределенными, пока для рассматриваемой системы не фиксирован нуль энергии, разность $\psi - \epsilon$ представляет собой вполне определенное количество энергии, совершенно независимое от того, как мы выберем нуль энергии.

Очевидно, что каноническое распределение вполне определено модулем (рассматриваемым как количество энергии) и природой рассматриваемой системы, ибо когда уравнение (92) удовлетворено, то значение кратного интеграла (93) не зависит от употребляемых единиц и координат и от нуля, выбранного для энергии системы.

Рассматривая каноническое распределение, мы всегда будем предполагать, что кратный интеграл в (92) имеет конечную величину, так как в противном случае коэффициент вероятности исчезает и закон распределения становится иллюзорным. Это исключает некоторые случаи, однако, очевидно, не такие, чтобы это повлияло на значение наших результатов с точки зрения применения их к термодинамике. Так, например, исключенными оказываются случаи, в которых система или части ее могут быть распределены в неограниченном пространстве (или в пространстве, имеющем границы, но обладающем бесконечным объемом), в то время как ее энергия остается ниже определенного конечного предела. Точно так же исключаются многие случаи, в кото-

рых энергия может неограниченно убывать, например когда система содержит материальные точки, притягивающиеся друг к другу обратно пропорционально квадрату их расстояний. Случаи материальных точек, притягивающихся обратно пропорционально расстояниям между ними, для одних значений Θ исключаются, для других же нет. Исследование этих вопросов лучше осуществить на частных случаях. Для целей общего исследования достаточно принять во внимание предположение, неявно содержащееся в формуле (92)*.

Модуль Θ имеет свойства, аналогичные свойствам температуры в термодинамике. Пусть система A определена, как принадлежащая ансамблю систем с m степенями свободы, распределен-

ными по фазам с коэффициентом вероятности $e^{-\frac{\psi_A - \epsilon_A}{\Theta}}$, а система B — как принадлежащая ансамблю систем с n степенями свободы, распределенными по фазам с коэффициентом вероятности

$e^{-\frac{\psi_B - \epsilon_B}{\Theta}}$, имеющим тот же модуль. Пусть $q_1, \dots, q_m, p_1, \dots, p_m$ — координаты и импульсы в A , $q_{m+1}, \dots, q_{m+n}, p_{m+1}, \dots, p_{m+n}$ — координаты и импульсы в B . Далее, мы можем рассматривать системы A и B , как образующие вместе систему C , имеющую $m+n$ степеней свободы и координаты и импульсы $q_1, \dots, q_{m+n}, p_1, \dots, p_{m+n}$. Вероятность того, что фаза системы C , определенной таким образом, находится в границах

$$dp_1, \dots, dp_{m+n}, dq_1, \dots, dq_{m+n},$$

очевидно, равна произведению вероятностей нахождения систем A и B в каждой из отдельных в указанных границах, т. е.

$$e^{-\frac{\psi_A + \psi_B - \epsilon_A - \epsilon_B}{\Theta}} dp_1 \dots dp_{m+n} dq_1 \dots dq_{m+n}. \quad (94)$$

Мы можем поэтому рассматривать C как неопределенную систему ансамбля, распределенного с коэффициентом вероятности

$$e^{-\frac{\psi_A + \psi_B - (\epsilon_A + \epsilon_B)}{\Theta}}. \quad (95)$$

ансамбля, который можно определить, как образованный путем комбинирования каждой системы первого ансамбля с каждой системой второго. Так как $\epsilon_A + \epsilon_B$ представляет собой энергию всей системы, а ψ_A и ψ_B — постоянные, то коэффициент вероятности имеет рассматриваемую нами общую форму, а ансамбль,

* Заметим, что подобные ограничения существуют и в термодинамике. Чтобы масса газа могла находиться в термодинамическом равновесии, необходимо, чтобы она была заключена в замкнутом объеме. Не может быть термодинамического равновесия (конечной) массы газа в бесконечном пространстве. Наконец, представление, что две притягивающиеся частицы способны при переходе от одной конфигурации (рассматриваемой как возможная) к другой произвести бесконечно большую работу, хотя и совершенно понятно в математической формуле, но совершенно чуждо нашим представлениям о веществе.

к которому он относится, находится в статистическом равновесии и канонически распределен.

Этот результат, однако, поскольку он касается случаев статистического равновесия, достаточно бессодержателен, потому что мысленное соединение отдельных систем в одну систему не порождает никакого взаимодействия между ними, и если комбинируемые системы принадлежат к ансамблям, находящимся в статистическом равновесии, то сказать, что ансамбль, образованный путем такого комбинирования, находится в статистическом равновесии, значит повторно сказанное, только другими словами. Допустим, что при образовании системы мы вводим некоторые силы, действующие между A и B и имеющие силовую функцию e_{AB} . Энергия системы C равна при этом $e_A + e_B + e_{AB}$, и ансамбль таких систем, распределенный с плотностью, пропорциональной

$$e^{-\frac{-(e_A + e_B + e_{AB})}{\theta_C}}, \quad (96)$$

должен находиться в статистическом равновесии. Сравнивая это с коэффициентом вероятности (95) для C , приведенным выше, мы увидим, что если положить e_{AB} (или, точнее, переменную часть этого члена, когда мы рассматриваем все возможные конфигурации систем A и B) бесконечно малой, что действительное распределение по фазам системы C будет бесконечно мало отличаться от распределения при статистическом равновесии, что равносильно утверждению, что это распределение изменяется бесконечно мало даже в течение неопределенно долгого времени*. Положение было бы совершенно отличным, если бы A и B принадлежали ансамблям, обладающим различными модулями, скажем, θ_A и θ_B . Коэффициент вероятности для C был бы тогда равен

$$e^{-\frac{e_A - e_A}{\theta_A} - \frac{e_B - e_B}{\theta_B}}, \quad (97)$$

что даже приближенно не пропорционально какому-либо выражению вида (96). <...>

* Необходимо отметить, что приведенное выше условие относительно сил, действующих между различными системами, вполне аналогично условию, которое должно выполняться в аналогичных случаях в термодинамике. Наиболее простым признаком равенства температур двух тел является то, что они остаются в равновесии, если приведены в тепловой контакт. Непосредственный тепловой контакт окажется непригодным, если энергией этих сил нельзя пренебречь по сравнению с другими видами энергии тел. Так, если энергетическое взаимодействие между телами — химического типа или если числом частиц, подверженных влиянию сил, действующих между телами, нельзя пренебречь по сравнению с общим числом частиц (например, если тела имеют форму чрезвычайно тонких пластин), то соприкосновение тел с одинаковой температурой может вызвать заметное тепловое возмущение и, таким образом, уже не дает надежного критерия равенства температуры.

Свойства канонически распределенных ансамблей систем по отношению к равновесию новых ансамблей, которые могут быть образованы путем комбинирования каждой системы одного ансамбля с каждой системой другого, не являются, таким образом, характерными только для них, поскольку аналогичные свойства могут принадлежать и многим другим распределениям при специальных ограничениях в отношении рассматриваемых систем и сил. Однако каноническое распределение, очевидно, является наиболее простым случаем этого вида, а именно случаем, для которого описанные соотношения справедливы при наименьших ограничениях. <...>

Комментарий

Перевод с английского работы Дж. В. Гиббса выполнен К. В. Никольским. Отрывки из нее воспроизводятся по изданию: Гиббс Дж. В. Основные принципы статистической механики. М., 1946. Название работы на языке оригинала: *Elementary principles in statistical mechanics developed with special reference to the rational foundation of thermodynamics.*

¹ «Связь между теорией о поведении многоатомных молекул газа с принципом последних множителей Якоби».

² «Интегральными уравнениями» Гиббс именует величины, которые в современной терминологии принято называть интегралами уравнений движения.

³ Интеграл, о котором идет речь, имеет вид

$$\{ \dots \} dp_1 \dots dp_r dq_1 \dots dq_r$$

Литература

- [1] Собрание сочинений Дж. В. Гиббса: *The Scientific Papers of J. W. Gibbs. Vols. 1—2.* N. Y. 1961.
- [2] *A Commentary on the Scientific Writings of J. Willard Gibbs. Vols. 1—2.* Ed. by F. G. Donnan, A. Haas. New Haven, 1936.
- [3] Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М., 1982.
- [4] Wheeler L. P. Josiah Willard Gibbs. *The History of a Great Mind.* 2nd ed. New Haven, 1952.
- [5] Франкфурт У. И., Френк А. М. Джозая Виллард Гиббс. М., 1964.

Связь старинных мер с современными единицами физических величин*

Меры длины

Дюйм

английский = 0,0254 м
парижский = 0,0271 м
флорентийский (палец) = 0,0324 м

Линия

английская = 0,00212 м
парижская = 0,00225 м
русская = 0,00254 м

Локоть

русский = $0,38 \div 0,46$ м
флорентийский = 0,584 м

Лье = 4445 м

Миля

морская = 1853 м
сухопутная = 1609 м

Сажень = 2,13 м

Туз = 1,946 м

Фут

английский = 0,3048 м
королевский (парижский) = 0,324 м
рейнский (рейнландский) = 0,313 м
флорентийский = 0,296 м

Меры массы

Гран

английский = 0,0000648 кг
парижский = 0,0000531 кг

Драхма = 0,00177 кг

Фунт

английский = 0,454 кг
королевский (парижский) = 0,490 м

Унция

английская = 0,0284 кг
парижская = 0,0306 кг

Меры силы (веса)

Гран

английский = 0,000636 Н
парижский = 0,000521 Н

Унция

английская = 0,279 Н
парижская = 0,300 Н

Фунт

английский = 4,54 Н
королевский (парижский) = 4,80 Н

Другие меры

Футо-фунт (мера работы и энергии) =
= 1,356 Дж

Лошадиная сила (мера мощности) =
= 745,7 Вт

Связь между различными единицами

1 туз = 6 королевским (или парижским) футам = 72 дюймам = 864 линиям

1 фут английский = 12 дюймам =
= 144 линиям

1 фунт королевский (парижский) =
= 16 унциям = 9216 граммам

1 фунт английский (торговый) = 16
унциям = 256 драхмам = 7000 граммам

Пересчет значений температуры

Шкалы Цельсия и Фаренгейта

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(1^{\circ}\text{F} - 32)$$

Шкалы Цельсия и Реомюра

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{5}{8}1^{\circ}\text{R}$$

* Следует иметь в виду, что в прошлом одним и тем же названием обозначались меры, различавшиеся по величине. Кроме того, величины многих мер зачастую изменялись со временем. Здесь нет возможности подробно обсуждать проблемы исторической метрологии, и поэтому в настоящей таблице приводятся наиболее распространенные приближенные значения старых мер, упоминаемых в оригинальных текстах, включенных в хрестоматию.

Именной указатель

А
Авогадро А. 314
Ампер А.-М. 313, 314, 325, 348
Анаксагор 14
Араго Ф. 232, 286, 296, 297, 348
Аристотель 7, 9, 74
Архимед 21, 22, 121

Б
Бернулли Д. 170, 171, 188
Био Ж. Б. 220, 221, 254
Блэк Дж. 220, 221, 254
Бойль Р. 75, 95, 96, 112, 114, 188
Больцман Л. 407, 453, 504, 505
Брадлей Дж. 428
Бугер П. 206, 207, 209
Бунзен Р. 451

В
Вольты А. 277, 278
Винчи-да Леонардо 31, 32

Г
Галилей Г. 14, 50, 51, 52, 73, 74, 80, 117, 121, 170
Галлей Э. 143
Гальвани 278
Гельмгольц Г. 368, 374, 392, 393
Герике О. 75, 85, 86, 197
Герон 21
Герц Г. 472, 524, 525
Гершель В. 208, 269, 270
Гиббс Дж. В. 562
Гримальди Ф. 106, 107
Гук Р. 112, 113, 121, 143, 188
Гюйгенс Х. 113, 118, 121, 122, 123

Д
Декарт Р. 65—67, 86, 94, 117, 121, 188, 416

Демокрит 14
Джоуль Дж. 368, 374, 382, 383, 413
Доплер Х. 429
Дэви Х. 375

К
Кавальери Б. 73
Кавендиш Г. 243, 253, 254
Карно С. 232, 325, 405, 409, 410, 413
Кастелли Б. 73
Кеплер И. 40, 121
Керр Дж. 189
Кирхгоф Г. 452
Клапейрон Б. 326, 405
Клаузиус Р. 326, 384, 413, 440
Коперник Н. 39, 40
Кулон Ш. 242, 243, 244

Л
Лагранж Ж. Л. 231
Ламберт И. 207
Лаплас П.-С. 296

Лебедев П. Н. 472, 548
Лейбниц Г. В. 22, 79, 118, 208
Лени Э. Х. 367, 368, 383
Ломоносов М. В. 188, 189
Лукреций 14, 15

М
Майер Р. 374, 375
Майкельсон А. 471, 472
Максвелл Дж. К. 254, 315, 350, 469
Малюс 295, 296
Мариотт Э. 170
Меллони М. 271
Мерсенн М. 67
Мичелл Дж. 254, 255
Морли Э. 471, 514

Н
Нобили Л. 271
Ньютон И. 22, 113, 118, 121, 142, 143, 170, 180, 188, 189, 253

О
Ом Г. 339, 340

П
Паскаль Б. 67, 75, 78, 79, 170
Пауэр Г. 97
Поггендорф И. Х. 340
Петров В. В. 278

Р
Ремер О. 117, 118
Ретик Г. И. 40
Рихман Г. В. 189
Риччиолли Дж. 106
Румфорд Б. 375

С
Столетов А. Г. 538, 548

Т
Таунли 97
Томсон У. (Кельвин) 326, 393, 405
Торричелли Э. 73—75, 78, 80

У
Умов Н. А. 492

Ф
Фарадей М. 348, 349, 367
Ферма П. 67, 79, 117, 416
Физо И. 428, 429
Франклин Б. 189, 197, 198
Френель О. 232, 286, 295, 296, 428
Фуко Л. 416, 417
Фурье Ж. 340

Э
Эйлер Л. 180, 181, 231
Эйнштейн А. 349, 471, 539
Эмпедокл 14
Эпикур 14
Эрстед Г. Х. 307, 308

Литература

- Араго Д. Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. В 3 т. Спб., 1860.
- Ахутин А. В. История принципов физического эксперимента. М., 1976.
- Гельфер Я. М. История и методология термодинамики и статистической физики. 2-е изд. М., 1981.
- Гиндикин С. Г. Рассказы о физиках и математиках. 2-е изд. М., 1984.
- Голин Г. М. Хрестоматия по истории физики. В 2 т. Минск, 1979.
- Дуков В. М. Электродинамика. М., 1975.
- История механики с древнейших времен до конца XVIII в./Под ред. А. Т. Григорьяна и И. Б. Погребысского. М., 1971.
- История механики с конца XVIII века до середины XX века/Под ред. А. Т. Григорьяна и И. Б. Погребысского. М., 1972.
- Кудрявцев П. С. Курс истории физики. 2-е изд. М., 1982.
- Кудрявцев П. С. История физики. М., т. 1—2 — 1956, т. 3 — 1971.
- Лакур П., Аппель Я. Историческая физика. В 2 т. Одесса, 1908.
- Лауэ М. История физики. М., 1956.
- Липсон Г. Великие эксперименты в физике. М., 1974.
- Льоции М. История физики. М., 1970.
- Очерки развития основных физических идей. М., 1959.
- Развитие физики в России./Под ред. А. С. Предводителя и Б. И. Спасского. В 2 т. М., 1967.
- Розенбергер Ф. История физики. В 3 ч. М. — Л., 1936—1937.
- Спасский Б. И. История физики. В 2 ч. М. — Л., 1977.
- Творцы физической оптики. М., 1973.
- Храмов Ю. А. Физики. Биографический справочник. 2-е изд. М., 1983.

Справочное издание

Голин
Генрих Моисеевич
Филонович
Сергей Ростиславович

Зап. редакцией учебно-методической литературы
по физике и математике Е. С. Гридасова
Редактор Г. Н. Чернышева
Оформление художника Ю. Д. Федичкина
Художественный редактор В. И. Пономаренко
Технический редактор А. К. Нестерова
Корректор Г. И. Кострикова

КЛАССИКИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАУКИ

(с древнейших
времен
до начала XX в.)

ИБ № 8052

Изд. № ФМ-957. Сдано в набор 13.01.89. Подп. в печать 06.09.89. Формат 60×90^{1/16}. Бум. офс. № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 36,0 усл. печ. л. + + форзац 0,25 усл. печ. л. 72,5 усл. кр.-отг. 36,15 уч. изд. л. + форзац 0,40 уч. изд. л. Тираж 50 (XX) экз. Заказ № 137. Цена 2 р.

Издательство «Высшая школа». 101430, Москва, ГСП 4, Неглинная ул, д. 29/14.

Ярославский полиграфкомбинат Госкомпечати СССР 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.