

МАКС ПЛАНК

**ПРИНЦИП  
СОХРАНЕНИЯ  
ЭНЕРГИИ**

ГОНТИ 1938

МАКС ПЛАНК

# ПРИНЦИП СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

ПЕРЕВОД С 4-ГО НЕМЕЦКОГО ИЗДАНИЯ  
С. Г. СУВОРОВА и Р. Я. ШТЕЙНМАНА

СО ВСТУПИТЕЛЬНОЙ СТАТЬЕЙ  
С. Г. СУВОРОВА

Цена 6 р. 40 к. Переп. 1 р. 50 к.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЦКТП СССР  
РЕДАКЦИЯ ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1938 ЛЕНИНГРАД

**К ЧИТАТЕЛЮ**

Издательство просит прислать Ваши замечания и отзывы об этой книге, по адресу: Москва, Проезд Владимирова, д. 4. Редакция технико-теоретической литературы ГОНТИ.

## ОТ ПЕРЕВОДЧИКОВ

Книга М. Планка „Принцип сохранения энергии“ посвящена истории и обоснованию закона сохранения и превращения энергии, — этого важнейшего для обоснования материализма закона природы.

На немецком языке книга издавалась четыре раза; с последнего издания (1921 г.) и сделан настоящий перевод. Первая часть переведена Р. Я. Штейнманом, две остальные — С. Г. Суворовым.

Мы не желали при переводе отходить от своеобразного стиля автора, но в некоторых случаях, когда отдельные фразы оригинала распространялись на целую страницу, все же вынуждены были этот стиль „облегчать“.

Кое-какие ссылки Планка на конкретные физические исследования уже устарели. Поэтому в издании 1908 г. Планк сделал ряд дополнительных замечаний (*с.м. Примечания 1908 г.*). Такие замечания, — впрочем, не принципиального характера, — можно было бы несколько умножить. Третье и четвертое издания Планк оставил без изменений сравнительно со вторым. Мы также считали возможным ограничиться дополнениями самого автора ко второму изданию.

Более существенным является отсутствие в переизданиях истории закона сохранения и превращения энергии за последние пятьдесят лет, весьма важные для его развития. Исчерпать эту историю отдельными замечаниями мы, разу-

меется, не могли бы; она требует самостоятельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы. Однако, некоторые весьма существенные моменты последующего развития закона, а именно, борьба различных направлений в физике вокруг оценки значения закона и его трактовки, — освещены в помещаемой ниже статье С. Г. Суворова.

В ней же читатель найдет и оценку книги М. Планка.

Январь 1938 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
От переводчиков . . . . .	III
С. Суворов—Книга М. Планка и борьба за закон сохранения и превращения энергии . . . . .	VII

МАКС ПЛАНК

### ПРИНЦИП СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Предисловие к первому изданию . . . . .	3
Предисловие ко второму изданию . . . . .	11
Первый раздел. Историческое развитие закона . . . . .	13
Второй раздел. Формулировка и доказательство принципа . . . . .	95
Третий раздел. Различные виды энергии . . . . .	142
1. Механическая энергия . . . . .	145
2. Тепловая и химическая энергия . . . . .	188
3. Электрическая и магнитная энергия . . . . .	194



С. СУВОРОВ

## КНИГА М. ПЛАНКА И БОРЬБА ЗА ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Книга М. Планка „Das Prinzip der Erhaltung der Energie“ впервые вышла в 1887 г.

Это было время, когда после острой борьбы закон сохранения и превращения энергии получил уже всеобщее признание: слишком очевидно стало, что все явления, известные физике, подчиняются этому закону. Споры в физике шли в это время только о логических и опытных основаниях закона, о его формулировках и трактовке. Не случайно Геттингенский философский факультет поставил в 1884 г. на конкурс задачу: дать историю закона, показать, чем отличаются друг от друга различные виды энергии, как их определить, и дать доказательство всеобщей справедливости закона.

Книга М. Планка, написанная в связи с объявленным конкурсом, сыграла в этих условиях положительную роль.

С тех пор прошло ровно пятьдесят лет.

И вот, уже в наши дни, — впрочем, не впервые, — справедливость и всеобщность закона сохранения и превращения энергии вновь стала предметом дискуссии.

В 1924 г. Бор, Крамерс и Слэтер<sup>1</sup> пытались разрешить теоретические трудности тогдашней атомной теории (созданной Бором же) при помощи статистической трактовки закона сохранения энергии, по существу отменявшей закон.

Несмотря на большие успехи, атомная теория Бора оставляла ряд важнейших проблем нерешенными. Создав модель атома, объяснив его устойчивость и дискретность спектров его излучения, — она не могла объяснить интен-

---

<sup>1</sup> N. Bohr, H. Kramers, I. Slater, Zeitschr. f. Physik, 24, 69. 1924.



сивности излучения, приводила к трудностям при детальном исследовании более сложных атомов, чем атом водорода. Более того, она не могла объяснить существенно волновых явлений — интерференции и дифракции света. Классическая теория света продолжала господствовать наряду с квантовой теорией Бора. Такое сосуществование не могло долго продолжаться, так как обе теории противоречили друг другу. Так, электромагнитная волна несет непрерывно распространяющуюся энергию, в то время как квантовая теория Бора требует признания дискретной, т. е. прерывной потери или поглощения энергии атомом.

Бор, Крамерс и Слэтер пытались примирить обе эти теории, устранив их взаимное противоречие путем отказа от классического представления о том, что волновое поле несет энергию. Само волновое поле (так называемое „виртуальное“), непрерывно излучаемое „виртуальными“ вибраторами атома, существует; оно сохранено авторами для объяснения явлений интерференции и дифракции. Но это поле не несет энергии. Последняя теряется и приобретает атомом дискретно, квантами, как того и требует первая боровская теория. Таким образом основы первой теории Бора тоже сохранены; они объясняют устойчивость атома, дискретность его излучения, его простейшую модель.

Но что происходит с той энергией, которая теряется атомом дискретно при переходе его с более высокого энергетического уровня на низший?

Согласно старым представлениям она уходит из атома в виде энергии излучения и распространяется в пространстве (по утверждению классической электродинамики — непрерывно, согласно же теории квант — дискретно). Эта энергия может быть поглощена каким-либо атомом.

Но согласно новой теории Бора, Крамерса и Слэтера, взаимодействие между атомами осуществляется лишь посредством „виртуального“ поля излучения, которое, как сказано, энергии не несет; энергия, потерянная атомом, не распространяется в пространстве и не поглощается затем каким-либо другим атомом, а исчезает совершенно, пропадает в ничто. И в том случае, когда какой-либо атом возбуждается и переходит на более высокий энергетический уровень, он не поглощает энергию, пришедшую извне, а как бы создает энергию из ничего. Процессы потери энергии в одном атоме и приобретения энергии в другом — никак

не связаны между собой. Правда, лишенное энергии виртуальное поле, излученное одним атомом, может вызвать в другом атоме (если тот имеет соответствующие резонирующие вибраторы) предрасположение к переходу этого атома в другое энергетическое состояние. Но самого перехода может и не произойти. Новая теория считает, что в каждом единичном („элементарном“) атомном процессе закон сохранения энергии неверен: энергия может исчезать и рождаться. Закон сохранения энергии остается верным только в среднем, при большом числе несвязанных между собой единичных потерь и возникновений энергии.

Таким образом закон сохранения и превращения энергии получает в теории Бора, Крамерса и Слэтера статистическую трактовку. Но статистическая трактовка сохранения энергии допускает, — пусть и маловероятную, — возможность в какой-либо части мира либо возникновения, либо потери энергии без всякой компенсации. Таким образом закон сохранения энергии вообще нарушается, и уже не выступает как абсолютный закон природы.

Здесь следует обратить внимание и на другую сторону вопроса. В статистической трактовке закона сохранения энергии еще удерживается, правда, в среднем и, стало быть, не в качестве всеобщего закона. Но превращения энергии здесь уже нет: если даже потерянная энергия и компенсируется, то компенсация протекает как совершенно независимый процесс. Превращения энергии, — вот чего некоторые физики чаще всего не понимали в этом законе, — и тогда, когда трактовали его механистически, и тогда, когда по существу отрицали его, подобно Бору, Крамерсу и Слэтеру.

Планк назвал выход из тупика с помощью статистической трактовки закона сохранения и превращения энергии отчаянием<sup>1</sup>: с этим можно бы, пожалуй, согласиться, имея в виду, что отчаяние никогда в путном не ведет. Однако готовность пожертвовать законом сохранения и превращения энергии у Бора и его сотрудников отнюдь не случайна: в дальнейшем они принесли в жертву идеализму также и принцип причинности, в свою очередь получивший статистическую трактовку.

---

<sup>1</sup> М. П л а н к, Физическая закономерность в свете новых исследований. См. Усп. физ. наук, т. VI, вып. 3, 1926 г., стр. 196.

Вполне понятно, что статистическая трактовка закона сохранения и превращения энергии не выдержала экспериментальной проверки. Это доказали Боте и Гейгер уже в 1925 г., исследуя явление Комптона<sup>1</sup>. Суть этой проверки заключалась в установлении факта, что в элементарном акте столкновения фотона и электрона потеря части энергии и количества движения у первого и возникновение соответствующей части энергии и количества движения у второго — совершаются одновременно и закономерно, отражая факт передачи энергии и количества движения и, следовательно, их сохранения.

После этих опытов Бор, Крамерс и Слэтер отказались от своей теории, а разрешение трудностей атомной физики пошло другими путями.

Однако вскоре атака на закон сохранения и превращения энергии возобновилась. В этой атаке противники закона попытались опереться уже на эксперимент, на явление бета-распада атомных ядер.

Исследуя явление бета-распада, Эллис и Вустер в 1927 г., и Мейтнер и Ортман в 1930 г. нашли, что атомные ядра после бета-распада имеют вполне определенный дискретный спектр альфа- и гамма-лучей<sup>2</sup>. Это свидетельствовало о том, что при бета-распаде атомные ядра теряют вполне определенную энергию. Излученная при бета-распаде энергия электронов в свою очередь улавливается приборами. На основе закона сохранения (и превращения) энергии можно предположить, что спектр энергии бета-электронов будет также дискретным, соответственно дискретной разности энергии ядер до и после распада. Однако наблюдения выше-названных физиков показали, что спектр энергии бета-электронов непрерывен (электроны распределяются по величине энергии по статистическому закону), и, следовательно, баланс энергии не сходится.

Эти эксперименты дали повод многим физикам, — в том числе и Бору (на римском конгрессе по ядерной физике в 1931 г.), заявить, что закон сохранения энергии недействителен. Казалось, что трудности в удержании этого закона теперь непреодолимы.

<sup>1</sup> Bothe und Geiger, Zeitschr. f. Physik, 32, 639, 1925.

<sup>2</sup> C. D. Ellis and W. A. Wooster, Proc. Royal Soc., ser. A, 117, 109, 1927. L. Meitner und W. Orthmann, Zeitschr. f. Physik, 60, 143, 1930.

Однако и эта атака скоро была отбита.

В 1933 г. Сарджент доказал<sup>1</sup>, что энергия бета-электронов не может быть как угодно большой: она имеет для каждого элемента свою верхнюю границу.

Вскоре Эллис и Мотт доказали<sup>2</sup>, что эта максимальная энергия равна разности уровней энергии атомных ядер до и после распада.

Для наглядной демонстрации своей идеи Эллис и Мотт рассмотрели так называемый разветвленный распад ядер. Известно, например, что элемент ThC превращается в ториевый свинец (ThD или ThPb) двумя путями, идущими параллельно: около двух третей атомов ThC испускают бета-электроны с максимальной энергией 2,2 млн. вольт и превращаются в ThC'; атомы ThC' испускают альфа-частицы с энергией 8,95 млн. вольт и превращаются в ThD (путь: ThC —  $\beta$  — ThC' —  $\alpha$  — ThD); остальная треть атомов ThC испускает сначала альфа-частицы с энергией 6,2 млн. вольт и превращается в ThC''; атомы же ThC'' испускают бета-электроны с максимальной энергией 1,8 млн. вольт и два рода гамма-лучей с энергией 2,62 млн. вольт и 0,582 млн. вольт и превращаются в свою очередь в ThD (путь: ThC —  $\alpha$  — ThC'' —  $\beta$  —  $\gamma'$  —  $\gamma''$  — ThD). Исходный и конечный продукт превращений для обоих разветвленных процессов распада одинаковы; уже из этого следует, что энергия, потерянная каждым атомом в обоих типах превращений, должна быть одинакова. Это и в самом деле экспериментально подтверждается для бета-электронов с максимальной энергией (см. вышеприведенные величины), несмотря на то, что бета-распад в обоих типах превращений различен по величине максимальной энергии.

Отсюда вытекало, что для предельных случаев закон сохранения и превращения энергии верен. Отсюда же вытекало, что при бета-распаде энергия во всяком случае не рождается из ничего.

Но может быть она пропадает в ничто для отдельных бета-электронов, у которых значения энергии ниже максимального?

Здесь на помощь пришла теория и другие законы сохранения.

<sup>1</sup> B. W. Sargent, Proc. Royal Soc., ser. A, 139, 659, 1933.

<sup>2</sup> C. D. Ellis and N. F. Mott, Proc. Royal Soc., ser. A, 141, 502, 1933.

Еще в 1928 г. Паули высказал на сольвейском конгрессе гипотезу, что в каждом атоме при бета-распаде, кроме бета-электрона, вылетает еще и некоторая материальная частица, которую существующие приборы не улавливают. Эта легкая частица, — не обладающая зарядом и потому названная Паули „нейтрино“, — уносит с собой часть энергии, как раз равную той, которой в каждом элементарном случае недостает до баланса. Таким образом энергия, потерянная атомом при бета-распаде, распределяется между бета-электроном и нейтрино по статистическому закону, и лишь в отдельных случаях нейтрино получает энергию, близкую к нулю, а бета-электрон почти всю остальную.

Противники закона сохранения и превращения энергии могли до поры до времени относиться к гипотезе Паули с некоторой долей пренебрежения, как к гипотезе специально придуманной для спасения закона. Однако несколько лет спустя после открытия в 1930 г. Боте и Беккером новой материальной частицы — нейтрона, и после создания новой теории строения атомного ядра, — гипотеза о нейтрино получила новое обоснование. Новая теория атомного ядра, развитая особенно Ферми (обоснования ее мы приводить здесь не можем), утверждает, что ядро атома состоит из протонов и нейтронов, а не из протонов и электронов, как думали раньше. Следовательно, при бета-распаде электроны вовсе не вылетают из ядра (ибо их нет там в готовом виде), а рождаются в результате превращений в ядре, а именно в результате превращения нейтрона в протон. Теория говорит, что это превращение должно оставлять массу ядра почти неизменной, а положительный заряд увеличивать на единицу. Это и подтверждает опыт. Но теория требует, чтобы сумма моментов количества движения („спин“) всей системы в результате превращения оставалась неизменной. Бета-электрон уносит спин равный  $\pm 1/2$  условных единиц, в то время как общий спин ядра до и после превращения остается неизменным. Это требует наличия еще некоторой материальной частицы, выбрасываемой из ядра (но, повидимому, неулавливаемой существующими приборами), спин которой был бы равным и противоположным по знаку спину электрона; масса покоя ее должна равняться нулю. Это и есть нейтрино.

Таким образом закон сохранения моментов количества движения также требует наличия нейтрино. Мы можем

сказать, что хотя действия нейтринно не обнаружены экспериментально, — эта частица уже заняла прочное место в наиболее обещающих теориях ядерной физики.

Не успели улечься старые волнения, как борьба загорелась с новой силой: в 1936 г. американский физик Шэнкланд выступил с сенсационной статьей<sup>1</sup>. В ней он вновь возвратился к вопросу о том, справедлив ли закон сохранения энергии в единичных процессах взаимодействия фотонов и электронов. Его эксперименты, проведенные с гамма-лучами, — частота которых значительно больше, чем частота рентгеновых лучей, с которыми работали Боте и Гейгер, — якобы опровергали этот закон.

На этот раз борьба затихла очень быстро. В том же 1936 г. появилось множество работ по проверке выводов Шэнкланда<sup>2</sup>. Опыты проводились очень тщательно с гамма-лучами самых различных частот. Все они подтвердили, что закон сохранения энергии справедлив и для единичных процессов, что эксперименты Шэнкланда были неточны. Да и сам Шэнкланд<sup>3</sup> признал неверность своих выводов<sup>4</sup>.

Таким образом за последние полтора десятка лет закон сохранения и превращения энергии подвергается непрерывным нападкам. Мы дали далеко неполную картину этой борьбы: прежде всего не приведена вся разносторонняя „аргументация“ противников закона, равно как и не названы все эти противники. Участи этой подвергается не только рассматриваемый закон, но и принцип причинности, принцип пространственно-временного познания мира, т. е. основные законы природы, неразрывно связанные с материалистическим мировоззрением.

Борьба против этих законов отражает углубление кризиса физики в условиях загнивания капитализма и роста идеализма в буржуазных странах. Естественнoиспытана-

<sup>1</sup> Schankland, Phys. Rev., 48, 8, 1936.

<sup>2</sup> C. Jacobsen, Nature, 138, 25, 1936; W. Bothe u. H. Maier-Leibnitz, Zeitschr. f. Physik, 102, 143, 1936; A. Pikard & Stahel, Journ. Phys. et Radium, 7, 326, 1936 и др.

<sup>3</sup> Schankland, Phys. Rev., 50, 571, 1936.

<sup>4</sup> Мы должны здесь подчеркнуть, что самый факт экспериментальной проверки известной в настоящее время формы закона не может вызывать какие-либо возражения. Мы отмечаем лишь тот факт, что еще до окончательной проверки опытов Шэнкланда некоторые физики поспешили сделать вывод о несостоятельности закона сохранения энергии вообще.

тели являются стихийными материалистами, когда они соприкасаются с природой. Но многие из них до сих пор еще не знают (или не желают знать) диалектического материализма. И когда бурное развитие физики, ломающее старые метафизические понятия, заставляет физиков делать философские обобщения, — некоторые из них поддаются влиянию идеализма.

К сожалению, часть советских физиков-теоретиков не только не дала отпор этим идеалистическим выводам, не только не повела за собой физиков буржуазных стран, помогая им разрешать трудности с помощью единственно-научного метода, господствующего в нашей стране, — диалектического материализма, — но и сама пошла на поводу у модных идеалистических теорий, раболепствуя перед всем, что скажет „заграница“.

Однако основные кадры наших естествоиспытателей стоят на материалистических позициях и хотят активно бороться за материализм в науке. Всю оживившуюся борьбу вокруг закона сохранения и превращения энергии пробуждает к нему глубокий интерес естествоиспытателей и философов.

Как формулируется этот закон, как он обосновывается? Можно ли ожидать, что какой-нибудь очередной эксперимент опровергнет его? Какую роль играл он в развитии физики? Какова его история?

Квигга М. Плавка как раз и излагает в систематической форме историю, содержание и применение закона сохранения и превращения энергии.

Через полсотни лет после написания она в полной мере остается актуальной.

---

Закон сохранения и превращения энергии был открыт только в сороковых годах прошлого века. Но уже в XVII в. философия (Декарт) сформулировала принцип сохранения движения, с которым первый закон имеет генетическую связь. Принцип сохранения движения конкретизировался в XVII в., с одной стороны, в отрицательной форме, как принцип невозможности механического perpetuum mobile (Галилей, Гюйгенс) и, с другой стороны, в положительной форме, — в виде закона инерции (Галилей) и закона сохранения количества движения (Декарт). Во второй половине того же века Гюйгенс и Лейбниц сформулировали

закон сохранения живых сил, обобщенный в дальнейшем Эйлером и И. Бернулли для так называемых консервативных систем тел. Лишь после развития паровой техники, ряда крупнейших физических открытий, глубоких философских обобщений и в результате упорной борьбы, — закон сохранения движения был обобщен как закон сохранения и превращения энергии и стал основным законом физики.

В его подготовке принимали участие крупнейшие ученые начала XIX в. — Румфорд, Дэви, Френель, Ампер, Фарадей и многие другие. Открытие же его обычно связывается с именами Р. Майера, Дж. П. Джоуля и Г. Гельмгольца.

Уже в работах основателей закона сохранения и превращения энергии последний получил различную трактовку.

Юлиус Роберт Майер (1814—1878) видел суть закона в превращении качественно различных сил (видов энергии) природы друг в друга, причем эти превращения всегда осуществляются в определенных количественных (эквивалентных) соотношениях.

Майер пришел к открытию закона в результате физиологических наблюдений. Но он дал ему и логическое обоснование, опираясь на закон достаточного основания. Ничто в мире не происходит без достаточного основания, без причины. Причина же всегда равна действию (*causa aequat effectum*). И наоборот, действие всегда возникает в меру исчерпания причины. В этом бесконечном ряду причин и действий, меняющихся местами, ничто, следовательно, не пропадает, а все лишь видоизменяется<sup>1</sup>.

Неразрушимые, способные к превращениям, невесомые объекты и суть, по Майеру, силы (в отличие от неразрушимых и способных к превращениям, но обладающих, кроме того, свойствами непроницаемости и весомости объектов — материи). Таким образом силы, по Майеру, не суть абсолютные неисчерпаемые источники движения. Они являются только звеньями в цепи превращений; по мере возникновения действия сила в ее данной форме исчерпывается. Возникшее действие становится источником другого действия, и так — без конца.

<sup>1</sup> „Причины суть (количественно) неразрушимые и (качественно) способные к превращениям объекты“ — пишет Майер. См. „Замечания о силах неживой природы“, в сборнике: Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, ГТТИ, стр. 75, 1933.



Сила, по Майеру, может принимать различные формы. Сила падевия, движение, теплота, электричество, „химическая разеость“, а равно и органические процессы, — все это качественно различные формы сил, превращающиеся друг в друга в неизменных количественных соотношениях.

В этом и заключается закон сохранения и превращения сил в трактовке Майера (или энергии — в позднейшей терминологии).

Это и есть качественная трактовка закона сохранения и превращения сил (энергии). В ней нет никакого отождествления сил, никакого сведения всех сил к одной, преимущественной<sup>1</sup>.

Исходным пунктом гельмгольцевского обоснования закона сохранения энергии является аксиома, что невозможно получить бесконечное количество работы при действии любой комбинации тел природы друг на друга, т. е. так называемый принцип невозможности механического *perpetuum mobile*. Этот последний принцип Гельмгольц прямо отождествляет с предположением, что все действия в природе можно свести к действию притягательных или отталкивательных сил, зависящих только от расстояния взаимодействующих точек, т. е. к действию центральных сил.

Выведенный из этого механического представления закон сохранения живых сил, в уравнении которого работа сил, взятая с обратным знаком, обозначается как „потенциальная сила“, как раз и является, по мнению Гельмгольца, законом сохранения силы (энергии).

По Гельмгольцу существуют только две формы силы (энергии) — кинетическая и потенциальная, — к которым сводятся все остальные. Всякий раз, когда физик имеет дело с каким-либо процессом природы, перед ним должна вставать первая и основная задача: выяснить, что в этом процессе является кинетической энергией, что — потенциальной, и каково соотношение между ними. Закон сохранения энергии, по Гельмгольцу, как раз и устанавливает, что сумма кинетической и потенциальной энергии для данной замкнутой системы всегда остается постоянной. Это ограниченное толкование закона целиком обуславливается механисти-

<sup>1</sup> Так, Майер прямо утверждает, что из связи между теплотой и движением нельзя сделать вывод о том, что сущность теплоты — движение (см. там же, стр. 84). Под движением Майер понимает механическое движение — перемещение.

ческим мировоззрением Гельмгольца, стремившегося свести все явления природы к механическому движению — перемещению материальных точек под действием центральных сил.

Но односторонне понятый закон в свою очередь питал механицизм: способность энергии к превращениям естественные испытатели поняли, как доказательство сводимости всех видов энергии к одному из них, и именно к механическому.

Судьба работ Майера и Гельмгольца вначале была общая, а затем она разошлась. Первые статьи Майера и Гельмгольца не хотели печатать в журналах. Планк пишет, что „новый принцип был тогда (т. е. в конце сороковых годов. С. С.) как раз непопулярен, он требовал столь радикального преобразования всех физических воззрений, что его принимали вообще весьма холодно и большей частью отклоняли“<sup>1</sup>.

Но когда закон был обоснован экспериментально и оправдал себя во всех областях физики — ученые примкнули к трактовке закона, данной Гельмгольцем. Приоритет Майера оспаривали, а про его толкование закона забыли. Стало модой считать, что собственно и обоснования-то закона Майер никакого не дал, за исключением дедуктивно-спекулятивного, а, стало-быть, и недостаточного.

Только Энгельс, обобщивший развитие естествознания, дал в начале восьмидесятых годов наиболее глубокое и наиболее общее толкование закона сохранения и превращения энергии, которое и для современной физики должно служить руководящей идеей. Только Энгельс сумел оценить и значение работ Роберта Майера.

Суть концепции Энгельса сводится к следующему. Формой существования материи является движение, изменение в общем смысле слова. Движение неотделимо от материи. Вся историческая практика человека и история познания природы показывают несостоятельность признания инертной, неразвивающейся материи самой по себе и движения, оторванного от материи, самого по себе. Только самодвижение материи, в котором она приобретает различные качественные формы, позволяет объяснить все явления природы из нее самой, а не из „боженьки“. Но это означает, что движение материи не может ни исчезать, ни создаваться из ничего, что в природе происходят только

<sup>1</sup> См. настоящее издание, стр. 55.

качественные превращения материи, ее форм существования, — превращения, происходящие в известных количественных соотношениях.

Это и отражает на физическом языке закон сохранения и превращения энергии. Поэтому он есть закон, связанный с основами материалистического мировоззрения, и не может быть от него оторван. Поэтому он есть абсолютный всеобщий закон природы и не может быть поколеблен в своей основе. Энгельс писал об этом законе:

„Любая форма движения, оказывается, способна и должна превращаться в любую иную форму движения. В этой форме закон достиг своего последнего выражения. Благодаря новым открытиям мы можем найти новые доказательства его, придать ему новое, более богатое, содержание. Но к самому закону, как он здесь выражен, мы не можем прибавить более ничего. В своей всеобщности, в которой одинаково всеобща форма и содержание, он неспособен к дальнейшему расширению: он — абсолютный закон природы“<sup>1</sup>.

Он есть итог исторической практики человека в изменении внешнего мира, т. е. итог развития промышленности, техники и в такой же мере — итог развития мышления, обобщившего эту практику, обобщившего развитие познания человека.

Естественносмыслители типа Гельмгольца, В. Томсона и др. видели корни этого закона только в бесплодных попытках (бесспорно сыгравших большую роль в развитии физики) построить механический *perpetuum mobile*. Это их утверждение казалось правильным, ибо оно совпадало с единой механистической картиной мира, которой они придерживались. Но они не учли всего исторического опыта и всей борьбы между материализмом и идеализмом, и весьма обеднили многообразие качественно различных форм развивающейся материи, сведя все явления природы к механи-

<sup>1</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс, Сочинения, т. XIV, стр. 496. Высокую и широко известную оценку этого закона, а также и трактовку его содержания читатель найдет в материалах к „Людвигу Фейербаху“, см. там же, стр. 649—650.

Признание абсолютности закона сохранения и превращения энергии еще не означает признания неизменности его физической формы: наоборот, физическая форма закона развивается по мере углубления нашего познания природы, как об этом будет сказано подробнее ниже.

ческому движению точек, а закон сохранения и превращения энергии к закону сохранения суммы кинетической и потенциальной, т. е. механической, энергии.

Майер видел в законе прежде всего превращаемость качественно различных сил (энергии) и искал эквивалентность в этих превращениях. А это и есть то новое, что открыто впервые только Майером<sup>1</sup>. Майеровская оценка закона ближе к оценке Энгельса, чем оценка Гельмгольца. Сравнивая работы Гельмгольца и Майера о законе сохранения и превращения энергии, Энгельс дает более высокую оценку работам последнего.

«... Но в этом сочинении (Гельмгольца. *C. C.*) не находится ровно ничего нового для уровня науки 1847 г... вторая работа Майера от 1845 г. уже опередила это сочинение Гельмгольца. Уже в 1842 г. Майер утверждал „неразрушимость силы“, а в 1845 г. он, исходя из своей новой точки зрения, сумел сообщить гораздо более гениальные вещи об „отношениях между различными физическими процессами“, чем Гельмголец в 1847 г.»<sup>2</sup>.

Высокая оценка майеровской трактовки закона сохранения и превращения энергии Энгельсом еще не дает основания на отождествление их точек зрения на этот закон. Майер считает энергию внешним действием материи, ее „силой“ (сохранение старого термина имеет у него еще некоторый смысл). „В природе, — говорит Майер, — имеются два рода причин, между которыми эмпирически не существует никакого перехода. Одну группу образуют причины, которым присуще свойство весомости и непроницаемости, — материя; другая группа — это причины, у которых это свойство отсутствует, — силы, называемые благодаря этому характеристическому свойству также невесомыми... Если причиной является вещество, то и в качестве действия получается также таковое же; если же причиной является некоторая сила, то в качестве действия будет также

<sup>1</sup> Энгельс в заметках «Диалектика и естествознание» писал: „Количественное постоянство движения было высказано уже Декартом и почти в тех же выражениях, что и теперь (Клаузиусом), Майером). Зато превращение формы движения открыто только в 1842 г., и это, а не закон количественного постоянства, есть как раз новое“. См. К. Маркс и Ф. Энгельс, Сочинения, т. XIV, стр. 449. Дата, упоминаемая Энгельсом, есть год выхода первой печатной работы Майера.

<sup>2</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс, Сочинения, т. XIV, стр. 540.

некоторая сила"<sup>1</sup>. Такая трактовка энергии (силы) отрывает ее от материи, а характер ее превращений — от конкретных условий, в которых они совершаются, от структуры материи, в которой эти превращения и происходят. Раздельное существование двух законов сохранения и превращения — материи и энергии — обосновывалось для Майера не только опытным материалом того времени, но и общей исходной посылкой: равное (сила) всегда дает только равное (силу же). Установление связи массы и энергии сначала в теории относительности, а затем и во внутриатомной физике шло поэтому вразрез с майеровским пониманием энергии (силы).

Для Энгельса же энергия не есть внешнее действие материи. Развивающаяся материя — вот исходная посылка Энгельса; всякое превращение энергии есть превращение форм движения материи; оно определяется конкретными условиями, состоянием, структурой материи. Энгельс не дождался до современной физики, показавшей связь изменения структуры вещества с изменением энергии. Установление этой связи только подтвердило и конкретизировало его понимание. Трактовка Энгельса включает в себе возможность дальнейшей конкретизации и углубления понимания энергии в связи с развитием физики.

Закон сохранения и превращения энергии был признан не сразу. В течение десяти—пятнадцати лет после его открытия в физике шла горячая борьба его сторонников (Майер, Гельмгольц, Джоуль, Томсон) и его противников (Ифаф, Зейфер и др.). В это время физика развивалась под знаком проверки закона сохранения и превращения энергии для всех известных физических процессов. К шестидесятым годам накопилось достаточно экспериментального материала, подтверждавшего закон, и он получил всеобщее признание. Однако вскоре некоторые физики, признавая самый закон справедливым, дали ему идеалистическое истолкование (махисты, энергетик).

В такой новой сложной обстановке Планк и выпустил свою книгу.

Первым, кто дал идеалистическое истолкование закона

---

<sup>1</sup> См. „Замечания о силах неживой природы в сборнике: Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, ГТТИ, стр. 76—78, 1933.

сохранения и превращения энергии, был австрийский физик и философ Эрнст Мах (1838—1916).

Мах начал выступать в физике, как проводник субъективно-идеалистической философии (эмпириокритицизма или махизма), уже в шестидесятых годах. Его борьба была направлена против материализма; при этом Мах использовал все слабости наиболее распространенной среди естествоиспытателей формы материализма, а именно — слабости механистического материализма. Однако в это время как основные массы естествоиспытателей, так и ведущее ядро их — например Томсон, Кирхгоф, Максвелл — стихийно занимали материалистические позиции. Неудивительно, что идеи Маха вначале не пользовались успехом среди физиков. Сам Мах в исторических экскурсах по поводу генезиса его взглядов (а Мах любил заниматься историей своей философии) неоднократно жаловался, что в первое время его идеи „оказались неподходящими для обсуждения их со специалистами“, что каждый выступавший против материализма „подвергался опасности вызвать мнение, что он не стоит на высоте знаний своего времени и не понял основной черты современной культуры“<sup>1</sup>. Если верить Маху, сочувствующая ему аудитория состояла в это время всего только из одного человека, некоего инженера Поппера.

Но уже в начале семидесятых годов Мах чувствует новые веяния. Он отмечает поворот в среде „кое-каких видных исследователей“ и спешит закрепить свой приоритет на новую трактовку основных вопросов естествознания. В 1872 г. Мах выпускает небольшую книгу „Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit“, в которой дает идеалистическое истолкование важнейших физических понятий, в частности, закона сохранения и превращения энергии. В этой же работе Мах излагает основы своей теории познания „откровенно, просто и ясно“, по характеристике В. И. Ленина.

В чем суть взглядов Маха на закон сохранения и превращения энергии?

Эти взгляды можно сформулировать в нескольких словах:

Этот закон не нов и, собственно, никакого открытия закона сохранения и превращения энергии в XIX в. не было.

Далее, закон по своей значимости вовсе не превосходит

<sup>1</sup> Э. Мах, Принцип сохранения работы. История и корень его, русск. пер. Г. А. Котляра, стр. 24, 1909.

другие законы физики, например, законы Ньютона, закон Бойля-Мариотта и др.; поэтому он не может претендовать на роль руководящего закона физики.

Наконец, из него не следует никаких физических выводов, в частности, не следует никаких выводов о природе того или иного явления.

В самом деле, почему этот закон не нов? Потому, рассуждает Мах, что это подтверждает история. История показывает, что этот закон „носился перед умственным взором почти всех выдающихся последователей“. Им пользовались в механике уже задолго до нашего времени в виде принципа исключенного perpetuum mobile. Закон сохранения энергии — лишь другая форма принципа исключенного perpetuum mobile. Между ними различие лишь по форме, по существу они тождественны. Сам принцип исключенного perpetuum mobile — отнюдь не механического порядка. Он был, как утверждает Мах, „установлен еще до развития механического мировоззрения“ и поэтому „не может быть на нем основан“. Мах видит основание этого принципа в принципе причинности. Первый утверждает, что „из ничего нельзя получить работу“; второй утверждает, что „каждое действие имеет свою причину“. Оба утверждения тождественны. Что касается принципа причинности, то Мах видит в нем простую констатацию взаимной зависимости явлений друг от друга. Мы находим в наших ощущениях эту зависимость, она для нас становится „законом“, „ограничением нашего ожидания“ того или иного события, мы называем это ограничение нашего субъективного ожидания принципом причинности. Этот принцип — не объективный закон природы, а имеет субъективное происхождение. Все познание сведено к познанию наших ощущений. Ощущения — единственные „элементы“ мира. Материальный мир уничтожен.

Итак, закон сохранения энергии не нов. Он тождествен принципам исключенного perpetuum mobile, который в свою очередь есть „только другая форма закона причинности“. В конечном счете закон сохранения и превращения энергии оказывается не объективным законом природы, а ограничением нашего субъективного ожидания.

Можно ли говорить после этого, что закон сохранения и превращения энергии по своей значимости превосходит другие законы физики? Если вы один закон не является объективным законом природы, то ответ уже предопреде-

лен. Но Мах пытается создать видимость и физического обоснования своего ответа. Для этого он берет простейшую механическую задачу — о рычаге — и решает ее при помощи самых различных законов — законов Ньютона, принципа возможных перемещений, принципа возможной работы, принципа исключенного *perpetuum mobile*. Как и следовало ожидать, он получает один и тот же результат и на этом основании делает вывод, что все методы репевления и все принципы по существу равнозначны и различаются лишь по форме. Все они могут быть, кроме того, выведены с помощью математической дедукции друг из друга. Мах не признает никакого существенного развития общей идеи о сохраняемости движения. Если физики утверждают, что принцип невозможности *perpetuum mobile*, принцип возможных перемещений и, наконец, принцип сохранения энергии, — что это все различные ступени развития нашего познания объективного закона неразрушимости движения, каждая из которых охватывает все более широкий круг задач, то это, по мнению Маха, неверно. Все эти принципы — лишь различные формулировки, различное описание одних и тех же фактов, и ни один из них не дает ничего принципиально нового. И если физика переходила от одной формулировки к другой, то это объясняется только тем, что она искала все более экономичного и удобного описания, способствующего удержанию в памяти тысячи аналогичных восприятий. В этом, по Маху, и заключается развитие науки: оно есть лишь формальное развитие, происходящее в силу стремления мышления к экономии (принцип экономии мышления). Сама наука, по Маху, есть лишь „упорядочение фактического, чувственно данного на основании принципа экономии мышления“.

Исходя из сказанного, Мах отказывается видеть существенное различие между законом сохранения и превращения энергии и законом Бойля-Мариотта. Первый, говорит Мах, выражает связь между некоторыми элементами в следующей форме: сумма кинетической и потенциальной энергии постоянна, т. е.  $E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = \text{const.}$  Второй тоже выражает связь между некоторыми (другими) элементами: произведение объема газа на его давление постоянно, т. е.  $p \cdot v = \text{const.}$  Но второму закону, рассуждает Мах, можно придать форму первого: в самом деле, уравнение  $p \cdot v = \text{const.}$  можно выразить еще и так:  $\log p + \log v = \text{const.}$  Теперь



форма связи в обоих законах одинакова. Различны лишь элементы, но элементы суть только ощущения. А между тем, говорит Мах, — „приписывали особое значение тому, что сумма накопленного запаса работы и живой силы, или сумма энергии, как еще иногда выражаются, оказалась постоянной. Но если и необходимо признать, что такое купеческое или хозяйственное выражение очень удобно, очень понятно и весьма приспособлено к экономическим предрасположенной природе человека, тем не менее мы при спокойном и тщательном изучении не найдем в таком законе ничего существенно большего, чем во всяком другом законе природы“.

Таким образом, выбросив внешний мир, существующий независимо от сознания, Мах потерял в познании всякую точку опоры и пришел к автантаучной позиции<sup>1</sup>.

Может ли еще после такой трактовки закон сохранения и превращения энергии претендовать на руководящую роль в физике? Исно, что Мах отказывает ему в этом. Новую эпоху в физике Мах видит не в связи с открытием этого закона, а в связи с собственными выводами о том, что разломались старые абсолютные понятия, значит, все относительно, все зависит от „моей“ субъективной точки зрения, а вне „меня“ ничего нет.

Наконец, из закона сохранения и превращения энергии нельзя сделать, по Маху, никаких физических выводов, как это сделала физика XIX в. Признав этот закон, она пришла к заключению, что теплота, например, не есть вещество, как это думали до тех пор. Мах стремится показать, что это отнюдь не вытекает из закона. Этот вывод сделан лишь на основе наблюдения, что при получении механической работы исчезает определенное количество теплоты. Но что такое количество теплоты? — спрашивает Мах. — Случайно установившееся в истории физики определение. Оно не имеет никакого объективного, присудительного для нас, значения. В самом деле, рассуждает он, чтобы измерить, например,

<sup>1</sup> К сожалению, в среде наших физиков еще недавно распространялись теории, что закон сохранения и превращения энергии якобы отражает идеологию буржуа, привыкшего на счетах подсчитывать баланс своих доходов и расходов. Это «рассуждение» выдавалось за якобы пролетарскую философию и приводилось в качестве довода в пользу того, что пролетариату нечего терять, если выбросить закон сохранения и превращения энергии. Подобная „аргументация“ целиком опирается на маховскую оценку закона и лишь приспособлена к новым условиям.

электричество, можно подойти к нему с разных точек зрения. Можно измерять при помощи крутильных весов силу отталкивания одноименных зарядов. Это и сделал Кулон в 1785 г. Можно при помощи электрического воздушного термометра измерять количество теплоты, которое получается при разряде лейденской банки. Это и сделал Рисс в 1838 г. И тот и другой результат физики могли бы положить в основу определения количества электричества. Но то, что физики измеряют на весах Кулона, остается неизменным при получении работы от электричества. А то, что они измеряют при помощи термометра Рисса (количество теплоты при разряде) — изменяется. Исторически вполне случайно произошло так, что Кулон открыл свои весы раньше, чем Рисс — термометр. И поэтому в основу определения количества электричества положено измерение Кулона, а не Рисса. Поэтому мы и говорим, что количество электричества остается неизменным при получении работы, что электричество — вещество. Но это случайно и условно. То же и с теплотой. Вещество она или не вещество? И да и нет. Это условно и совершенно безразлично. „Если бы кому-либо понравилось и в настоящее время еще представлять себе теплоту как вещество, можно было бы ему позволить это невинное удовольствие“<sup>1</sup>.

Нет нужды доказывать после Лепина, что с точки зрения теории познания все эти рассуждения Маха глубоко реакционны. Но здесь важно показать реакционность этих взглядов и с физической точки зрения.

Основной тезис Маха состоит, как мы видели, в том, что закон сохранения (и превращения) энергии не нов, что он тождествен принципу исключенного *regretium mobile*, который по существу сводится к принципу причинности и, далее, к простой констатации зависимости явлений друг от друга<sup>2</sup>. Насколько эта формулировка бессодержа-

<sup>1</sup> Э. Мах. Принцип сохранения работы, стр. 30.

<sup>2</sup> Конечно, поскольку причинность является более общей формой связи между явлениями, постольку существует известная связь между принципом причинности и законом сохранения и превращения энергии. Несомненно, что отрицание этого последнего приводит и к отрицанию существования объективной причинной связи. Это понимал и Р. Майер, выведший закон сохранения силы из положения: *causa aequat effectum*. Мы возражаем здесь только против маховского отождествления конкретного физического закона с принципом причинности: это отождествление приводит к выхолащиванию того и другого.

теля, видно из того, что к этой же констатации зависимости явления друг от друга сводится у Маха и пространство и время<sup>1</sup>.

Выхолостив содержание закона сохранения и превращения энергии, нетрудно прийти к выводам о его несущественности. А между тем этот закон вполне конкретен: и форма закона, и глубина его понимания, и мера того, что сохраняется, — все это имеет конкретное содержание и развивается по мере углубления физических знаний. Мы не можем здесь излагать всю историю закона и напомним лишь основные моменты ее.

Идея о сохранении движения заключается уже в простейших формулировках Галилея, утверждающих, что тело способно подняться как раз на ту высоту, с которой оно упало, за счет приобретенной им при падении скорости, а также и в решении задачи о колебании физического маятника Гюйгенса, исходившего при этом из невозможности *perpetuum mobile*. Но эти идеи сохранения выражены лишь в зачаточной форме, пригодной лишь для механического движения падающих тел.

Декарт провозгласил сохранение движения в качестве всеобщего принципа; при этом он утверждал, что в мире существует лишь механическое движение. Эта принципиальная установка Декарта заранее предопределяла механическую сущность всякого процесса, что не было случайным, так как основные задачи того времени были как раз механического порядка. Но, отрицая более сложные формы движения, картезианская физика зашла в тупик. В самом

<sup>1</sup> Вот три определения Маха, взятые из одной и той же книги („Принцип сохранения работы“):

„Таким образом закон причинности достаточно охарактеризован, когда говорят, что он предполагает взаимную зависимость между явлениями“ (стр. 41).

„Таким образом физическое пространство . . . есть не что иное, как зависимость явлений друг от друга“ (стр. 66—67).

„Таким образом физическое время есть возможность изображения каждого явления как функции любого другого явления“, в частности, как функции явления движения маятника (стр. 67).

Впрочем подобно выхолащивание физического содержания закона является излюбленным методом Маха: аналогичным образом он поступает и с принципом наименьшего действия, сводя его к общему „принципу однозначного соответствия“; см. его „Механика. Историко-критический очерк ее развития“, 1909, стр. 324—325.

деле, желание все объяснить из механики не отвечало законам природы, ибо механическое движение само по себе не сохраняется, а превращается в другие, немеханические формы движения, существование которых картезианцы не признавали. Исчезающее видимое механическое движение, по мнению картезианцев, лишь передается невидимым механическим системам, различным эфирным вихрям и потокам. Введенные ими для объяснения физических процессов (например, световых процессов, магнитного притяжения и т. п.) многочисленные модели эфирных вихрей и потоков противоречили друг другу и не разрешали поставленных задач. Поэтому картезианская физика отошла на второй план; победила концепция противников картезианства — ньютоновцев.

Ньютон строил физику на формальном понятии силы, без анализа его физического содержания. Так, движение планет вокруг солнца обусловлено, по Ньютону, не вращением эфирного вихря, якобы увлекавшего с собой планеты, а наличием особой силы тяготения, физическую природу которой он отказывается рассматривать; задачи того времени и не требовали такого рассмотрения. Введение понятия силы создало возможность для дальнейшего развития механики. Ньютоновы законы механики фактически содержат закон сохранения движения в механических процессах. Однако сила допускала такую трактовку, согласно которой движение могло порождаться и исчезать; физический смысл сил не вскрывался, их знали только по их действиям. Сколько было известно действий, столько было и сил. Связь между ними не знали, да и не ставили перед собой такую задачу. Так как силы были оторваны от материи, то последователи Ньютона создали для них особых носителей. Так родились различные флюиды, которые впоследствии получили название невесомых. Но невесомые принесли в физику неизменность, застой. Природа оказалась разделенной на клетки, между которыми не было связи.

Между тем, с развитием крупной промышленности перед физикой ставились новые задачи. Это — прежде всего задачи, связанные с отысканием наиболее эффективных источников работы, в частности, с развитием паровой техники. Получение механического движения из других форм, изучение условий такого получения навязывалось ростом производительных сил, техникой. Мало того, побочные тепловые процессы в произ-

водстве, получающиеся при трении в быстро вращающихся машинах, или при обработке металла, стали все больше обращать на себя внимание, так как приводили к непроизводительным затратам работы.

Да и в самой физике существовал ряд далеко не решенных задач: эмиссионная теория света не давала удовлетворительного объяснения ни интерференционных, ни дифракционных явлений, ни, тем более, явлений поляризации, замеченных еще Ньютоном, и обнаруженных Малю при отражении света в начале XIX в.: Био безуспешно пытался объяснить последние, исходя из корпускулярной теории. Сама постановка этих новых задач была отличной от той, которая была во времена Декарта и Ньютона. В новых задачах нельзя было ограничиться ни общей гипотезой картезианского толка, заранее предопределявшей механический характер процессов, ни формальным их решением, не вскрывающим физического смысла процессов, как это смог сделать Ньютон, решая задачу о перемещении небесных тел. В новых задачах как раз необходимо было вскрыть физическую сущность процесса, детально исследовать его течение, например, исследовать условие возникновения механической работы при тепловых процессах, и теплоты при механической работе. Связь одного явления с другим называлась при этом с принудительной силой. Это понимали многие передовые физики того времени. Фрепел в 1822 г. говорил, что „цель всякой хорошей теории должна состоять в том, чтобы содействовать прогрессу науки открытием связующих фактов и соотношений между наиболее различными и кажущимися наиболее независимыми друг от друга категориями явлений“. Это был голос не только передовых физиков: идеи развития и связи всех форм движения созревали и в других областях естествознания, например, в геологии, в палеонтологии, в химии. Что касается физики, то многочисленные работы лучших ее представителей уже с конца XVIII в. идут в этом направлении. Румфорд производит множество наблюдений и убеждается, что теплота порождается в неограниченном количестве за счет работы сил трения. Фрепел доводит до совершенства математическую разработку волновой теории света: последний в учении Фрепеля перестал быть потоком неизменных корпускул, а стал формой движения, способной к превращениям. Итог, который под-

водит Френель своему учению о свете, знаменателен: „Вероятно, что во всех этих различных случаях (поглощения. *С. С.*) часть света изменяет свою природу и превращается в тепловые колебания, для наших глаз уже незаметные . . . Но общее количество живой силы должно остаться тем же самым . . .“ Как программа звучат его заключительные слова к трактату „О свете“: „Если что-либо должно сильно содействовать этому великому открытию (принципов молекулярной механики. *С. С.*) и обнаружить тайны внутреннего строения тел, то этим может быть только достаточно глубокое исследование явлений света“. В это же время Ампер исследует действия тока на магнит, и приводит к краху магнитный флюид. Фарадей, убежденный в единстве сил природы, около десяти лет с удивительной настойчивостью работает над „превращением магнетизма в электричество“, пока, наконец, не открывает в 1831 г. электромагнитную индукцию. Немало делает он и в области исследований химических действий электричества, и в ряде других областей. Нельзя, наконец, не назвать имени Джоуля, проделавшего бесчисленное множество самых остроумных и тщательных опытов по установлению различных эквивалентов и, в первую очередь, механического эквивалента теплоты. Мы уже не говорим здесь о Кольдингге и Томсоне, о Майере и Гельмгольце.

Все эти работы приводили к одному: нет в природе неизменных флюидов; теплота, свет, магнетизм и т. д. — все это лишь формы движения, превращающиеся друг в друга. Уже одних этих исследований привели к величайшим открытиям, к быстрому расцвету физики.

Теория невесомых тормозила развитие физики. Крах теории невесомых привел к установлению превращаемости форм движения, а в превращениях форм движения были установлены эквивалентные соотношения.

Крах теории невесомых привел к обобщению закона сохранения механического движения в закон сохранения и превращения качественно различных форм движения материи, или в закон сохранения и превращения энергии. И это произошло именно в XIX в.

Огромнейший труд, колоссальное количество накопленных фактов, блестящие успехи физики, — все это игнорируется Махом, когда он объявляет борьбу против невесомых — условной и несущественной, когда он доказывает,

что ничего, собственно, и не произошло, что закон сохранения и превращения энергии не нов. Но главное, чего Мах не понял, — это необходимости доказать, что теплота, свет, магнетизм и т. д. суть формы движения материи; доказать, далее, превращаемость этих форм движения друг в друга. Доказательство превращаемости форм движения и явилось в обходимой и предпосылкой обоснования закона сохранения энергии. После того как была установлена эквивалентность определенных мер движения при превращении его форм и независимость эквивалентов от пути превращения, — закон сохранения энергии был окончательно обоснован. Если у Декарта сохранялся механический импульс движения доказывалось теологически, то в XIX в. сохранение движения стало физически обоснованной истиной.

Для Маха эта огромная историческая работа физики не существует, ибо для него не существует и проблемы превращения движения материи. Основоной закон природы у него выродился в простое правило, в случайно установленное соотношение между „элементами“. Не случайно Мах не понимает существенного различия между механическим *perpetuum mobile* и физическим.

Рассмотрение теплоты, света и т. п., как форм движения, привело к огромному прогрессу физики и в дальнейшем. На этой почве развилась термодинамика и кинетическая теория материи, объясняющая сущность ряда физических понятий (давление, температура и др.) и законов (например, уравнение состояния газов). На этой же почве развилась и электродинамика Максвелла, вытеснившая господствовавшую до того времени теорию двух электрических жидкостей. Открытие закона сохранения и превращения энергии, показав единство всех форм движения, поставило перед физиками задачу исследования специфических закономерностей каждой из них; этот закон привлекал внимание физиков к изучению условий, в которых протекают процессы превращения, и вместе с тем служил им руководящей нитью в исследовании. Кенга М. Планка как раз и показывает значение закона сохранения и превращения энергии для физики XIX в.; уже тем самым она объективно направляется против махистской трактовки закона.

Не менее огромно значение закона и для техники: поиски новых источников энергии она ведет на основе применения этого закона.

Но, спрашивается, могли ли физики XIX в. понять его значение и извлечь из него пользу, если бы они исходили не из материалистического взгляда на природу, на объективность законов, на понятия, отражающие внешний мир, а из взгляда махистского, считающего весь мир — субъективным, понятия — условными, развитие науки — случайным и лишь формальным? Ясно, что нет; ясно, что махизм сыграл реакционную роль в физике, утверждая, что закон сохранения (и превращения) энергии не гов, что он тождествен с принципом причинности, и отрицая этим его конкретное содержание.

Таким образом даже краткое рассмотрение истории закона сохранения энергии и его значения для физики показывает, что он не был известен до XIX в. Нужно было на опыте доказать взаимную превращаемость всех качественно различных форм движения; нужно было вообще доказать, что теплота, свет и т. д. суть различные формы движения материи. Из сказанного видно, насколько бессодержательной и бессмысленной является маховская трактовка закона, согласно которой вся огромная экспериментальная и теоретическая работа физики не имеет никакого принципиального значения.

Дальнейшая история физики еще ярче подчеркивает несостоятельность маховской точки зрения. Физика XX в. приступила к изучению структуры вещества, строения молекул и атомов, и обнаружила при этом, что когда разрушается одна форма вещества и образуется другая, с изменением количества массы, то соответственно этому изменению массы определенным образом изменяется и энергия. Астон исследовал это явление, бомбардируя атомы лития ядрами водорода. В результате соударения атома лития и ядра водорода получаются два ядра гелия, которые разлетаются в противоположные стороны с очень большой кинетической энергией, значительно превышающей энергию исходных частиц. Мы видим, что первоначальные частицы (литий, водород) изменились, так как конечные частицы (два атома гелия) уже не те. Общая масса конечных частиц меньше общей массы исходных на 0,0182 единицы. За счет этого уменьшения собственной массы происходит увеличение кинетической энергии частиц (гелия) на  $2,72 \cdot 10^{-5}$  эрг, как показывает непосредственное измерение их скорости. Этот опыт подтверждает выводы теории относитель-



ности, согласно которой между массой и энергией существует соотношение, определяемое уравнением  $E = mc^2$  ( $E$  — энергия,  $m$  — масса,  $c$  — скорость света). Если прирост энергии в опыте Астона разделить на квадрат скорости света и привести полученную величину к атомным единицам, то получается как раз масса, потерянная в результате изменения структуры вещества. Это достижение атомной физики обогащает и конкретизирует закон сохранения и превращения энергии. Чем глубже мы познаем структуру субстанции, тем глубже мы понимаем самый закон сохранения и превращения энергии. Оправдываются слова Энгельса о том, что „благодаря новым открытиям мы можем пойти новые доказательства его, придать ему новое, более богатое, содержание“ (см. выше, стр. XVI). Абсолютный по своему содержанию, — в смысле признания всеобщим законом природы именно сохранение и превращение форм движения материи; абсолютный по своей форме, — в смысле признания, что такое превращение не знает исключений („любая форма движения, оказывается, способна и должна превращаться в любую иную форму движения“, см. там же), — этот закон развивается по своей физической форме, по мере познания новых форм движения: молекулярной, атомной, внутриядерной.

Пока еще трудно оценить в полной мере практическое значение этой новой физической формы закона сохранения и превращения энергии. Но и сейчас уже ясно, как велика ее роль в новых космогонических теориях, ибо она дает путь к решению вопроса об огромных источниках энергии излучения звезд.

Могла ли, спрашивается, физика XX в. познать закон сохранения и превращения энергии более глубоко, познать связь энергии и массы и этим подойти к решению космогонических проблем, если бы она исходила из концепции Маха, вообще отрицавшего необходимость исследования сущности различных форм движения материи, отрицавшего самое существование атомов и снимавшего проблему познания структуры вещества? Ясно, что нет, ясно, что махизм сыграл реакционную роль в развитии физики.

Но подобно тому как с развитием физики развивается и физическая форма закона, изменяется так же и самая мера сохраняющейся энергии, мера движения в общем смысле слова.

Уже Галилей пытался разрешить вопрос о мере движения, вводя понятие момента, пропорционального величине тела (весу) и скорости. Декарт, исходя из механистического миропонимания, провозгласил в качестве такой меры количество движения, пропорциональное массе и скорости (без учета направления ее), что является по существу развитием меры Галилея. Гюйгенс, решая другую задачу — об ударе тел, — открыл новую меру сохранения, пропорциональную величине тела (массе) и квадрату скорости. Лейбниц усмотрел принципиальное различие между двумя мерами, но, имея в современных ему условиях объективных оснований для разрешения проблемы двух мер движения, признал в качестве меры сохранения его гюйгенсову меру, которую он назвал живой силой.

Долгое время шел спор о мере движения между сторонниками Декарта и Лейбница. Этот спор был впоследствии рассмотрен и разрешен Энгельсом в статье „Мера движения — работа“.

Накопец, теория относительности установила, что  $\frac{mv^2}{2}$  является мерой кинетической энергии лишь в первом приближении, что на самом деле последняя должна быть представлена в виде ряда, в котором  $\frac{mv^2}{2}$  представляет лишь второй член.

Какие еще меры движения откроет в дальнейшем физика, изучающая структуру ядра, сказать сейчас трудно. Но одно несомненно: любые физические открытия могут и будут лишь обогащать общий закон сохранения и превращения энергии, подтверждая его руководящее значение для физики. Этому, вопреки утверждению Маха, учит объективный ход истории физики.

Отсутствие какого-либо реального физического содержания и смысла в трактовке Маха особенно ярко выступает в проводимой им аналогии закона сохранения (и превращения) энергии с законом Бойля-Марриотта. Конечно, последнему закону можно придать форму постоянства суммы двух членов (суммы логарифмов давления и объема). Но такое сходство по форме отнюдь еще не означает сходства субъективного содержания. В самом деле, под формой сохранения энергии скрыт реальный процесс превращения одного вида энергии в другой, превращения, происходя-

щего эквивалентным образом. Под маховской же формой закона Бойля и Мариотта вовсе не скрывается реального превращения одного какого-либо объекта в другой. Далее, она является лишь приближенным выражением реального процесса в том смысле, что произведение давления на объем остается постоянным лишь при неизменной температуре. При изменении температуры форма постоянства суммы членов, на которую опирается Мах, не сохраняется.

Таким образом, подводя итог анализу взглядов Маха можно прийти к следующему заключению.

Неверно утверждение Маха, что закон сохранения (и превращения) энергии „тегов“, и был, якобы, известен за несколько сот лет до его действительного открытия; Мах мог получить такой вывод, только „освободив“ закон от всякого реального физического содержания.

Неверно, что этот закон является частным законом физики, без которого она может существовать как наука; действительная история физики свидетельствует о том, что трактовка закона сохранения движения соответствует уровню наших физических знаний; но на всех этапах развития физики закон сохранения движения остается ее основным законом.

Неверно, стало быть, что закону сохранения и превращения энергии, этой наиболее развитой форме закона сохранения движения, — не принадлежит руководящая роль при исследовании физических явлений.

Мах не прикрашивал положения, когда после многих жалоб на плохую встречу его идей естествоиспытателями, отметил затем некоторый перелом в гастрономии. Уже в семидесятых годах появились первые предвестники кризиса классических понятий ньютоновской физики. Механический материализм — эта основная струя философии естествознания того времени — в силу своей метафизичности не мог обобщить новых открытий в естествознании. Диалектического материализма естествоиспытатели не знали. В философии же в то время в моде стали различные эклектические системы, часто выступавшие под лозунгом — „Назад к Канту“ — против гегельянства и главным образом против материализма Маркса. Страх буржуазии перед мощным движением пролетариата в его борьбе за диктатуру (Парижская Коммуна 1871 г.), ее ненависть к теоретическому знамени пролетариата — диалектическому

материализму Маркса и Энгельса — создали благоприятную почву к решительному повороту буржуазии в сторону субъективного идеализма. К восьмидесятым годам возникла целая философская школа, пропагандировавшая те же идеи, что и Мах (Авеариус, Пирсон, Карус и др.). Появилась литература, обосновывающая позитивизм в естествознании. Влияние махизма на естествоиспытателей возросло. Сам Планк признавался позднее, что в эти годы он увлекался философией Маха.

К концу восьмидесятих годов в физике образовалось так называемое энергетическое направление. Одновременно с выходом книги Планка вышла книга Гельма „Die Lehre von der Energie, historisch-kritisch entwickelt“, а через несколько лет с развитием энергетических взглядов выступил В. Оствальд.

Энергетики, так же как и махисты, не отрицали справедливости закона сохранения и превращения энергии, а наоборот, пытались опереться на это достижение физики XIX в.

Всю физику и теорию познания они пытались построить, исходя из энергии, как основного понятия. Что мы знаем о природе, о материи, о физическом теле, с точки зрения энергетиков? Только то, что всякое физическое тело оказывает различные действия, т. е. обладает энергией. Свойства твердости тела, его тяжести, упругости и т. д. мы узнаем по тому сопротивлению, которое нужно преодолеть, чтобы встать на место этого тела, т. е. по энергии, которую приходится для этого затрачивать. Энергия является условием воспринимаемости объектов. Только энергия и ничто другое является содержанием нашего опыта. Стоит ли что-либо позади явления, имеет ли энергия носителя, существует ли материальный мир? Согласно взглядам энергетиков материя вовсе не необходима; энергия является единственной реальностью. Таким образом, выражаясь словами Левина, движение стало мыслиться без материи<sup>1</sup>. Все понятия физики должны быть производными от понятия энергии.

Энергетики признавали наличие различных форм энергии и возражали против сведения всех форм к механиче-

<sup>1</sup> См. В. И. Ленин, Сочинения, т. XIII, Материализм и эмпириокритицизм, гл. V, § 3.

ской. Они даже пытались сформулировать условия превращения одной формы в другую в виде законов (закон интенсивности Гельма, максимальный принцип Оствальда). Постановка такой задачи перед физикой была бы правильной. Однако отказ от материи, от изучения ее структуры привел энергетиков к эмпиризму, к описательному методу, который не мог вскрыть сущность процессов превращения энергии и неизбежно приводил к скольжению по поверхности явлений. Энергетики, например, совершенно отрицали существование молекул и атомов, т. е., так же как и Мах, отказались от анализа структуры материи, что вытекало из существа их взглядов. История развития физики доказала не только справедливость молекулярно-атомной теории, но и полную невозможность оставаться на позиции призыва закона сохранения и превращения энергии без призыва этой теории.

Эти противоречия привели к краху энергетизма как направления, претендовавшего на право быть физической теорией. Что касается философской несостоятельности этой идеалистической школы в естествознании, то она блестящим образом вскрыта Лениным еще на пороге современной физики.

Ленин в своем бессмертном труде „Материализм и эмпириокритицизм“ показал, что несмотря на рост идеализма, основные массы естествоиспытателей стихийно стоят на материалистической позиции, что махизм и энергетизм представляют собой лишь небольшие школы в естествознании.

Ленин вскрыл также классовые и гносеологические корни этих школ.

Махизм, появившись в семидесятых годах прошлого века, получил некоторое развитие лишь в начале XX в. Это было время бурного развития физики, ее успехов и, связанной с этими успехами, ломки понятий классической физики. „Великий революционер — радий“, писал А. Пуанкаре в 1905 г. в книге „Ценность науки“, подрывает принцип сохранения энергии. Рушатся и другие принципы. Анализируя этот период развития физики, Пуанкаре характеризовал его как период „всеобщего разгрома принципов“.

В этих условиях ломки старых понятий спасти от идеализма могла только философия диалектического материализма. „...Диалектический материализм, — пишет Ле-

нии, — настаивает на приблизительном, относительном характере всякого научного положения о строении материи и свойствах ее, на отсутствии абсолютных граней в природе, на превращении движущейся материи из одного состояния в другое, повидимому, с нашей точки зрения, непримиримое с ним и т. д.<sup>1</sup>

Однако диалектический материализм остается неизвестным для буржуазных ученых, несмотря на то, что он развит К. Марксом и Ф. Энгельсом за несколько десятков лет до кризиса физики. Времени было достаточно для ознакомления с ним. „Но вся обстановка, в которой живут эти люди, отталкивает их от Маркса и Энгельса, бросает в объятия пошлой казенной философии“<sup>2</sup>. В этом сказывается влияние классовой борьбы, обострившейся в эпоху империализма.

„Новая физика, — пишет Ленин, — свихнулась в идеализм, главным образом, именно потому, что физики не знали диалектики. Они боролись с метафизическим... материализмом, с его односторонней «механичностью», — и при этом выплескивали из ванны вместе с водой и ребенка. Отрицая неизменность известных до тех пор элементов и свойств материи, они скатывались к отрицанию материи, то-есть объективной реальности физического мира. Отрицая абсолютный характер важнейших и основных законов, они скатывались к отрицанию всякой объективной законмерности в природе, к объявлению закона природы простой условностью, «ограничением ожидания», «логической необходимостью» и т. п. Настаивая на приблизительном, относительном характере наших знаний, они скатывались к отрицанию независимого от познания объекта, приблизительно — верно, относительно — правильно отражаемого этим познанием. И т. д., и т. д. без конца“<sup>3</sup>. В отбрасывании физиками объективной реальности вне сознания и заключается, по Ленину, суть кризиса современной физики.

Этот ленинский анализ корней физического идеализма в полной мере применим и сейчас в отношении тех идеалистических штаний, о которых говорилось в первой части статьи.

<sup>1</sup> В. И. Ленин, Сочинения, т. XIII, стр. 214.

<sup>2</sup> Там же, стр. 216.

<sup>3</sup> Там же, стр. 214—215.

Итак, через сорок лет после открытия закона сохранения и превращения энергии вокруг него все еще не стихла борьба. Правда, возможность вновь поднять вопрос о его справедливости идеалисты получили лишь позднее, а именно тогда, когда были открыты новые процессы, о закономерности которых физика еще мало что могла сказать (например, радиоактивность).

В отмечаемый же нами период споры велись вокруг вопросов о том, представляет ли открытый в XIX в. закон что-нибудь новое по сравнению с законами, известными еще в XVIII или даже в XVII вв. Какую роль играет закон в развитии физики, чем отличается его роль и значение от роли и значения других законов? Какова его история и обоснование? Связано ли неизбежно его обоснование с механистическим мировоззрением? Приводит ли он к отождествлению всех форм энергии или нет? Как трактовать эту энергию — как нечто субстанциональное, подобно материи, или нет?

Но всем этим вопросам Планк высказался в своей книге весьма обстоятельно. В мировой физической литературе, среди немногочисленных работ, посвященных закону сохранения и превращения энергии, работа Планка наиболее полно освещает эти вопросы.

Планк в своей книге показывает, что закон сохранения и превращения энергии имеет свою историю, что он лишь постепенно подготовлялся развитием физики, что он завоевал свое место основного закона физики лишь в результате упорной борьбы. Такое изложение становления закона противостоит концепции Маха, который привлекает историю, но только для того, чтобы показать, что закон этот будто бы не нов и что его применяли задолго до XIX в.

В отличие от махистов Планк считает закон сохранения и превращения энергии объективным законом природы и, также в отличие от махистов, весьма высоко оценивает его роль в физике. Он показывает, как закон сохранения и превращения энергии, опирающийся на всю сумму известных нам опытных фактов, вместе с тем становится руководящей нитью в дальнейших исследованиях.

Это имеет важнейшее значение для физики, и Планк формулирует это весьма четко и верно. С момента обоснования закона сохранения энергии, пишет он, „начинается новая эпоха в естествознании. До тех пор всюду, где еще

не удалось, как в механике и астрономии, найти основные законы, управляющие всеми отдельными явлениями, приходилось пользоваться индуктивным методом; с этого времени стали обладать принципом, который, будучи испытан во всех известных областях путем тщательных исследований, являлся отличным руководством и в совершенно неизвестных и неисследованных областях. Прежде всего, уже вся постановка вопроса была направлена по правильному пути, а это уже является одним из важнейших элементов успешного исследования; и, кроме того, на всем протяжении этого пути в руках исследователя был безошибочный контроль, применение которого никогда не изменяло. С тех пор принцип энергии образует солиднейший исходный пункт всех естественно-научных умозрений<sup>1</sup>.

Планк не только декларирует это. Он показывает, как, опираясь на опытные факты, можно с помощью закона сохранения энергии и некоторых принципов, по существу характеризующих условия превращения энергии, вывести основные законы в различных областях физики: в механике, в учении о теплоте, в теории электричества и т. д.

Эта идея стала руководящей для Планка и в его собственных научных исследованиях, так же как и в изложении основ теоретической физики. В качестве примера укажем на изложение им теории электромагнитного поля. В предисловии ко второму изданию „Einführung in die Theorie der Elektrizität und Magnetismus“ он пишет:

„Не может быть никакого сомнения в том, что для изложения имеется калюлицо только единственное твердое и верное исходное положение, именно понятие и принцип энергии. Ведь в конечном счете к понятию об энергии сводятся все электрические и магнитные системы единиц, и на основе принципа сохранения энергии без труда выводятся все законы этой области наук. Это послужило для меня основанием к тому, чтобы выдвинуть на первый план понятия о плотности энергии и о потоке энергии. Эти понятия делают возможным не только исчерпывающее исследование различных систем единиц, но приводят так же и к удобному выводу максвелловых уравнений электро-

<sup>1</sup> См. настоящее издание, стр. 93.



магнитного поля. Из этого возможно вывести все остальное, специализируя подходящим образом условия“<sup>1</sup>.

Но высоко оценивая закон сохранения и превращения энергии, Планк в противоположность энергетикам не только не снимает задачу изучения структуры материи, но, наоборот, выдвигает ее с особой силой.

Таким образом, если Планк и не полемизирует непосредственно с махистами и энергетиками в этой книге, его взгляд на закон сохранения и превращения энергии по существу противопоставляется взглядам этих идеалистических школ<sup>2</sup>.

Лет двадцать спустя Планк резко полемизировал с махизмом, заявляя, что махизм не может быть опорой естествознания, ибо „системе Маха совершенно чужд самый важный признак всякого естественно-научного исследования: стремление найти постоянную, не зависящую от смены времен и народов картину мира“. Как раз история естествознания показывает, говорит Планк, что когда великие творцы точного естествознания — Коперник, Кеплер, Ньютон, Гюйгенс, Фарадей — проводили свои идеи в науку, то эти ученые опирались не на экономическую точку зрения махизма в борьбе против старых традиций, а наоборот, „опорой всей их деятельности была неизбежная уверенность в реальности их картины мира“<sup>3</sup>.

В этой полемике Планк затронул вопрос и о законе сохранения энергии. Защищая точку зрения материализма на существование объективной реальности, „не зависящей ни от какой человеческой и даже ни от какой вообще мыслящей индивидуальности“, он спрашивает: „найдется ли, например, в настоящее время хоть один серьезный физик, который сомневался бы в реальности принципа сохранения энергии? Скорее, наоборот, реальность этого принципа при-

<sup>1</sup> См. М. Планк, Введение в теоретическую физику, часть третья, Электричество и магнетизм, Техтеоретиздат, 1934.

<sup>2</sup> Впрочем он открыто заявил свое несогласие со взглядами положенными Махом в *Die Geschichte und der Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*. См. настоящее издание, стр. 137.

<sup>3</sup> См. статью „Единство физической картины мира“ в сборнике: Планк, Физические очерки. Против махизма см. так же статью Планка: „Теория физического познания Эрнста Маха“ в сборнике: „Философия науки, ч. 1. Физика, вып. 2-й“. Госиздат, 1924.

нимается за первоначальное допущение, которое кладется в основу научного исследования<sup>1</sup>.

Несомненно, что все эти идеи руководили Планком и тогда, когда он писал эту книгу.

Что касается механистического взгляда на закон сохранения и превращения энергии, то свое отрицательное отношение к нему Планк высказывает в книге более подробно, но зато фактическое размежевание в трактовке закона проводит менее последовательно.

Планк утверждает, что общераспространенное среди физиков мнение, будто закон сохранения энергии основан на механистическом воззрении на природу, — неверно. Правда, механистическое воззрение, по утверждению Планка, приводит к этому закону, но последний не связан с этим воззрением неизбежно и не падает вместе с ним, так что механистическое мировоззрение не является необходимым обоснованием закона. Здесь нет взаимной связи: признание закона сохранения энергии не ведет обязательно к механистическому мировоззрению.

Механистическая картина мира, может быть, и желательная для физиков, благодаря ее наглядности и простоте, все же является в лучшем случае не более как гипотезой. Электромагнитные явления, например, говорит Планк, не удастся свести к механике. Тем более это относится к органическим явлениям. Поэтому закон сохранения энергии более обоснован, чем механистическое мировоззрение, к которому хотят его свести.

Планк указывает, далее, на трудности, которые возникают в связи с таким механистическим истолкованием закона. „Гельмгольц, полностью стоя на позиции механического мировоззрения, — говорит Планк, — рассматривает принцип как непосредственное обобщение закона живых сил“. Поэтому всю энергию Гельмгольц разделяет на кинетическую и потенциальную. Задача исследования форм энергии и их взаимосвязи сводится им к отысканию энергии, зависящей только от состояния (положения), и энергии, зависящей от скорости. Но это упрощает физическую задачу, а кроме того, в ряде случаев делает ее решение невозможным. Так, например, уже когда речь идет об электромагнитных явлениях, деление энергии на кинетическую и потенциальную провести нельзя.

---

<sup>1</sup> М. Планк, Единство физической картины мира.

Оценка механистического мировоззрения, данная Планком в этой его ранней работе, не является для него случайной. В 1910 г. он прочитал на съезде немецких естествоиспытателей и врачей специальный доклад на тему: „Новейшая физика и механистическое мировоззрение“. Здесь он высказывал уже не только личные убеждения, а подводил итоги развитию физики конца XIX и начала XX вв., т. е. всем открытиям в области электромагнитных процессов, радиоактивных явлений, квантовой теории, теории относительности. Выводы, сделанные им в этом докладе в отношении механистического мировоззрения, отличаются, быть может, только большей четкостью и определенностью формулировок, но не по существу.

„Порою расцвета механистического мировоззрения, — говорит в этом докладе Планк, — было прошлое столетие. Первый могучий импульс оно получило благодаря открытию принципа сохранения энергии. Нередко его даже отождествляли с этим принципом, в особенности первое время после открытия последнего. Такое недоразумение основано на том, что принцип сохранения энергии может быть легко выведен с точки зрения механистического мировоззрения: ведь если всякая энергия — механической природы, то принцип сохранения энергии представляет собой не что иное, как давно уже известный в механике закон живых сил. В таком случае в природе существуют всегда только два вида энергии — кинетическая и потенциальная, — и при исследовании какого-нибудь определенного вида энергии, например, теплоты, электричества, магнетизма, речь идет только о том, какого она характера, кинетического или потенциального. Такова именно точка зрения, на которую встал Гельмгольц в своем первом, сделавшем эпоху, сочинении о сохранении силы. Прошло некоторое время, пока выяснилось, что закон сохранения энергии ничего не говорит о природе самой энергии. Последнюю точку зрения с самого начала защищал Юлиус Роберт Майер, открывший механический эквивалент теплоты“<sup>1</sup>.

Герц пошел еще дальше Гельмгольца по линии механистического представления природы. Как указывает Планк, Герц „совершенно отрицает различие между потенциальной и кинетической энергией, а вместе с тем и все те проблемы, которые связаны с исследованием отдельных видов энергии.

---

<sup>1</sup> М. Планк, Физические очерки, стр. 36.

По Герцу, существует не только единственный вид материи — материальная точка, — но и единственный вид энергии — кинетическая энергия“. Потенциальную энергию Герц пытался свести к кинетической, считая, что первая отличается от последней только благодаря неизменным связям, которые существуют между положением материальной точки и ее скоростью.

Планк правильно замечает, что механистическое понимание по существу снимает проблему исследования отдельных видов энергии. В этом заключается отрицательное влияние механицизма на развитие физики, а это последнее, как констатирует Планк, „пошло за это время по совершенно другим путям, которые далеко разошлись не только с тем путем, на который встал Герц, но и вообще с механистическим мировоззрением“.

Следует отметить, что Планк не только критикует механистическое мировоззрение. Он видит и положительные заслуги его в истории физики (борьба против витализма, против теории невесомых и т. д.).

Планк не был согласен и с гельмгольцевой трактовкой взаимодействия, тесно связанной с его пониманием энергии. Эта трактовка допускает мгновенную передачу энергии через пустоту, т. е. действие на расстоянии. Это — старая ньютоновская позиция, которую Гельмгольц сохранил в физике даже после открытия закона сохранения энергии. Планк не мирится с дальностью действия, полагая, что состояние в каждой части материи определяется состоянием в смежных с ней частях. Это представление близкодействия делает ясным и представление об энергии. В случае близкодействия всегда можно сказать, где находится энергия (в какой части пространства), и тогда к энергии применим принцип суперпозиции энергии по пространству. В случае же дальности действия, вопрос о том, где находится потенциальная энергия, бессмыслен, ибо она является функцией не одного только тела, но зависит от взаимного положения тел друг относительно друга.

В качестве доводов в пользу близкодействия Планк приводит ссылку на простоту представления энергии, которая в этом случае становится аналогичной материи, а также проводит небезынтересную аналогию между дальностью действия и близкодействием в пространстве и дальностью действия и близкодействием во времени.

Таким образом рассмотрение плапковской трактовки закона сохранения и превращения энергии приводит к выводу, что он в общем разобрался во всех тенденциях, существовавших в физике в конце XIX в.

Положительная сторона книги М. Планка заключается, следовательно, в том, что она правильно показывает место закона сохранения и превращения энергии в физике, — его всеобщность и необходимость, его руководящую роль при исследовании процессов природы.

Мы видели, что он в своей оценке физики нового периода высказался против идеалистической трактовки ее основных законов, за материализм, отвергая одновременно претензии материализма одностороннего, механистического.

Означает ли это, что Планк — последовательный материалист, что он сумел подняться до диалектического материализма, до оценки закона сохранения и превращения энергии, данной Энгельсом? Нет, это отнюдь не означает. Если он и видел неудовлетворительность тенденций, существовавших в физике конца XIX в., то в обосновании своей положительной позиции он непоследователен.

Проиллюстрируем это рядом примеров, начиная с вопросов исторических и кончая вопросами трактовки закона сохранения и превращения энергии.

Изложение истории этого закона у Планка страдает существенными недостатками. Прежде всего, в его книге даже история закона самого по себе. В ней нет анализа роли техники в развитии закона сохранения и превращения энергии, равно как не указана и роль философии. Наконец, слабо и недостаточно показано значение новых открытий в самой физике для развития закона.

В самом деле, чем объяснить, что закон был открыт только в 40-х годах прошлого столетия? Планк сам ставит этот вопрос. Что работа не может быть получена из ничего — это было известно давно, указывает он, но что работа не может также и теряться в ничто — это стало известно сравнительно поздно. Чем же это объяснить? По мнению Планка, этот факт объясняется тем, что человека больше интересовал вопрос о получении работы, чем вопрос о ее потере. Несостоятельность такого объяснения очевидна, ибо оно было бы верно для любого периода.

На самом же деле история закона самого по себе ответить на этот вопрос не может. Ответ дает лишь история техники и науки (в частности, и философии). Нужно было открытие и внедрение в промышленность паровой машины, чтобы проблема превращения энергии стала актуальной в физике. Нужен был коренной перелом в истории естествознания и философии, крушение старых метафизических идей о неизменности вселенной, земли, о независимости отдельных „начал“ (т. е. по существу форм движений) друг от друга, чтобы поставить перед физиками вопрос о несостоятельности господствовавших тогда учений о „субстанциях“. Потребовалась, наконец, огромная экспериментальная и теоретическая работа по установлению конкретных связей между различными областями физических явлений, между теплотой, электричеством, светом, механическим движением и т. д., прежде чем был открыт закон сохранения и превращения энергии. Отказываясь от анализа роли техники, от анализа развития всей физики в целом, а также от анализа смежных естественных наук (космогонии, геологии и т. д.) и философии в подготовке открытия закона, Планк, по существу, дает неполную и одностороннюю картину этого приготовления.

Даже в чисто физической области Планк дает изображение предыстории закона с несколько смещенным фокусом. Он считает, что важнейшие подготовительные работы сводятся к опытам Румфорда и Дэви, направленным против „материальной“ теории теплоты, и к работам Карно и Клапейрона, впервые применивших принцип невозможности *perpetuum mobile* к немеханическим явлениям. К этому он добавляет формулировку Гесса о независимости результатов химического процесса от хода реакций и отдельные высказывания выдающихся физиков того времени (Юнг, Роже и др.). Но эти факты в лучшем случае показывают, как могло возникнуть представление о невозможности физического *perpetuum mobile*, но не объясняют, как возникло понятие о превращении форм энергии. А между тем такое понятие о взаимосвязи и превращении форм энергии было подготовлено исследованиями Френеля, Ампера и ряда других физиков, о которых Планк даже не упоминает.

Особенное недоумение вызывает то ничтожно малое внимание, которое Планк уделил Фарадею, этому величайшему ученому-материалисту XIX в. Правда, Планк

приводит возражение Фарадея против контактной теории электричества, из которого видно, что Фарадей считал невозможным сотворение силы без соответствующего истощения того, что питает ее,— что причина равна действию, иначе было бы возможно создание *perpetuum mobile*. Но Планк ничего не говорит ни о том, как Фарадей дошел до таких выводов, ни о том, что практически сделал Фарадей для торжества тех идей, которые позднее были сформулированы в виде закона сохранения и превращения энергии. Между тем именно Фарадей сделал для этого закона очень много, хотя и не формулировал его в виде специального закона.

Итак, основные погрешности исторического порядка заключаются у Планка в том, что он игнорирует роль техники в развитии закона сохранения и превращения энергии, проходит мимо борьбы направлений в физике по поводу неразрушимости движения, не анализирует роли других естественных наук в подготовке закона, да и в истории самой физики не отмечает ряда важнейших открытий.

Что касается до трактовки самого закона, то нужно сразу же сказать, что Планк не преодолел целиком той ограниченности в его трактовке, которая свойственна механицизму. Этому можно привести много доказательств. Внимательное рассмотрение тех логических определений энергии, которые дает Планк, показывает, что все они в конечном счете сводятся к вопросу о подсчете количества энергии; основная забота уделена вопросу об однозначном определении ее величины. Слов нет,— вопрос этот весьма важный. Однако сведение всей проблемы определения энергии только к вопросу о подсчете количества энергии суживает самую проблему и не продвигает Планка ни на шаг вперед от ограниченного взгляда на энергию, который он сам же критикует.

С точки зрения Планка лучше всего было бы определить энергию, как „запас“ работы, как некоторую субстанцию, аналогичную материи. При такой трактовке можно было бы применить к вычислению энергии те же методы, что и к материи, например, можно было бы применить к энергии принцип суперпозиции по пространству, иначе говоря, можно было бы считать, что энергия всего данного объема представляет собой сумму энергий его составных частей. В этом случае трудности, связанные с понятием потенциальной энергии, исчезли бы совсем, что и подкупает Планка в пользу

близодействия и против дальнего действия. Но с „субстанциональной трактовкой энергии, — по мнению Планка, — связана не только большая степень наглядности, но и прямой прогресс в познании. Этот прогресс основан на побуждении к дальнейшему физическому исследованию“. А именно Планк думает, что только эта трактовка (в отличие от механистической) заставит физиков не только вычислять величину энергии, но и исследовать различные виды ее и условия их взаимопревращений, аналогично тому, как это имеет место в отношении вещества.

Однако Планк не отмечает, что такой взгляд на энергию у некоторых физиков связан с отрывом энергии от материи; энергия получает как бы самостоятельное существование и даже противопоставляется материи.

О существовании таких взглядов еще и теперь говорит наличие в физической литературе неправильных по существу формулировок, будто энергия превращается в материю и наоборот. Энергия и материя, согласно этой формулировке, существуют как бы рядом друг с другом, при известных условиях они переходят друг в друга. На самом же деле существует лишь одна субстанция — движущаяся материя. Так называемая „лучистая энергия“, в которую якобы превращается материя, есть не что иное, как материя, но в другой форме движения, отличной от той, которая была до превращения. Превращается не „энергия в материю и наоборот“, а одна форма движения материи в другую форму ее движения<sup>1</sup>.

Правда, Планк не считает „субстанциональную“ трактовку энергии истиной в последней инстанции, но все же никакой более глубокой трактовки ее он не дает, равно как и не подмечает опасности, которую таит эта субстанциональная трактовка — опасности поставить энергию рядом с материей.

Вот почему было бы неверным утверждение, что, критикуя махизм и механицизм, Планк поднялся в трактовке

---

<sup>1</sup> Когда говорят о превращении материи в энергию и наоборот, этим выражается только та рациональная мысль, что изменение структуры вещества, при котором изменяется его масса, высвобождает (или связывает) эквивалентное количество энергии; таким образом мерой энергии тела, в том числе и внутренней, является его масса, которую иногда неправильно отождествляют с материей.



энергии до уровня Энгельса. Что это далеко не так, можно проследить, анализируя не только определение энергии, даваемое Планком, но и его трактовку связи закона сохранения и превращения энергии с так называемым вторым законом термодинамики.

Планк, следуя установившейся в физике традиции, утверждает, что первый закон говорит лишь о сохранении энергии в процессах, но не говорит об их направлении, тогда как второй закон отражает именно направленность процессов. Оба закона независимы друг от друга. Поэтому Планк считает, что второй закон представляет самостоятельную область исследования и не укладывается в рамки его работы.

Несомненно, что второй закон (или начало) термодинамики непосредственно не вытекает из обычной формулировки закона сохранения энергии. Но логический анализ закона сохранения энергии нельзя полностью отрывать от изложения второго закона термодинамики, ибо последний характеризует процесс превращения энергии, и при решении ряда конкретных задач о превращении энергии из одной формы в другую без него не обойтись. Между тем, Планк, излагая в этой книге принцип суперпозиции, также характеризующий процесс превращения энергии, совершенно отказывается от анализа второго закона термодинамики. В частности, Планк не показывает, что неправильные выводы из второго закона термодинамики, — о так называемой „тепловой смерти“ мира, — сделанные некоторыми физиками во второй половине прошлого века, по существу противоречат закону сохранения и превращения энергии.

Обойти этот вопрос было тем более непростительным, что в свое время он был очень „модным“. Физикам-материалистам пришлось очень много потрудиться, чтобы ослабить то ошеломляющее впечатление, которое произвел этот пессимистический вывод о будущем мира, — вывод из непреложных, казалось бы, законов природы.

Между тем, глубоко осознав закон сохранения и превращения энергии с его качественной стороны, Энгельс показал, что вывод о тепловой смерти мира противоречит этому закону, что он является аргументом против такого вывода.

„Как бы ни толковать второе положение Клаузиуса и т. д., — пишет Энгельс, — но, согласно ему, энергия теряется, если не количественно, то качественно. Энтропия не может уничтожаться естественным путем, но зато может создаваться. Мировые часы сначала должны быть заведены, затем начинается их движение, пока часы не придут в равновесие, из которого вывести их может только чудо. Потраченная на завод часов энергия исчезла, но крайней мере в качественном отношении, и может быть восстановлена только путем толчка извне. Следовательно толчок извне был необходим также и в начале, следовательно количество имеющегося во вселенной движения, или энергии, не всегда одинаково, следовательно энергию можно создать искусственно, следовательно она создаваема, следовательно она уничтожаема. Ad absurdum!<sup>1</sup>“

Значит допущение, что хотя общее количество энергии в мире и остается неизменным, но она вся превратилась в тепловую форму, рассеялась по вселенной и потеряла способность к новым превращениям, — это допущение равносильно, по Энгельсу, допущению потери энергии в качественном смысле, это вновь приводит к необходимости первоначального толчка, это противоречит закону сохранения и превращения энергии. Превращения формы движения материи являются ее неотъемлемым свойством. Нельзя утверждать, что главное в законе сохранения и превращения энергии — сохранение, а превращение считать побочным, сопутствующим моментом, который может быть, а может и не быть. Обсуждая вопрос о том, что же будет с мертвым телом нашей солнечной системы, превратится ли оно снова в сырой материал для новых солнечных систем, Энгельс писал: „Но здесь мы вынуждены (допустить чудо) либо обратиться к помощи творца, либо сделать тот вывод, (что случившееся однажды может снова произойти), что раскаленный сырой материал для солнечной системы нашего мирового острова возник естественным путем, путем превращений движения, которые присущи от природы движущейся материи и условия которых должны, следовательно, быть снова произведены материей, хотя бы после миллиардов лет, более или менее случайным образом, но с необходи-

<sup>1</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс, Сочинения, т. XIV, стр. 440.

мостью, присущей и случаю“<sup>1</sup>. И вновь Энгельс приходит к выводу, что теория тепловой смерти мира, теория, допускающая наличие сохраненной по количеству, но неспособной к качественным превращениям, энергии (теплоты, рассеянной по всему миру), противоречит закону неразрушимости движения:

„Что происходит со всем этим огромным количеством теплоты? Погибает ли она навсегда в попытке согреть мировое пространство, перестает ли она практически существовать, сохраняясь лишь теоретически в том факте, что мировое пространство нагрелось на долю градуса, выражаемую десятью или более нулями? Это предположение означает отрицание учения о неразрушимости движения; оно открывает открытой дверь для гипотезы, что путем последовательного падения друг на друга звезд все существующее механическое движение превратится в теплоту, которая будет излучена в мировое пространство, благодаря чему, несмотря на всю «неразрушимость силы», прекратится вообще всякое движение. Мы приходим, таким образом, к выводу, что излучаемая в мировое пространство теплота должна иметь возможность каким-то путем — путем, установить который предстоит в будущем естествознанию, — превратиться в другую форму движения, в которой она может снова накопиться и начать функционировать. А в таком случае отпадает и главная трудность, мешавшая обратному превращению умерших солнц в раскаленную туманность“<sup>2</sup>.

Энгельс указывает, что пути возгорания новых солнечных систем предстоит установить естествознанию в будущем. Теперь уже физически ясно, что при решении этой проблемы существенное значение будет иметь исследование внутриатомных процессов, в частности, исследование происхождения космических лучей.

Суть вопроса в данном случае не в том, каковы конкретные физические пути решения этой проблемы. Суть вопроса в том, что, не имея в руках физического решения, но зная действительное значение закона сохранения и превращения энергии, можно указать необходимость существования

---

<sup>1</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс, Сочинения, т. XIV, стр. 490, статья „Старое введение к Диалектике природы“. Весь конец этой статьи представляет собой замечательное развертывание той же мысли.

<sup>2</sup> Там же, стр. 491.

физического решения проблемы. И это заключение будет не выражением веры в то, что нежелательный трагический ковец мира все же не наступит, а прямым выводом из уже известного абсолютного закона природы. Этим оружием в борьбе против теории о тепловой смерти мира физики-механисты, к сожалению, не пользовались. Не пользовались потому, что не понимали самого закона сохранения и превращения энергии, и механистически, лишь с количественной стороны, трактовали его.

Мы считаем поэтому, что и планковский взгляд на второй закон термодинамики, как абсолютно независимый и лежащий вне его поля зрения закон, — является взглядом неправильным. Он доказывает лишь, что, хотя Планк и выступал против механистической трактовки закона сохранения энергии и отмечал его существенную роль в физике, все же он не понял всей его глубины и не поднялся в его трактовке до Энгельса<sup>1</sup>.

Таким образом ни история закона сохранения и превращения энергии в изложении Планка, ни толкование самого закона ни в коей мере не могут быть выданы за последнее слово науки, за диалектико-материалистическую концепцию развития и сущности этого закона.

На примере этой работы Планка только лишь раз подтверждаются неоднократные высказывания Энгельса и Ленина о том, что одна лишь стихийная позиция в борьбе за материализм в естествознании недостаточна; стихийная позиция чревата несовершенством, непоследовательностью и часто даже уступками идеализму.

Тем не менее в условиях идеалистической борьбы против закона сохранения и превращения энергии и той путаницы в понимании сущности этого закона и его роли в физике, которая существует у некоторых физиков, — в этих условиях книга Планка, несмотря на ее несовершенство, принесет свою пользу. В борьбе с идеализмом в физике необходимо использовать лучшие антиидеалистические работы крупнейших физиков.

К сожалению, Планк, — у которого и раньше встречались

---

<sup>1</sup> Такой же вывод можно было бы сделать, рассмотрев вопрос о том, какую роль в физике отводит Планк так называемому принципу суперпозиции и как он определяет соотношение этого принципа с законом сохранения и превращения энергии. В этой статье нет возможности углубляться в этот вопрос.

идеалистические высказывания (например, о свободе воли),— в последнее время под влиянием роста идеалистических настроений на Западе эволюционирует от материализма в сторону идеализма и открытой поповщины.

Печатаемая работа Планка, написанная им в лучшую пору его деятельности, является неплохим оружием и против некоторых нынешних высказываний ее автора.

Январь 1938.

МАКС ПЛАНК

**ПРИНЦИП СОХРАНЕНИЯ  
ЭНЕРГИИ**



## ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Поводом к возникновению настоящей работы явился конкурс на лучшее сочинение, проведенный Геттингенским философским факультетом в 1887 г. на премию Бенке. Задача, поставленная в 1884 г., гласила следующее: „Со времени Томаса Юнга (Lectures on Natural Philosophy, Lecture VIII, London 1807) многие физики приписывают телам энергию, а со времени Вильяма Томсона (Philosophical Magazine and Journal of Science, IV Series, p. 523, London 1855), принцип сохранения энергии часто объявляется справедливым для всех тел, причем под ним, повидимому, понимают принцип, уже ранее высказанный Гельмгольцем под названием принципа сохранения силы.

Прежде всего требуется точное историческое изложение значения и применения слова энергия в физике; затем необходимо основательное физическое исследование — отличаются ли друг от друга различные виды энергии и как каждый из этих видов энергии определить; и наконец, каким образом принцип сохранения энергии может быть установлен и доказан как всеобщий закон природы“.

Ход идей, который мной руководил в обработке этой задачи, а также и цель, которая маячила перед моими глазами, могут быть яснее всего изложены, если я приведу здесь наиболее существенные из тех замечаний, которыми я сопровождал свою работу при представлении ее жюри конкурса.

„... Прежде всего я позволю себе предпослать несколько вводных замечаний о плане и выполнении работы. Давно уже питая особый интерес к учению об энергии, я пришел к мысли обстоятельно разработать это учение в связи с поставленной конкурсной темой, тем более что я лично часто чувствовал необходимость в сочинении, которое,



будучи в первую очередь рассчитано на физиков-специалистов, объединило бы с единой точки зрения многообразные формы и применения понятия энергии, изложенные самым различным образом в сочинениях различных авторов. Ибо как много вы писали и вы говорили за последние сорок лет об учении о энергии, тем не менее все относящиеся к этому вопросу работы — начиная от сочинения Ю. Р. Майера и кончая более объемистыми сочинениями А. Секки, Г. Кребса, Бальфура Стюарта и др., за единственным исключением работы Гельмгольца о сохранении силы в 1847 г., — поскольку они рассматривают общее понятие энергии, а не одни только его специальные применения (как например к учению о теплоте), рассчитаны в первую очередь на широкий круг читателей.

„Стало быть, в физике существует практическая потребность, которую я рассчитываю удовлетворить этим сочинением; я надеюсь, что такая трактовка моей работы не слишком удаляется от сути поставленной курсом задачи и что она может ей удовлетворить. Указанное здесь ограничение оказалось впрочем весьма важным также, исходя из особенностей материала, подлежащего изучению, ибо последний в процессе работы разросся до таких размеров, что без охвата всего материала с единой точки зрения я боялся нарушить единство изложения, к которому я преимущественно стремился. Так, прежде всего я просто прошел мимо всех философских спекуляций, выходящих за пределы чисто физической области, которые часто тесно связывались с понятием энергии; далее, главный упор в исследовании я всегда делал на принципе сохранения энергии, соответственно физическому способу рассмотрения задачи, выраженному мною в выборе названия этой книги, между тем как понятие энергии лишь постольку подверглось тщательному рассмотрению, поскольку оно может быть приведено в связь с принципом; при этом я исходил из той мысли, что понятие энергии приобретает свое значение для физики лишь благодаря принципу, который его содержит. С другой стороны, учитывая, что следы существования понятия энергии уходят гораздо дальше в прошлое, чем употребление слова, мне казалось необходимым, по крайней мере вкратце, изложить историческое развитие понятия еще до того времени, когда Томас Юнг дал ему название.

„В остальном, естественно, я стремился возможно теснее

связать изложение с буквальной постановкой задания; в частности, я разбил книгу на три главные отдела: историческое развитие, различные виды энергии, формулировка и доказательство принципа сохранения энергии. Правда, следуя побуждениям, которые отчасти возникли в процессе работы, я позволил себе переставить отделы, а именно я предпослал отдел, указанный в задании на третьем месте, второму отделу.

„С одной стороны, эта перемена порядка казалась мне слишком несущественной, чтобы толкать на серьезное раздумье, а с другой стороны, я полагал, что, максимально облегчая обзорение всей работы, я в гораздо большей степени удовлетворю запросам конкурса, чем если бы, слишком строго следуя букве, я нарушил живую связь, которая возникла в моем восприятии.

„Согласно уже изложенному мною взгляду центр тяжести всей работы лежит во втором и третьем разделе; тем не менее я посвятил много труда и заботы и первому отделу; а именно я полагаю, что полностью исчерпал число фактов, сколько-нибудь стоящих внимания. Точно так же я считаю возможным поручиться за точность всех цитат и ссылок, которые были тщательно проконтролированы, поскольку мне были доступны рассмотренные работы.

„Уже давно известно, что почти каждое сколько-нибудь значительное научное открытие делается не один раз, а многими различными исследователями независимо друг от друга.

„И столь же часто случается, что, как только открытие в какой-либо мере добывается признания, немедленно появляется целый ряд соискателей, претендующих на славу приоритета. Эти вопросы, как известно, именно по отношению к принципу сохранения энергии вентилировались живейшим образом и приводили, к сожалению, к чрезмерным нападкам на лиц, стоящих в первом ряду в деле разработки физических наук; эти вопросы затронуты в данном сочинении лишь постольку, поскольку этого требовало, с моей точки зрения, объективное исследование исторического развития принципа. В подобных делах я могу считать себя судьей тем менее, что живы еще многие лица, которые в состоянии своим персональным свидетельством высказать более компетентные суждения. Все же я позволю себе сделать краткое общее замечание. Несомненно, тот,

кто впервые высказал значительную мысль, имеет прочную заслугу; но все же необходимо затем всегда рассмотреть, полностью ли он осознал значение этой мысли и сумел ли он при помощи своей идеи начать какое-либо дело и завершить его. Если поставить это условие при решении споров о приоритете, то число конкурентов, несомненно, придется значительно уменьшить. Теперь стало почти модой искать в сочинениях более старых физиков и философов высказывания, которые напоминали бы принцип сохранения энергии или механическую теорию теплоты; многое в этом направлении уже найдено и, без сомнения, при дальнейших поисках найдется еще больше. Но как важно установление того факта, что известные идеи еще задолго до того, как они стали зрелым плодом человеческой мысли и общим достоянием, возникли в головах отдельных выдающихся ученых, — все же не следует односторонне приписывать заслугу открытия тем, которые, быть может, не имели никакого представления о способности к развитию зародыша, скрывавшегося в случайной высказанной ими мысли.

„Поэтому, если речь идет о том, чтобы уяснить значение физического закона для исследования действительности, то прежде всего необходимо сравнить содержание закона с фактами, с полной достоверностью установленными на опыте. Чем глубже и более всеобъемлюще то значение, которое придают исследуемому закону, тем более необходимо опираться на непосредственные результаты наблюдения, которые только и образуют единственно допустимый исходный пункт любой науки о природе. Это в чрезвычайной степени относится к принципу сохранения энергии, закону столь универсальному и глубоко проникающему во все естественно-научные теории, что его следует чрезвычайно заботливо очистить от всех гипотетических представлений, которые так склонны образовываться для более легкого обозрения закономерной связи многообразных явлений природы. Ибо если принимают какие-либо сомнительные предположения, если включают в исследование недоказанную гипотезу, то затем уже проверяют не самый принцип, но одновременно и эту гипотезу, и какие-либо расхождения между теорией и опытом можно тогда отнести не только за счет принципа, но с таким же успехом и за счет гипотезы.

„Исходя из этого соображения, я всегда стремился обратить главное внимание на то, чтобы построить понятие и принцип энергии прежде всего на чисто опытных фактах, по возможности избегая каких-либо гипотез, в том числе и различных молекулярных гипотез, хотя некоторые из них завоевали себе в последнее время заметное место в науке. Точно так же я выключил принципиально из исследования и принцип Карно-Клаузиуса, так называемое второе начало механической теории теплоты с его следствиями, ибо он лишь развивался из принципа энергии; этот принцип привносит в закон сохранения энергии совершенно новый элемент: условия превращения различных видов энергии друг в друга<sup>1</sup>. Я рассчитываю сделать его предметом отдельной работы.

„Лишь после того как основа, на которой покоится учение об энергии, прочно фундирована, можно начать перенесение этого учения на более отдаленные области исследования; но тогда принцип уже больше не исследуется сам по себе, а наоборот, служит направляющей нитью для проверки других гипотез. В этом отношении я пошел настолько далеко, насколько мне позволило находившееся в моем распоряжении время; я, конечно, не думал дать полный обзор всех отдельных применений принципа, но все же я полагаю, что внес нечто новое, если не в количество внешних фактов, то по крайней мере в способ их рассмотрения.

„Наконец, я чувствую себя обязанным высказать искреннюю благодарность почтенному Факультету за многосторонние научные импульсы и за то покровительство, которое способствовало разработке столь богатой и прекрасной задачи“.

---

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* Необходимость тщательного разделения обонх начал теории теплоты теперь стала еще большей, чем в то время, ибо и сейчас еще случается, например, что два столь различные по существу процесса, как переход теплоты от тела с высшей температурой к телу с низшей температурой, и опускание тяжелой жидкости от высшего уровня к низшему, в такой степени смешиваются, что считают возможным свести их к одному единственному закону, ко „второму вачалу энергетики“. На самом деле лишь второй из указанных процессов можно вывести из принципа энергии (см. ниже стр. 164), между тем, как первый может быть объяснен лишь на основе рассмотрения вероятностей (ср. стр. 64).

Кроме моей работы поступили еще две другие, которые не были премированы. Суждение Факультета о моей работе дословно гласит следующее:

„В первом разделе автор связывает развитие понятия энергии с подробной историей принципа эквивалентности (механической теории теплоты); это изложение является лучшим свидетельством обстоятельного знакомства автора с источниками и его здравого и самостоятельного суждения. С большой ясностью и точнейшим знанием предмета излагаются сделавшие эпоху творения, которые подготовили и обосновали принцип; непрерывность развития соблюдается благодаря покоящемуся на тонком научном чутье разбору промежуточных ступеней. Но то, что столь же подробное изложение посвящено постепенному распространению принципа, его применению к различным областям физики, оказалось для работы не столь удачным. В этой части автору не везде удалось устранив впечатление утомительного повторения, и здесь особенно чувствуется ограничение, которое он наложил на свободу своего изложения, став на чисто историческую точку зрения. Для экономии целого было бы лучше часть разработанного здесь материала перенести во второй или третий раздел, с другой стороны, можно было бы еще кое-что рассмотреть, если бы автор не так строго связал свое изложение с 1860 г., как границей исторического развития. Односторонняя физическая точка зрения, вполне сознательно занятая автором, приводит к тому, что участие, которое приняла техника в развитии понятия энергии, лишь бегло обрисовано, а философский круг идей совсем не рассмотрен. Факультету была бы желательна большая полнота изложения и более обстоятельная оценка этих влияний.

„С большим интересом Факультет ознакомился со вторым разделом сочинения; здесь вполне проявляются методичность мышления, основательность физико-математического образования автора и обоснованность его суждений. Любви, с которой автор углубился в предмет своего исследования, соответствует заботливость, с которой он ее разработал по всем направлениям. Факультет с живым удовлетворением констатирует, что если отвлечься от некоторых по существу незначительных неточностей, вопрос о формулировке и доказательстве принципа энергии нашел в этой части сочинения прекрасное и полное решение.

„Не столь неограниченно признание, с которым Факультет относится к третьей части работы. Факультет сожалеет, что ограниченность времени не позволила автору придать своему изложению различных видов энергии желательную полноту и равномерность. Сколь ни притягательны суждения автора, как они ни поучительны, все же Факультет желал бы иметь более полное исследование вопроса — сколько видов энергии следует различать и как каждый из этих видов можно определить. Вместо этого автор ограничился детальным рассмотрением, как пользоваться в различных областях физики принципом энергии в качестве надежного и единого фундамента изложения. Удачное рассмотрение механики с этой точки зрения имело бы большое значение, если бы он подверг более обстоятельной критике пределы введенного им принципа суперпозиции различных энергий. Точно так же, по мнению Факультета, более обстоятельное исследование отражения и преломления света ни в коей мере не вышло бы за рамки задания. Как трактовка оптики, так и рассмотрение термической и химической энергии кажется несколько скудным, в особенности автор опустил критическое рассмотрение тех экспериментальных исследований, на которых покоится ваше знание о численном значении механического эквивалента теплоты. Разработка вопроса об электрической и магнитной энергии в достаточной мере свидетельствует о широких и основательных познаниях, которыми обладает в этой области автор, но все же его рассуждения в отдельных случаях лишены той ясности, последовательности и связности, которые сделали изучение его сочинения столь приятной задачей. Наконец, Факультет не может согласиться с замечаниями, которые автор уделяет закону Вебера; он считал бы необходимым обстоятельное исследование круга идей Вебера.

„Автору будет не трудно дополнить свое исследование в указанных пунктах до его опубликования. В надежде на это и с полным признанием проделанного им Факультет присуждает этой работе вторую премию“.

Если я, несмотря на высказанное Факультетом пожелание, тем не менее решил предать эту работу гласности в основном без изменения, то это мною было сделано не без серьезного раздумья и зрелого размышления, ибо мне было важно придать уже в известной степени законченной

работе ту закругленность и полноту, которая была признана желательной столь высокой стороною. Тем не менее как раз это соображение и повергло меня в серьезное сомнение, удастся ли мне вообще осуществить высказанную Факультетом надежду. Именно это касается возможной переработки третьего раздела, и в особенности главы об электрической энергии, в смысле замечаний, содержащихся в суждении Факультета. Само собой разумеется, я далек от желания умалить то высокое значение хода идей Вебера, которое они приобрели за последнее десятилетие, в особенности в Германии; каждому физик-у видно то мощное развитие и замечательное расширение наших взглядов во всей области электричества и за ее пределами, которым мы обязаны работам гениального исследователя. Но столь же мало я могу удержаться от открытого признания, — ибо считаю сделать это своим долгом, — что в результате тщательного изучения и зрелого размышления я пришел к твердому убеждению, что более спекулятивное и дедуктивное развивающееся направление, по которому пошел Вебер, уже принесло свои наиболее ценные плоды и что, следовательно, в будущем от него нельзя больше в такой же мере ожидать дальнейшего существенного успеха. С моей точки зрения такой успех в ближайшее время возможен лишь на основе тесной связи с индуктивным методом, и эту точку зрения я выразил в изложении электрических явлений, ограничиваясь в основном исследованием постоянных замкнутых токов, законы которых в достаточной мере установлены опытом и которые можно вывести также и без общего закона Вебера; напротив, ту область, в которой этот закон приобретает настоящее свое значение, — а именно действия незамкнутых токов, или движущихся электрических материальных точек, — я постарался либо совершенно опустить, либо же только вскользь затронуть. С целью достижения большей наглядности мира явлений каждый физик избирает по своему собственному вкусу свою основную концепцию, возможно более соответствующую наблюдаемым законам природы. Поэтому и я могу охотно признать, что в настоящее время причисляю себя к сторонникам той теории, которая вообще отказывается от принятия непосредственного дальнего действия и тем самым от мысли о первоначальном существовании электрического основного закона, вроде закона Вебера. Правда, решение этого

вопроса должно быть предоставлено будущему, но для меня здесь важно то обстоятельство, что при возможной попытке переработки в намеченном смысле я, во всяком случае, не занялся бы этим делом с таким же удовольствием, как в первый раз, а это является необходимым условием, если бы я пожелал оправдать весьма лестные для меня ожидания Факультета. Если к этой неуверенности в успехе прибавить еще ту затрату времени, которая именно теперь, когда я занялся другими исследованиями, вдвойне дала бы себя чувствовать, а также если учесть связанное с этим замедление в появлении сочинения, законченного уже почти год тому назад, — то я надеюсь, что мое решение, ограничившись некоторыми редакционными изменениями, опубликовать работу в остальном все же в той форме, как ее находит ранее сообщенное суждение Факультета, — что это решение найдет извинение также у почтенного Факультета, что для меня в высшей степени важно.

АВТОР

Киль, июль 1887.

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За те двадцать лет, которые протекли с появления первого издания этой книги, в физике произошел ряд переворотов в самых различных направлениях, беспримерных по скорости своего следования друг за другом и по своему значению: начиная от великих открытий Герца, сделанных в 1888 г., вплоть до развития до сих пор еще необозримой области радиоактивности. Но каждое новое открытие и каждое новое понятие всегда вновь приводили к установлению и закреплению центрального положения за принципом сохранения энергии. Отдельные сомнения и колебания по вопросу о всеобщей справедливости принципа энергии, возбуждавшиеся то здесь, то там некоторыми определенными фактами, как например постоянной отдачей теплоты радиоактивными субстанциями, легко оказывались недоразумениями, и, насколько я знаю, никогда не была сделана даже попытка построить физическую теорию, в фундаменте которой принцип сохранения энергии не нашел бы места.

Это важное обстоятельство дало мне возможность ограничить предпринятые в новом издании улучшения некото-



рыми мелкими изменениями и добавлениями. Сначала я также поставил перед собой вопрос о более глубокой разработке и переработке всего материала и зрело взвесил его, именно учитывая то, что как отдельные применения принципа энергии, так и общий энергетический способ мышления за два последних десятилетия сделали заметные успехи во всех областях физики; эти успехи особенно значительны в электродинамике, слабее — в термодинамике, где оплодотворяющее действие в гораздо более сильной степени исключено из рассмотрения. Кроме того, при новой переработке я одновременно нашел бы случай по возможности удовлетворить пожеланиям, высказанным в вышеприведенном суждении Геттингенского философского факультета. Но при этом размышлении для меня были решающими опять те же сомнения, которые я уже выразил в заключении предисловия к первому изданию и которые на этот раз выступали в еще более сильной мере. Выполнение этого плана необходимо привело бы к изменению характера книги, которая уже однажды обязана своим появлением внешнему импульсу; а это мне казалось неужным и неправильным. Впрочем то, что я никогда не стремился в этой книге к исчерпывающему изложению всех отдельных применений принципа энергии, отчетливо отмечено уже в предисловии к первому изданию.

Исходя из приведенных оснований, я ограничился заботливым пересмотром текста, а также отдельными изменениями в обозначениях и лишь посредством отдельных особо отмеченных замечаний позаботился о том, чтобы содержание всех изложенных положений было в согласии с результатами новейших исследований. Непосредственно в тексте я изменил только одно единственное положение (и его следствия) (стр. 207): это — прежде мною сделанное допущение, что теплота Пельтье на месте спая двух металлов является непосредственной мерой разности потенциалов металлов, так как я за это время (Wied. Ann. 36, p. 629, 1889) пришел к выводу, что это невозможно осуществить.

В общем я надеюсь, что и самый современный физик при чтении этой книги не встретит никаких ошибок, за исключением может быть некоторых пропусков.

## ПЕРВЫЙ РАЗДЕЛ

### ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ЗАКОНА

Фундамент современного здания точных наук о природе образуют два закона: принцип сохранения материи и принцип сохранения энергии. Они обладают бесспорным преимуществом по сравнению со всеми другими общими законами физики; ибо даже великие ньютоновы аксиомы — закон инерции, закон пропорциональности силы и ускорения и закон равенства действия противодействию — простираются лишь на специальную часть физики, на механику, — впрочем, и для нее они могут быть выведены из принципа сохранения энергии при некоторых предположениях, о которых речь будет ниже (см. 3-й раздел).

Правда, в новейшее время становится все более вероятным сведение всех процессов природы к явлениям движения, стало быть, к законам механики; тем не менее это сведение еще далеко не удается в такой мере, чтобы оно допускало непосредственное применение аксиом механики к любому процессу природы. Напротив, принцип сохранения энергии доказывает свой универсальный характер именно тем, что если бы сегодня было открыто совершенно новое явление природы, то из этого принципа можно было бы непосредственно получить меру и закон для этого явления; между тем не существует никакой другой аксиомы, которую можно было бы с такой же уверенностью распространить на все явления природы. Особенно отчетливым образом это сказалось при обосновании различных теорий электричества, поскольку, помимо экспериментально доказанных фактов, признание принципа сохранения энергии образует единственный общий исходный пункт для всех претендующих на приемлемость теорий.

Оба указанные вначале принципа в известной мере связаны друг с другом; первый из них выражает неуничто-

жаемость вещества (лучше, измеряемой весом массы), другой — неуничтожаемость силы (в соответствующем смысле этого слова), — аналогия, которая в еще большей степени может быть проведена в деталях и которая чрезвычайно много дала для ясности понимания.

Насколько оба закона по содержанию своему родственны друг другу, настолько же они проделали совершенно различную историю развития. Постоянство материи, высказанное еще древнегреческими натурфилософами, в особенности Демокритом, привинчалось всеми атомистами и, наконец, получило всеобщее признание благодаря открытию Блэком и Лавуазье закона, что вес системы тел не меняется ни при каком химическом процессе, в частности и при сгорании; открытие же принципа сохранения энергии следует рассматривать, как достижение нового времени, а в его точной, наиболее общей форме — новейшего времени.

Первый след существовавшего такого принципа обнаруживается в опытном, стало быть, индуктивном положении о том, что невозможно построить *perpetuum mobile*<sup>1</sup>. Оно найдено уже столетия назад, — отчасти при помощи экспериментов, стоивших много труда и средств; это положение выражает невозможность сконструировать периодически действующую машину, посредством которой можно было бы получать какое угодно количество работы или живой силы без соответствующей затраты какого-либо другого движущего начала, будь то затрата некоторых материалов или же потеря другой работы или живой силы.

Другими словами, невозможно получить какое угодно количество работы, без определенного, связанного с этим процессом изменения, которое, — пользуясь выражением Клаузиуса, употребленным им при других обстоятельствах, — обладает тем свойством, что оно необратимо без затраты со своей стороны непосредственно или опосредствованно работы или живой силы. Это изменение можно рассматривать как компенсацию, как эквивалент произведенной работы, и можно тогда коротко сказать так: производство работы или живой силы не может происходить без какой-либо компенсации, или еще короче: невозможно работу получить из ничего.

<sup>1</sup> В противоположность своему дословному значению, выражение „*perpetuum mobile*“ обычно употребляется не в смысле сохранения движения, а в смысле вечного двигателя, т. е. вечного (постоянного) совершения работы.

Насколько это положение может служить доказательством принципа сохранения энергии в его всеобщности, мы покажем в следующем разделе. Во всяком случае уже сейчас отсюда видно, что от познания этого опытного положения до точной математической формулировки общего принципа нужно было пройти еще длинный путь. Должно было еще пройти долгое время, прежде чем пришли к дальнейшему, в высшей мере существенному познанию, что это положение можно обратить, а именно, что не существует такого устройства, которое бы длительно потребляло работу или живую силу без какого-либо иного изменения, которое можно было бы рассматривать, как компенсацию первого. То, что всеобщее признание этого последнего положения, — как мы впоследствии увидим со всей ясностью, — относится к несравненно более позднему времени, является дальнейшим доказательством того, что мы имеем здесь дело с чисто опытным фактом, ибо люди всегда больше заботились о получении силы, производящей работу, чем о ее потере.

Трудности, которые пришлось помимо того преодолеть, заключались главным образом в ответе на вопрос, в каких именно процессах следует искать вышеуказанную компенсацию, и в какой связи находится величина последней с количеством произведенной или соответственно потребленной работы, другими словами, что именно следует считать мерой компенсации, эквивалентом произведенной работы. Мы в дальнейшем часто будем иметь повод замечать, что наиболее часто встречающиеся и притом важнейшие различия в мнениях и недоразумения, которые возникали в разное время при применении нашего принципа, относились не столько к признанию или отрицанию закона, — его справедливости, как правило, признавалась всеми, — сколько к измерению компенсации, к эквиваленту произведенной работы. Это можно проследить вплоть до новейшего времени.

Несмотря на свою несовершенную форму, примитивный закон, гласящий, что работа так же, как и материя, не может возникать из ничего, показал свою плодотворность еще в более равные времена, и чем глубже он проникал в человеческое сознание, тем больше подготавливались условия для его последующего уточнения на основе общего принципа. Мы находим многократные применения закона

невозможности *perpetuum mobile* также и для научных выводов в механике. Общеизвестно давнее Стевином <sup>1</sup> в его *Hypomnemata mathematica* <sup>2</sup>, появившейся в Лейдене в 1605 г., доказательство закона равновесия на наклонной плоскости, которое он сделал основой всей своей системы статики. Представим себе, что через вершину треугольника, поставленного на горизонтальное основание, переброшена тяжелая цепь; эта цепь расположена на прилегающих к вершине сторонах, причем оба конца цепи, свисающие с обеих сторон основания, связаны вместе. По Стевину, ясно, что цепь должна находиться в равновесии; если бы это было не так, то она начала бы скользить с одной стороны треугольника на другую и это движение продолжалось бы без конца, так как конфигурация системы всегда остается той же; это устройство можно было бы использовать для получения бесконечного количества работы без соответствующей компенсации. Исходя из невозможности такого аппарата, Стевин заключает о сохранении равновесия, которое не нарушится и в том случае, если оба конца цепи, симметрично свисающие с концов основания, одновременно отрезать; а отсюда, наконец, следует вовсе неочевидное положение, что незамкнутая тяжелая цепь, лежащая на стороне вертикального неравнобедренного треугольника, будет находиться в равновесии при условии, если конечные точки цепи расположены на одной и той же горизонтальной плоскости.

Повидимому, и Галилей при доказательстве положения, что скорость, достигнутая тяжелым телом при падении по произвольному пути, зависит только от вертикального расстояния между начальным и конечным положением тела, исходил из подобного же предположения, как и Стевин, а именно, он принимал, что если бы указанное положение было неверно, то тем самым можно было бы получить средство поднять тяжелое тело на большую высоту, используя только его собственный вес, например, предоставляя ему падать по некоторому пути, и затем опять подниматься

<sup>1</sup> Сравни E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig 1883, p. 24. E. Dühning, *Kritische Geschichte der allgemeinen Prinzipien der Mechanik*, Berlin 1873, p. 61.

<sup>2</sup> S. Stevinus, *Hypomnemata mathematica*, франц. пер. Girard'a. Leiden 1634, p. 448.

по другому соответствующим образом выбранному пути; тем самым, конечно, было бы дано *perpetuum mobile*.

В тесной связи с этим находится закон, найденный также еще Галилеем, а именно, что если бóльшая тяжесть медленно поднимается при помощи опускающегося груза, то произведения обоих грузов на одновременно пройденные ими пути равны, — закон, который впоследствии был обобщен Иоганном Бернулли <sup>1</sup> (1717) в принцип возможных перемещений (скоростей).

Положение, что тело не может подняться при помощи собственного веса, или, более обще, что система тяжелых точек или тел не может поднять своего центра тяжести с помощью движущей силы своего собственного веса, приобрело огромное значение для развития механики благодаря Гюйгенсу. Последний, как известно <sup>2</sup>, обосновал свою теорию физического маятника на положении, что система неизменно связанных друг с другом математических маятников, в качестве которой можно рассматривать любой физический маятник, при движении вверх не может поднять с помощью начальной скорости свой центр тяжести выше, чем в случае, если бы все маятники колебались независимо друг от друга с той же начальной угловой скоростью. Гюйгенс, повидимому, не считал необходимым искать доказательства этого положения; у него, стало быть, было инстинктивное убеждение в его правильности, т. е. он признавал, как нечто само собой разумеющееся, невозможность *perpetuum mobile*. Если это положение признать правильным, то из него непосредственно следует учение о центре качания.

В положении Гюйгенса уже содержится принцип живой силы в применении к тяжести; ибо уже Галилею было известно, что высота, до которой может подняться брошенное вверх тело, пропорциональна квадрату его скорости; поэтому, после того как Лейбниц <sup>3</sup> ввел в 1695 г. для величины  $mv^2$  название *vis viva* (множитель  $\frac{1}{2}$  впервые появляется только у Кориолиса) <sup>4</sup>, можно было высказать положение, что живая сила тела, движущегося под действием тяжести, — независимо от того, свободно ли оно,

<sup>1</sup> Joh. Bernoulli, Opera, 1742, т. III.

<sup>2</sup> C. Huygens, Horologium oscillatorium, Paris 1673.

<sup>3</sup> G. W. Leibniz, Acta Erud., Lips. 1695.

<sup>4</sup> Coriolis, Calcul de l'effet de machines, Paris 1829.

или же ограничено неизменными связями (оси вращения и т. п.), — зависит только от высоты его центра тяжести.

К сожалению, способ обозначения Лейбница, сохранившийся до настоящего времени, вследствие его смещения с понятием пьютоновой силы вызвал путаницу в идеях и бесчисленное множество недоразумений. Эти недоразумения не могли быть избегнуты тем, что Лейбниц применил для давления покоящегося тяжелого тела, стало быть, для ньютоновой силы, иное обозначение — *vis mortua*; оба рода сил — живая и мертвая сила — имеют совершенно различные размерности. Мы вернемся к этому пункту в дальнейшем, при обсуждении работ Майера.

Значение понятия живой силы для законов удара было еще ранее (1669) признано Вреном и Гюйгенсом, поскольку оба они в своих теориях упругого удара пришли к согласному результату, что при ударе двух упругих тел живая сила не теряется; напротив, из законов, которые одновременно открыл Валлис в своих исследованиях неупругого удара, получилось, что при неупругом ударе живая сила теряется.

Однако понятие живой силы приобрело интерес, главным образом, благодаря известной дискуссии об истинной мере силы тела, находящегося в движении, которая происходила между Декартом и Папином, с одной стороны, и Лейбницем, с другой, и которая со все возрастающим напряжением продолжалась еще долго после их смерти между их последователями. Лейбниц опирался при этом на опытный факт, что для поднятия определенного груза на 4 фута требуется такая же сила (работа), как и для поднятия в 4 раза большего груза на 1 фут, так как в обоих случаях можно разложить всю работу на четыре отдельные работы, каждая из которых состоит в поднятии единичного груза на 1 фут.

Представим себе, что поднятие грузов осуществляется таким образом, что им сообщают направленную вверх скорость, которой как раз достаточно для достижения ими определенной высоты. В таком случае, согласно законам Галилея, единичному грузу для поднятия его на учетверенную высоту нужно сообщить не учетверенную, а удвоенную скорость против той, которую необходимо сообщить учетверенному грузу для поднятия его на единицу высоты. Но так как равные действия должны иметь равные при-

чины, то, заключает Лейбниц, сила, присущая единичному грузу, обладающему удвоенной скоростью, должна быть равна силе, присущей учетверенному грузу с единичной скоростью, из чего следует в качестве общей меры силы выражение  $mv^2$ .

Иначе рассуждали Декарт и его ученики: двойная сила сообщает тому же телу в одно и то же время двойную скорость; следовательно, истинной мерой силы является количество движения  $mv$ <sup>1</sup>.

С нашей современной более строгой физической точки зрения, точно различающей силу от работы, мы должны естественно весь этот спор объявить чисто словесным спором; ибо о существенном расхождении можно говорить только тогда, когда приходят к единому определению понятия, о котором идет речь, — понятия, с самого начала совершенно произвольного. Пока, стало быть, со словом сила не связывали какого-либо ясного представления, спор о мере силы был совершенно беспредметен.

Но вместе с тем нельзя не признать, что в основе изложенного нами спора все же лежало более глубоко содержание; ибо по существу обе партии — хотя это и высказывалось лишь случайно и неотчетливо — до известной степени были едины в том, что следует понимать под словом „сила“. И Декарт и Лейбниц несомненно имели представление, хотя быть может и не совсем точное, о существовании принципа, высказывающего неизменность и неуничтожаемость того, из чего возникает всякое движение и действие в мире. Если Декарт основывал справедливость этого принципа на теологических рассуждениях, которые базировались на вечности творца, то Лейбниц исходил из закона причины и действия. Причина может произвести лишь такое действие, которое ей в точности соответствует, не большее и не меньшее. Стало быть, в непрерывной цепи причин и действий, которые образуют явления мира, не может иметь места какое-либо возрастание или уменьшение: есть нечто, что остается постоянным. Если мы это нечто назовем с и л о й, то мы получим некоторое хотя и весьма не совершенное представление об общем исходном пункте в понятии силы у обеих различных точек зрения. Поэтому

<sup>1</sup> M. Z w e r g e r, Die lebendige Kraft und ihr Masz. Ein Beitrag zur Geschichte der Physik, München 1885.



вполне было возможно различие мнений по поводу того, является ли истинной мерой этого понятия декартово количество движения или живая сила Лейбница. Если бы спор велся в этой несколько более точной форме, то Лейбниц был бы прав.

Здесь перед нами случай, о котором мы уже говорили выше, когда в меньшей степени идет речь о признании неизменности силы, чем о значении эквивалента этой величины, призванной обеими партиями неизменной; именно речь идет о мере компенсации скорости тела, когда его движение используется для совершения определенного действия. К этой мысли мы еще часто будем возвращаться.

После того как в конце XVII в. механика, тогда еще составлявшая почти единственную ветвь физики, была завершена Исааком Ньютоном в еще и теперь в основном непревзойденной форме, понятие силы было окончательно и, повидимому, навсегда установлено и притом в смысле, примыкающем к мере силы Декарта. Ньютон (1687) рассматривал силу непосредственно как давление, — как оно воспринимается нами в мускульном ощущении, — и поэтому измерял величину силы скоростью, которую это давление производит в единице массы за единицу времени; отсюда размерность силы получается равной произведению массы на ускорение. Эта величина естественно ничего не имеет общего с принципом сохранения „силы“ и это, возможно, послужило основанием к тому, что в течение длительного периода принципом снова перестали интересоваться. Понятие силы Лейбница оказывается теперь действием или работой ньютоновой силы; последняя является лишь необходимым, но еще недостаточным условием для совершения работы.

Сам Ньютон, повидимому, никогда особенно не занимался понятием действия или работы силы, хотя в его сочинениях и можно найти отдельные места, где он близко подходит к этому понятию. Сюда относится часто цитированное определение *actio agentis*<sup>1</sup> (произведение силы на соответствующую компоненту скорости ее точки приложения) — величины, которая дает значение работы, произведенной силой за единицу времени. Но из этого определения

---

<sup>1</sup> I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Opera, ed. S. Horsley. Vol. II, Londini 1779, p. 28, s.

он не сделал дальнейшего употребления; вообще мне кажется, что попытки вывести принцип сохранения энергии из этого места, взятого из комментария к аксиоме равенства действия и противодействия, не могут иметь никакого успеха уже потому, что содержание этих двух законов относится к совершенно различным областям. Во всяком случае, Ньютон принимает без всякого сомнения или же иного замечания то обстоятельство, что движение теряется благодаря трению или несовершенной упругости <sup>1</sup>.

Дальнейшим развитием понятия работы и живой силы мы обязаны в гораздо большей степени базельским физикам и прежде всего Иоганну Бернулли, который весьма тесно примыкал к идеям Лейбница. Он неоднократно говорит о *conservatio virium vivarum* и при этом подчеркивает, что, когда живая сила исчезает, способность производить работу (*facultas agendi*) <sup>2</sup> вовсе не теряется, но превращается лишь в другую форму, например, в сжатие <sup>3</sup>. По Эйлеру, живая сила точки, притягиваемой или отталкиваемой неподвижным центром пропорционально расстоянию от центра, всегда принимает одно и то же значение, как только точка вновь приходит в одно и то же место; в общем случае приращение живой силы измеряется работой (*effort*) силы. Выражение *travail* введено Понселе <sup>4</sup>. Даниил Бернулли обобщил этот закон на многие движущиеся точки и показал, кроме того, высокую плодотворность принципов, развитых его отцом, для законов движения жидкостей <sup>5</sup>.

Понятие работы оказалось необходимым ближе изучить также и в технике; это привело к введению Уатом обозначения „лошадиная сила“ (работа лошади в секунду).

Томас Юнг впервые употребил название энергия для живой силы движущегося тела и положил, таким образом, начало современному обозначению этого выражения. (Термин

<sup>1</sup> I. Newton, Opera, ed. S. Horsley. Vol. IV, Londini 1782, p. 258.

<sup>2</sup> Joh. Bernoulli, Opera, 1742, T. III, p. 239.

<sup>3</sup> Joh. Bernoulli, Opera, Lausannae et Genevae 1742, T. III, p. 243.

<sup>4</sup> Poncelet, Cours de mécanique appliquée aux machines, Metz, 1826.

<sup>5</sup> Dan. Bernoulli, Hydrodynamica, 1738. Кроме того, сравн. Remarques sur le principe de la conservation des forces vives pris dans un sens général. Histoire de l'Académie de Berlin, 1748, p. 356.

ένέρεια в физическом смысле слова встречается уже у Аристотеля; и другие физики — Галилей, Иоганн Бернулли<sup>1</sup> также применяли его в разных случаях, однако, не связывая с ним определенного смысла.) В своих исследованиях закона удара Юнг нашел<sup>2</sup>, так же как и до него Вреп, Валлис и Гюйгенс, — что при центральном ударе двух тел их количество движения, т. е. количество движения центра тяжести, при всех условиях сохраняется. Он обозначает эту величину совсем в смысле Декарта, отбрасывая противоположные воззрения Лейбница и Смитона, как истинную меру силы, присущей движущемуся телу. Вместе с тем он считает достаточно важной и величину, обозначенную другими лицами словом живая сила, для того, чтобы дать ей особое название, именно энергии движущегося тела, в особенности принимая во внимание, что имеются случаи, когда действие движущегося тела явно должно измеряться квадратом его скорости. Так, шар, обладающий двойной скоростью, пробивает в куске мягкой глины или стеарина в четыре раза более глубокую дыру, чем шар, обладающий единичной скоростью; чтобы удвоить скорость тела, его необходимо бросить с учетверенной высоты. Юнг отмечает также, что идеально упругие шары при ударе сохраняют свою энергию. Тем не менее он еще далек от признания общего принципа сохранения энергии; необходимое для этого расширение понятия энергии осталось на долю более позднего времени.

---

<sup>1</sup> Г-н Гагенбах (Hagenbach) в своем докладе о заслугах Иоганна и Даниела Бернулли в развитии закона сохранения энергии (Verh. d. naturf. Ges. zu Basel, T. VII, 1884, p. 24, p. 28) неоднократно указывает, что уже Иоганн Бернулли дал понятию работы название энергии. Я нигде не мог найти подтверждения этого замечания, несмотря на тщательный просмотр всех сочинений Бернулли (Opera, 1742); единственный раз мне встретилось слово энергия (T. III, p. 45), но оно употребляется совсем в ином смысле.

*Прим. 1908.* На вышеуказанное замечание г-н Гагенбах-Бিশоп возразил мне (Verh. d. naturf. Ges. zu Basel, Teil VIII, p. 833), что во втором томе Nouvelle mécanique Вариньона, появившемся в свет в 1725 г., на стр. 174 имеется упоминание об одном письме (теперь уже более не существующем) Иоганна Бернулли к автору, в котором слово „энергия“ определяется в смысле работы.

<sup>2</sup> Th. Young, A course of lectures on natural philosophy, London 1807, Vol. I. Lect. VIII, p. 75. On collision.

Братко обзревая исследования в рассматриваемой нами области до конца восемнадцатого и начала девятнадцатого веков, мы можем признать их зрелым плодом познание закона сохранения живой силы. В системе материальных точек, находящихся под действием центральных сил, живая сила зависит только от мгновенной конфигурации системы, а именно от значения, которое имеет при этой конфигурации силовая функция (названная так Гамильтоном). Следовательно, изменение силовой функции измеряет произведенную силами работу, независимо от того, на каком пути это изменение имело место; при возвращении системы к первоначальной конфигурации живая сила также принимает прежнее значение. Этот закон исключает возможность конструкции *perpetuum mobile* чисто механическими средствами. Правда, справедливость этого закона ограничена определенным родом сил, которые теперь обычно обозначаются, как „консервативные“; при трении, неупругом ударе и т. д. этот закон не находит применения; здесь, наоборот, происходит закономерная потеря живой силы.

Насколько широко может быть обобщен закон живой силы, об этом тогда имели представление лишь немногие. Тем не менее является фактом, что уже в конце восемнадцатого века невозможность конструкции *perpetuum mobile* как механическими, так и иными методами стала всею ясней, лучшим доказательством чего является то обстоятельство, что Французская академия в 1775 г. объявила раз навсегда, что она не будет принимать мнимых решений этой проблемы<sup>1</sup>. Большинству современников эта невозможность казалась печальным фактом, своего рода неизбежной неприятностью; никому не приходило в голову извлечь из этого капитал для науки, несмотря на успех, которого добились уже в этом направлении Стевин и Гюйгенс.

В 1824 г. Сади Карно сделал первый решительный шаг, который показал применимость этого принципа также и к *немеханическим* явлениям<sup>2</sup>. Так как с изобретением паровой машины дало себя почувствовать отсутствие удо-

<sup>1</sup> Hist. de l'Acad. Roy. des Sciences. 1775, p. 61, 65. H. v. Helmholtz, Vorträge und Reden, Braunschweig 1884, I, p. 64.

<sup>2</sup> S. Carnot, Réflexions sur la puissance motrice du feu, et sur les machines propres à développer cette puissance. Paris 1824. Вновь напечатано в Ann. de l'école norm. (2) I, p. 393, 1872.

влетворительной теории механических действий теплоты, то Карно, исходя из мысли о невозможности *perpetuum mobile*, занялся обоснованием новой теории теплоты. Эта теория была позднее разработана Клапейроном<sup>1</sup> в том же направлении, во несколько более элегантными и доступными способами. Но при этом опять оказалось, что важнейшим условием применения указанного принципа является правильное определение значения эквивалента произведенной работы. Речь шла о вопросе: если работа производится теплотой, то какой именно процесс должен тогда рассматриваться как компенсация произведенной работы, и как этот процесс измерить? Так как во времена Карно полным признанием пользовалась теория теплоты, которая рассматривала теплоту как неуничтожаемое вещество, наличие которого в большем или меньшем количестве обуславливает большую или меньшую нагретость тела, то он должен был прийти к мысли, что тепловое вещество производит живую силу таким же образом, как и тяжесть весомой материи. Последняя стремится упасть с более высокого в более низкое положение; произведенная при этом живая сила измеряется произведением силы тяжести на высоту падения; это произведение, следовательно, и является эквивалентом живой силы. Отсюда Карно вывел заключение: тепловая жидкость (флюид) стремится перейти от более высокой к более низкой температуре, как это известно из законов теплопроводности. Но это стремление можно использовать и произвести при его помощи живую силу, которая тогда должна измеряться произведением перешедшего количества теплоты на интервал температур. Поэтому Карно искал компенсацию для совершенной работы в переходе теплоты от более высокой температуры к более низкой и рассматривал в качестве меры последней, стало быть, в качестве эквивалента работы, произведение количества теплоты на разность температур. Согласно вычислению Клапейрона, переход одной калории от  $1^{\circ}\text{C}$  к  $0^{\circ}\text{C}$  в состоянии поднять 1,41 кг на один метр; соответственно этому число 1,41 следовало бы назвать тепловым эквивалентом Карно. [Это число есть не что иное, как механический

---

<sup>1</sup> Clapeyron, Mémoire sur la puissance motrice du feu. Journ. de l'école polytechnique, T. XIV, p. 170, 1834. Pogg. Ann. 59, p. 446 и 566, 1843.

эквивалент теплоты Джоуля, разделенный на абсолютную температуру таящего льда (в градусах Цельсия).] Как видно, эти соображения по форме своей совершенно одинаковы с рассуждениями Майера и Джоуля. Ошибка Карно заключается лишь в том, что он привнес в это рассуждение ложное представление о характере того процесса, в котором нужно искать компенсацию произведенной работы, — представление, которое было обусловлено господствовавшей тогда теорией теплоты.

В механике можно произвести работу двумя способами: посредством затраты другой работы или же путем затраты живой силы. Вместо того, чтобы для совершения работы при помощи теплоты искать аналогию во втором процессе, стало быть, вместо того, чтобы рассматривать компенсацию в виде исчезновения теплоты и измерять произведенную работу количеством уничтоженной теплоты, Карно сравнил деятельность теплоты с действием тяжести весомой материи, которая сама по себе неуничтожаема и которая может производить какие-либо действия лишь благодаря изменениям положения тел. Следовательно, для Карно теплота являлась тем же самым, чем для Ньютона — сила: необходимым, но еще недостаточным условием для вызывания каких-либо действий.

Но, далее, также видно, что поскольку теория Карно-Клапейрона существенно опирается на принцип исключенного *perpetuum mobile*, то на ней с таким же успехом можно построить и принцип сохранения энергии; при этом энергия теплоты должна рассматриваться не в виде простого количества теплоты, а как произведение количества теплоты на температуру. Поэтому неправильно считать, что принцип сохранения энергии содержит в себе противоречие с вещественной теорией теплоты; напротив, Карно целиком и полностью стоит на почве этого принципа. В согласии с этим представлением Гельмгольц приводит в своей работе „О сохранении силы“ обе теории, — и вещественную и механическую, — как сначала равноправные друг с другом, и отбрасывает первую лишь на том основании, что экспериментами доказано, что количество теплоты может изменяться<sup>1</sup>.

Впрочем для суждения о достижениях Карно очень

---

<sup>1</sup> Н. v. Helmholtz. Wiss. Abh. I. Leipzig 1882, p. 33.

важен тот факт, — тем более замечательный, что он остался совершенно неизвестным в широких кругах, — что Карно (как это следует из оставленной им рукописи, которую после его смерти его брат предоставил Французской академии), спустя некоторое время после издания его главного сочинения, увидел себя вынужденным отказаться от вещественной теории теплоты, которой он до тех пор придерживался, и объявить теплоту движением<sup>1</sup>. Поскольку это видно из содержания упомянутой рукописи, опубликованной в *Comptes Rendus*, Карно настолько же ясно понял те выводы, которые вытекали из принципа сохранения энергии в пользу нового представления, как и вскоре после него Майер и Джоуль. Эта рукопись, между прочим, гласит: всюду, где работа исчезает (*où il y a destruction de puissance motrice*), имеет место возникновение теплоты (*production de chaleur*) в пропорциональных количествах, и наоборот. При этом согласно вычислению, более подробно не приведенному, единица работы (поднятие одного кубического метра воды на высоту в один метр) эквивалентна нагреванию на 2,70 калорий, — число, из которого механический эквивалент теплоты получается равным 370 килограмметрам (ср. число Майера). Если принять во внимание, что Карно сделал это вычисление по меньшей мере на десять лет раньше Майера (Карно умер в 1832 г.), то ему несомненно принадлежит заслуга первоначального вычисления механического эквивалента теплоты. Правда, вследствие того, что рукопись своевременно не была опубликована, это открытие, к сожалению, не принесло пользы для науки.

Теория Карно-Клапейрона о действиях теплоты получила дальнейшее развитие в особенности в Англии; еще в 1848 г. Томсон основал на ней свою абсолютную температурную шкалу<sup>2</sup>; ибо ясно, что если произведение теплоты на температуру эквивалентно работе, то из этого уравнения можно вывести определение температуры, если дана мера теплоты. Тогда известный температурный интервал вполне определяется значением работы, которую вполне может произвести калория, „падающая“ на этот интервал.

<sup>1</sup> H. Carnot, Lettre, *Compt. Rendus* 87, p. 967, 1878.

<sup>2</sup> W. Thomson, On a absolute thermometric scale founded on Carnots theory of the motive power of heat, and calculated from Regnaults observations. *Phil. mag.* (3) 33, p. 313, 1848.

Существенная слабость этой теории лежит уже в допущении, что хотя работа и не может возникнуть из ничего, но все же она может перейти в ничто. Это и высказывает твердо Клапейрон<sup>1</sup>; он говорит: при непосредственном переходе теплоты от более теплого к более холодному телу величина действия (способность совершать работу) пропадает. По его мнению, стало быть, вполне возможно потерять работу без получения какого-либо эквивалента в виде компенсации. Так же думал он и по поводу трения: оно уничтожает живую силу, не давая взамен ее никакого эквивалента. Томсон, напротив, усмотрел в этом пункте значительную трудность теории Карно, поскольку он уже тогда явно был проникнут убеждением, что принцип *perpetuum mobile* обратим. Он высказывается следующим образом<sup>2</sup>: если при непосредственном переходе теплоты от более высокой к более низкой температуре затрачивается действие теплоты, то что же тогда происходит с механическим эффектом, который мог бы быть получен благодаря этому переходу? В природе ничего не может быть потеряно, энергия не уничтожается; стало быть, спрашивается, каково же действие, которое возникает взамен перехода теплоты? Он считает этот вопрос запутанным (*perplexing*) и полагает, что последовательная теория теплоты должна дать на него удовлетворительный ответ. Тем не менее в упомянутом рассуждении он еще придерживается теории Карно, считая, что трудности, которые возникают при отказе от этой теории, являются гораздо большими.

И все же эти трудности были поразительно быстро преодолены. Опыты, которые с принудительной силой вынуждали к отказу от теории неуничтожаемости теплоты, накапливались все больше и больше, пока, наконец, результаты, полученные после блестящего открытия механического эквивалента теплоты, не привели материальную теорию теплоты к скорому концу. Если рассматривать теплоту как движение, то само собой ясно, что компенсацию работы, совершенной теплотой, следует искать в исчезновении теп-

---

<sup>1</sup> Clapeyron, Mémoire sur la puissance motrice du feu. Journ. de l'école polytechnique, T. XIV, p. 170, 1834. Pogg. Ann. 59, p. 446 u. 566, 1843.

<sup>2</sup> W. Thomson, An account of Carnots theory of the motive power of heat. Transact. of the Roy. Soc. of Edinburgh vol. XVI, p. 541, 1849.



лоты, ибо тогда в качестве эквивалента произведенной работы нужно рассматривать потерянную живую силу теплового движения; опытное подтверждение выводов из этого положения помогло механической теории теплоты получить решающий перевес.

Уже задолго до этого трудность в объяснении образования теплоты при трении приводила отдельных физиков к взгляду, что количество теплоты вовсе не неизменно и что, следовательно, теплота не может быть веществом. Согласно вещественной теории, теплота, образующаяся вследствие трения, должна быть либо подведена извне, либо же трущиеся тела уменьшают свою теплоемкость в такой мере, что то же самое количество теплоты сообщает телам большую температуру. Румфорд<sup>1</sup> убедительно показал, что оба допущения не выдерживают критики; при помощи лошадиной силы он приводил во вращение тупое сверло, прижатое ко дну ствола пушки, и посредством образующейся при трении теплоты доводил значительное количество воды до состояния кипения; теплоемкость металла оказывалась при этом вовсе не изменившейся. Так как произведенная таким образом теплота при продолжении этого опыта может быть как угодно увеличена, то Румфорд привел этот факт в связь с затраченной силой, не доводя, однако, дела до численного сравнения затраченной работы и произведенного количества теплоты.

То же самое почти одновременно доказал Дэви<sup>2</sup> посредством трения двух металлических пластинок, приводившихся во вращение отдельным часовым механизмом под колоколом воздушного насоса; еще убедительнее были его опыты над трением двух совершенно изолированных от внешних влияний кусков льда, которые доводились до таяния. При этом особенно веско то обстоятельство, что теплоемкость воды почти вдвое больше теплоемкости льда. С тех пор были выполнены еще многие другие эксперименты, доказавшие со всей ясностью, что теплота может быть произведена; так, например, она может быть произве-

---

<sup>1</sup> Rumford. An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction. Trans. of the Roy. Soc. London 1798, Jan. 25.

<sup>2</sup> H. Davy. An essay on heat, light and the combinations of light, in Beddoes Contributions to physical and medical knowledge, Bristol 1799. Works, vol. II, London 1836, p. 11.

дена путем поглощения световых или тепловых лучей, тождество которых после опытов Меллони можно считать доказанным, далее, — с помощью электричества, независимо от того, возникло ли оно химическим путем, или же путем затраты механической работы.

Хотя каждый из этих фактов в отдельности решительным образом говорит против вещественного представления о теплоте, тем не менее представители механической теории теплоты, среди которых, кроме уже упомянутых, следует назвать еще в особенности Юнга, Ампера, Френеля, — вплоть до середины XIX в. составляли незначительное меньшинство; до того времени ни разу серьезно не пытались разработать принцип невозможности *perpetuum mobile* для механической теории теплоты, подобно тому, как это сделал Карно для вещественной теории.

Единичные следы подобных стремлений можно, правда, найти в отдельных случаях; например, в сочинении „*Etude sur l'influence des chemins de fer*“ (Paris 1839, p. 378) Сегена старшего встречается такое замечание: пар — лишь средство для получения силы; движущей причиной является теплота, которая, так же как и живая сила, способна совершать работу. Сеген приписывает авторство этой мысли своему дяде, известному Монгольфье (1740—1810).

Эти рассуждения простираются не только на область теплоты, но и на все другие явления природы; здесь мы опять находим подтверждение часто отмечавшегося нами факта, что никто не сомневался в справедливости самого принципа, только трактовка выводов давала повод к различию мнений.

Роже, например, полагал, что принцип можно использовать как доказательство против электрической контактной теории<sup>1</sup>; он аргументирует при этом следующим образом: „Все силы и источники движения, причины которых нам известны, при совершении ими свойственных им действий иссякают в той же мере, в какой эти действия возникают, а отсюда вытекает невозможность непрерывного образования ими эффекта или, другими словами, они не могут вызывать непрерывно возникающего движения“. Поэтому Роже объявляет невозможным получение длительно суще-

---

<sup>1</sup> Roge t, *Treatise on galvanism*, 1829, p. 113 (Library of useful knowledge).

ствующего тока без соответствующей затраты другого начала (в данном случае — химического средства) и обращает это возражение против контактной теории; он был бы вполне прав, если бы контактная теория допускала такой процесс.

Подобным же образом высказывается и Фарадей: „Контактная теория принимает, что сила, способная преодолеть мощные сопротивления, может возникнуть из ничего. Это было бы сотворением силы, что нигде не имеет места без соответствующего исчерпания того, что питает ее. Если бы контактная теория была верна, то следовало бы отрицать равенство причины и действия. Но тогда было бы возможно и *perpetuum mobile*, и было бы легко непрерывно получать механические эффекты при помощи электрического тока, возникшего первоначально вследствие контакта“<sup>1</sup>. Вряд ли следует здесь доказывать, что эти упреки, направленные против контактной теории, покоятся на недоразумении. Весь спор относится вообще не к способу поддержания электрического тока, но к причине возбуждения тока; ибо, что ток не может поддерживаться без постоянной затраты энергии, в настоящее время есть нечто само собой разумеющееся как с точки зрения контактной теории, так и с точки зрения химической теории.

Применение принципа мы уже находим и в химии. Мысль, что количество теплоты, образующееся в результате ряда последующих химических реакций, не зависит от того, по какому пути или в какой последовательности происходят отдельные реакции, если только начальное и конечное состояния системы одни и те же, — эта мысль постепенно и без шума внедрилась в теоретическую химию. Вероятно, впервые это отчетливо упоминает Гесс<sup>2</sup>: „Если имеет место соединение, то образующееся количество теплоты постоянно, независимо от того, происходит ли это соединение непосредственно или не посредованно“. Убеждающая справедливость этого положения происходит вне сомнения от идеи, что теплота не может быть получена из ничего; эта мысль естественно опирается на представление о неувяжае-

---

<sup>1</sup> M. Faraday, Exp. Researches. Phil. Trans. London, pt. I, p. 93, 1840. Pogg. Ann. 53, p. 548, 1841.

<sup>2</sup> H. Hess, Thermochemische Untersuchungen. Pogg. Ann. 50, p. 392, 1840.

мости теплового вещества, хотя она гораздо более обща и независима от этого представления.

Насколько далеко отдельные физики проникали в познавшие единства и взаимного превращения различных сил природы, лучше всего показывает следующее место из сочинения Мога<sup>1</sup> о природе теплоты, в котором автор, находившийся, главным образом, под влиянием опытов Меллови и Румфорда, живо высказывается в защиту динамической теории теплоты: „В природе вещей, помимо известных 54-х химических элементов, существует еще только одно начало, и оно называется силою; при подходящих обстоятельствах это начало проявляется в виде движения, химического сродства, сцепления, электричества, света, теплоты и магнетизма, и из каждой из этих форм явлений могут быть получены все остальные. Та же сила, которая поднимает молот, может, если она применяется другим образом, произвести любое другое явление“. Мы видим: отсюда только один шаг до вопроса об общей мере всех этих признанных однородными сил природы.

Этот шаг был почти одновременно сделан с разных сторон и различными способами. Если мы последуем хронологическому порядку отдельных публикаций, то мы прежде всего должны обратить ваше внимание на работы гейльбронского врача д-ра Юлиуса Роберта Майера<sup>2</sup>.

Соответственно всему направлению ума Майера, который предпочитал философски обобщать, нежели эмпирически строить по частям, форма его доказательства носит дедуктивный характер. В своей первой краткой статье<sup>3</sup>, появившейся в мае 1842 г., он высказывается следующим образом. Действие никогда не может возникнуть без причины, и наоборот, причина не может остаться без действия — *Ex nihilo nihil fit*, и наоборот, *Nil fit ad nihilum*. Каждая причина имеет вполне определенное, точно ей соответствующее действие, не большее и не меньшее; в причине, следовательно, содержится все, что обуславливает действие, и полностью вновь появляется в действии, хотя и в дру-

<sup>1</sup> K. Fr. Mohr, Über die Natur der Wärme. Zeitschr. f. Physik v. Baumgärtner, V, p. 419, 1837. Ann. d. Pharmazie 24, p. 141, 1837.

<sup>2</sup> J. R. Mayer, Die Mechanik der Wärme, Stuttgart. 1867, 2. verm. Aufl. Stuttgart. 1874.

<sup>3</sup> J. R. Mayer, Lieb. Ann. 42, p. 233, 1842. Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. — Phil. Mag. (3) 24, p. 371, 1844.

гой форме. Стало быть, причина и действие в известном смысле друг другу равны — *causa aequat effectum*. Поэтому Майер обозначает причины, как количественно неуничтожаемые и качественно способные к превращению объекты. Все причины он делит на две части: одни из них он причисляет к материи, другие — к силе; оба рода причин неуничтожаемы и между ними также не происходит никакого взаимного перехода, т. е. материю нельзя превратить в силу, и в такой же мере невозможно превратить силу в материю; но как материя, так и сила внутри себя может преобразовываться многообразными способами. Но в то время, как существуют многие различные виды материи, именно химические элементы, которые нельзя превратить друг в друга, мы знаем лишь один род силы, ибо все силы могут превращаться друг в друга, все силы являются различными формами проявления одного и того же объекта, одной и той же причины.

Разумеется, здесь слово сила употребляется в смысле Лейбница, и это несколько не странно, поскольку это значение слова в то время еще часто встречалось. Во всяком случае не следует за это делать упрек Майеру в неясности, ибо как показывает дальнейшее, он очень хорошо понимал различие между этими понятиями. Ньютонову силу он называет своим.

Переходя к более близкому рассмотрению природы различных сил, Майер сводит их к трем основным формам: к теплоте, силе падения и движению. Эти основные формы отличаются друг от друга, но могут взаимно превращаться в определенных числовых отношениях, и поэтому могут быть измерены общей мерой. Силу падения и движение и до того измеряли одной и той же мерой; остается лишь сравнить с этой мерой единицу теплоты. Майер вычисляет из опытов над „сжатием воздуха“, что одна калория эквивалентна поднятию одного килограмма на 365 м, при средних значениях ускорения силы тяжести. В основе этого вычисления, подробности которого были им сообщены в следующей работе,<sup>1</sup> лежит мысль, что установленная многими опытами разность между количеством теплоты, которое необходимо подвести извне некоторому количеству воздуха

---

<sup>1</sup> Mayer, Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel, 1845. (Mechanik d. Wärme, Stuttg. 1874.)

для определенного повышения его температуры при постоянном давлении, и количеством теплоты, необходимым для этой же цели при постоянном объеме, эквивалентна работе, произведенной в первом случае вследствие расширения воздуха. Правда, при этом молчаливо предполагается, что избыток теплоемкости при постоянном давлении над теплоемкостью при постоянном объеме имеет место исключительно благодаря совершенно внешней работы, — предположение, которое непосредственно нельзя приять, ибо большинство газов и паров показывают заметное понижение температуры также и тогда, когда они расширяются без совершения какой-либо внешней работы. Все же это допущение, впоследствии названное гипотезой Майера и игравшее роль в дальнейшем развитии теории теплоты, оказалось справедливым для так называемых идеальных газов.

После того как установлен механический эквивалент теплоты, можно измерять ее той же мерой, как и механическую силу, полагая одну килограмм-калорию равной  $365 \cdot 9,81$  единицы силы (работы), — в системе килограмм — метр — секунда. Замечательно то обстоятельство, что Майер вовсе не исходил из представления, что теплота есть движение, а из осторожности исключил вопрос о ее сущности. Он отчетливо говорит, что теплота, движение и сила падения могут взаимно превращаться в определенных числовых отношениях. Вывести отсюда заключение о том, что теплота сводится к движению так же нельзя, как нельзя заключить, что сила падения и движение тождественны друг другу. И действительно, вся теория теплоты так, как она была позднее построена Клаузиусом на его двух основных началах, может быть выведена без какого-либо представления о механической природе теплоты; достаточно лишь сделать допущение, что теплота при известных условиях может превращаться в движение. Лишь позднее развившаяся теория газов дала нашим представлениям о сущности теплоты более определенную форму.

Майер не останавливается на изложенных выше выводах. Во втором, более обстоятельном исследовании он расширяет свою теорию и на другие области естествознания<sup>1</sup>. Он называет химию наукой о превращениях материи,

---

<sup>1</sup> Mayer, Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel, 1845. (Mechanik d. Wärme, Stuttgart. 1874.)

а физику — наукой о превращениях силы и затем еще раз излагает свои воззрения об эквивалентности теплоты и движения. Затем в круг рассматриваемых явлений включается и электричество, но опять-таки Майер при этом пользуется терминологией, к сожалению, находившейся в противоречии с господствовавшим словоупотреблением. Электричество он называет силой, так же как и теплоту, причем под этим словом он понимает то, что мы называем электрическим потенциалом. Действие электрофора он совершенно правильно объясняет затратой механической работы. Точно так же и „химическая разность“ (chemische Differenz) двух тел вводится в качестве силы, ибо посредством нее может быть произведена теплота, количество которой и дает меру затраченной силы. Наконец, он перечисляет шесть различных сил, действующих в неорганической природе и могущих превращаться друг в друга в определенных эквивалентах, а именно: силу падевия, движение, теплоту, магнетизм, электричество, химическую разность. Он распространяет эти выводы также и на органическую природу, именно Майер здесь развивает мысль о значении процесса ассимиляции в растениях для поддержания всей животной жизни.

В следующей отдельной работе он применяет свои теории также и к космическим явлениям<sup>1</sup>. Он дал первое рациональное объяснение источника солнечной теплоты, показав, что никакой химический процесс (сгорание) не в состоянии возместить огромный расход теплоты при солнечном излучении; затем он высказывает взгляд, что эта теплота доставляется живой силой непрерывно падающих на солнце масс метеоритов (ср. взгляды Гельмгольца и Томсона). Он объясняет раскаленность метеоров потерей ими живой силы вследствие трения при их полете в атмосфере. Майер обращает внимание на то, что явление приливов благодаря приливному трению необходимо должно замедлять скорость вращения земли и что вся работа, которую можно произвести за счет процессов прилива и отлива, получается за счет живой силы вращения земли.

Каждое из этих рассуждений показывает, что Майер, хотя он частично и пользовался неупотребительной номен-

<sup>1</sup> Mayer, Beiträge zur Dynamik des Himmels, 1848. (Mech. d. W., Stuttg. 1874.)

клатурой, хорошо понимал значение высказывавшихся им воззрений. Он это подробно излагает в следующем произведении<sup>1</sup> и очень ясно говорит о различии между понятиями, которым Лейбниц и Ньютон дали название „силы“, а также о нецелесообразности различения между „мертвой“ (ньютоновой) и „живой“ (лейбницевой) силой. В этом смысле слово сила должно было бы обозначать общее родовое понятие, в котором оба более специальных понятия содержатся, как отдельные виды. Но это потому было бы неправильно, что оба понятия представляют собой величины совершенно различных размерностей, следовательно, вообще не сравнимы друг с другом; поэтому необходимо от одного из этих двух обозначений отказаться. Майер решает употребить слово сила в лейбницевом смысле, ибо он считает, что это понятие более фундаментально. Такое обозначение выгодно также и тем, что оно правильно противопоставляется слову материя; мы и теперь еще употребляем противоположение: сила и вещество, причем мы собственно имеем в виду энергию и вещество. Оба — уничтожаемы.

Майер был совершенно прав в этих рассуждениях; в современном естествознании лейбницево понятие на самом деле стало более важным; он только не посчитался с силой исторического развития науки. Физика была основана на механике, а в механике ньютоново понятие слишком прочно укрепилось, чтобы так просто уступить место другому обозначению. Так предложение Майера и не проникло в физику, хотя в отдельных выражениях (живая сила, сохранение силы) лейбницево обозначение еще сохранилось до сих пор. Только обращение к истории может объяснить эту непоследовательность, которая теперь по крайней мере не таит в себе такой опасности недоразумений, как раньше.

Чтобы облегчить обзор тех новых идей, которые Майер внес в естествознание, мы изложили различные относящиеся сюда его работы в их взаимной связи, хотя между их появлением и прошло несколько лет. То, что у него не хватало строго научной школы, что он мог бы в некоторых пунктах, а именно в первых исследованиях, выразиться более ясно и отчетливо для специалистов физиков, что,

---

<sup>1</sup> Mayer, Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme, Heilbronn 1850. (Mech. d. W. 1867, p. 237.)



наконец, почти все примыкающее к метафизике обоснование его учения стоит на довольно слабых опорах, — во всем этом приходится уступить тем, которые в недостаточной степени признают его значение. Но совершенно бесспорно, что Майер был не только первым, публично высказавшим те идеи, которые характерны для нашего современного естествознания, но и первым, давшим меру и число (а в этом больше всего и сводится дело), применившим эти идеи ко всем доступным ему явлениям природы. Что же касается обоснования закона, то мы не должны забывать, что этот закон, как мы более подробно покажем в следующем разделе, именно вследствие его всеобщности вообще не может быть строго доказан дедуктивно, что, следовательно, то, что Майеру не удалось сделать с его способом доказательства, — не удалось сделать ни одному другому физическому. Наиболее непосредственное доказательство, по возможности свободное от всех предположений, дается исследованием отдельных выводов, а здесь Майер, хотя сам и не занимался экспериментом, все же дал нечто значительное, благодаря вызванным им импульсам.

Если же стремиться сделать принцип ясным и наглядным, т. е. связать его с другими привычными нам представлениями и принципами, то выводы Майера, которые покоятся на мысли, что ни одно действие в природе не теряется, все еще являются лучшими в этом роде. Не следует недооценивать их значения; ибо если мы не ошибаемся, то та сравнительно чрезвычайная быстрота и легкость, с которой закон столь огромного значения, как закон сохранения энергии, после преодоления первых трудностей стал достоянием умов, объясняется не только многими отдельными индуктивными доказательствами, но большей частью также и представлением о его внутренней связи с законом причины и действия. Если мы поэтому и не приписываем философским рассуждениям Майера какой-либо силы физического доказательства, то все же нравственно они чрезвычайно важны, поскольку они облегчают обзорные всего содержания принципа и дают таким образом руководящие идеи, на основании которых мы должны ставить вопросы природе.

Иногда любят противопоставлять несколько неопределенно философствующему Майеру его партнера Джоуля, как более трезвого, придерживающегося отдельных фактов,

строгаго эмпирика. Но как было бы мыслимо, чтобы Джоуль проводил свои знаменитые опыты с таким неутомимым усердием и таким упорным терпением, посвятив часть своей жизни ответу на этот единственный вопрос, — как было бы это мыслимо, если бы он уже заранее при своих первых экспериментах, которые сами по себе еще не дают права на столь великодушное обобщение, не был бы одушевлен новой идеей и не охватил бы ее сразу же во всей ее всеобщности. Впрочем, уже хорошо известно, что заслуги Майера в новое время вполне оценены и признаны нашими наиболее талантливыми людьми науки<sup>1</sup> (в Англии они были впервые представлены в истинном свете Тиндалем<sup>2</sup>).

Правда, теперь уже является твердо установленным фактом, что Майер, по крайней мере в первое время его публичного выступления, не имел почти никакого влияния на распространение и развитие нового принципа; этот принцип, вероятно, и без него также быстро развивался бы, поскольку почти одновременно и совершенно независимо как от Майера, так и друг от друга те же идеи всплывали в различных формах и с различным обоснованием.

24 января 1843 г. Джеймс Прескотт Джоуль (повар из Сальфорда) доложил Манчестерскому философскому обществу свое исследование о связи между термическими и химическими действиями гальванического тока<sup>3</sup>. На основании результатов двух предыдущих работ<sup>4</sup> он пришел к убеждению, что количество теплоты, произведенное током в замыкающей цепи, тождественно с тем количеством теплоты, которое может быть получено непосредственным окислением действующих в цепи металлов, включая водород; благодаря этому у него составилось мнение, что вообще

---

<sup>1</sup> H. v. Helmholtz, Robert Mayers Priorität. Vorträge und Reden I, Braunsch. 1884, p. 60. R. Clausius, Über das Bekanntwerden der Schriften Robert Mayers. Wied. Ann. 8, Anhang, 1879.

<sup>2</sup> J. Tyndall, On force. Proc. of Roy. Inst. June 6, 1862. Phil. Mag. (4) 24, p. 57, 1862.

<sup>3</sup> J. P. Joule, On the heat evolved during the electrolysis of water. Mem. of the liter. and phil. soc. of Manchester, (2) vol. VII, 1846, p. 87 u. 96.

<sup>4</sup> J. P. Joule, On the heat evolved by metallic conductors of electricity and in the cells of a battery during electrolysis, Phil. Mag. (3) 19, p. 260, 1841.

J. P. Joule, On the electric origin of the heat of combustion. Phil. Mag. (3) 20, p. 98, 1842.

химическая теплота имеет существенно электрическое происхождение. Представляет глубокий интерес проследить, как у Джоуля из первоначально еще несколько неопределенных представлений в результате осторожного, шаг за шагом, развития постепенно вырабатывается вполне ясное понимание значения общего принципа. Лишь в вышеуказанном исследовании, в котором выводится и подтверждается закон, что тепловые действия тока эквивалентны химическим тепловым действиям (см. впрочем также опыты Беккереля) <sup>1</sup>, впервые встречается более общее замечание, что в природе не происходит уничтожения (annihilation) силы, производящей работу (power), без соответствующего действия (effect). Одновременно высказывается предположение, что если бы заставить ток выполнять работу, например, включая электромагнитную машину, то в этом случае произведенная теплота по сравнению с химическим действием должна была бы уменьшиться, а именно пропорционально произведенной работе <sup>2</sup>.

Эта мысль дала повод Джоулю к отдельному исследованию, результат которого он сообщил 21 августа того же года физико-математической секции заседавшей тогда в Корке Британской ассоциации: о тепловых действиях электромагнетизма и о механическом эквиваленте теплоты <sup>3</sup>. В этой работе Джоуль сначала разъясняет свои воззрения о природе теплоты и в частности о процессах, происходящих в гальванической цепи. Он объявляет теплоту родом движения, которое состоит в колебаниях, и высказывает убеждение, что в гальванической цепи имеет место не возникновение (generation), а только распределение (arrangement) теплоты. Так, теплота, развивающаяся в гидрорезистивном токе, возникает из сгорания в элементе, а теплота, образующаяся в магнитоэлектрическом токе, т. е. в токе, произведенном движением магнитов, возникает из затраченной механической работы; количество этой теплоты столь же велико, как и в том случае, если бы сгорание или работа давали теплоту непосредственно.

---

<sup>1</sup> E. Becquerel, Des lois du dégagement de la chaleur pendant le passage des courants électriques à travers les corps solides et liquides. Compt. Rend., t. 16, p. 724, 1843.

<sup>2</sup> l. c. p. 96 u. 104.

<sup>3</sup> Joule, On the calorific effects of magneto-electricity and on the mechanical value of heat. Phil. Mag. (3) 23, p. 263, 347, 435, 1843.

Эти утверждения оправдываются опытом. Для этой цели Джоуль при помощи падающих грузов заставил вращаться вокруг вертикальной оси между двумя сильными магнитными полюсами индукционную спираль, находившуюся в наполненной водой и служившей калориметром горизонтальной стеклянной трубке, и сравнил теплоту, произведенную в спирали индукционным током, с механической работой, совершенной грузами. Оказалось, что нагреванию произвольного количества воды на  $1^{\circ}$  Фаренгейта соответствует поднятие 838-кратного количества воды на 1 английский фут, или же поднятию однократного количества воды на 838 футов. Для одной калории Цельсия это означает поднятие одного килограмма на 460 м.

С другой стороны, Джоуль измерял также и непосредственное превращение механической работы в теплоту, а именно посредством трения, которое получается при продавливании воды через узкие трубки. Для механического эквивалента теплоты, отнесенного к градусам Фаренгейта, получилось на этот раз 770 футов (для градусов Цельсия 423 м).

Учитывая многие источники ошибок, Джоуль считал оба найденных числа совпадающими настолько, что можно считать обоснованным утверждение, которое выдвинул также и Майер: основные силы природы неуничтожаемы, и повсюду, где сила затрачивается, возникает соответствующее этой затрате количество теплоты. С этой точки зрения он объяснил также и скрытую теплоту и теплоту, производимую химическими процессами. Скрытая теплота также представляет собой силу, как и тяжесть; она может в известном случае превращаться в действительную теплоту, как заведенные часы в состоянии каждое мгновение совершать механическую работу.

Первые работы Джоуля не встретили особого признания. Наоборот, большинство физиков в основном отклоняли изложенные здесь воззрения. Главное основание для этого следует искать в общем недоверии, которое тогда господствовало в естественно-научных кругах по отношению ко всему, что сколько-нибудь походило на натурфилософию. Но в том же году, в котором появились первые работы Джоуля, 1 ноября 1843 г. датский инженер А. Кольдинг сообщил Копенгагенской академии в „Тезисах о силе“ о своих опытах, согласно которым теплота, развивающаяся при тре-

нии твердых тел, находится в постоянном отношении к затраченному количеству работы<sup>1</sup>; одновременно он высказал положение, что закон сохранения силы имеет всеобщее значение. Он пришел к этому принципу так же, как и Майер, в результате дедуктивных рассуждений, которые, однако, далеко уходили в область метафизики; он исходил из воззрения, что силы природы являются духовными и нематериальными сущностями и как таковые не могут исчезать; поэтому он называет силу бессмертной.

В результате длинного ряда опытов над трением различных твердых тел он нашел в качестве механического эквивалента теплоты, отнесенного к градусам Цельсия и датскому футу, число 1185,4 (примерно, 370 м).

К этому же периоду относится и четвертое вычисление механического эквивалента теплоты, произведенное Гольцманом<sup>2</sup>. Идя в основном тем же путем, как и Майер, он нашел, что количество теплоты, повышающее температуру килограмма воды на 1° С, в состоянии подвять 374 кг на 1 м. Вместе с тем необходимо отметить, что Гольцман ни в какой мере не был сторонником механической теории теплоты и вовсе не допускал исчезновения теплоты; наоборот, он твердо держался вещественной теории и защищал положение о неизменности теплового флюида<sup>3</sup>.

Тем временем и неутомимый Джоуль продолжал свои опыты над измерением теплового эквивалента совершенно новыми методами. Сначала он сравнил затраченную при сжатии воздуха механическую работу с повышенным температурой сжимаемого воздуха и вновь нашел, что они пропорциональны друг другу<sup>4</sup>. Что это повышение температуры вызывается именно затратой внешней работы, а отнюдь не изменением теплоемкости воздуха, он доказал осо-

<sup>1</sup> A. Colding, Det kongel. danske vidensk. selsk. naturv. og math. afh. (5) II, 1843, p. 121, 167. On the history of the principle of the conservation of energy, Phil. Mag. (4) 27, p. 56, 1864.

<sup>2</sup> C. Holtzmann, Über die Wärme und Elastizität der Gase u. Dämpfe, Mannheim 1845. Auszug in Pogg. Ann. Erg. II, p. 183, 1848.

<sup>3</sup> C. Holtzmann, Über die bewegende Kraft der Wärme. Pogg. Ann. 82, p. 445, 1851.

R. Clausius, Erwiderung auf die Bemerkungen des Herrn C. Holtzmann, Pogg. Ann. 83, p. 118, 1851.

<sup>4</sup> Joule, On the changes of temperature produced by the rarefaction and condensation of air. Phil. Mag. (3) 26, p. 369, 1845.

бым опытом, выпуская сжатый до 22 ат воздух в эвакуированное (пустое) пространство. При этом в согласии с результатом, ранее полученным Гей-Люссаком, оказалось, что после наступления равновесия не происходит никакого уменьшения температуры, соответственно тому обстоятельству, что воздух при истечении не производит никакой внешней работы. Этот опыт весьма важен, ибо он доказывает то, что Майер раньше молчаливо принимал (стр. 33), а именно, что при изменении объема воздуха не совершается никакая внутренняя работа. Когда же он, напротив, предоставлял густому воздуху вытекать в свободную атмосферу, то при этом получалось уменьшение температуры, пропорциональное работе, произведенной при преодолении сопротивления. Отсюда Джоуль на основании различных серий опытов вычислил механический эквивалент теплоты и получил значение 823, а затем 795 футов для градусов Фаренгейта (соответственно 452 и 436 м для Цельсия).

Вскоре после этого появились и другие наблюдения <sup>1</sup>. На этот раз механическая работа превращалась в теплоту посредством трения. Колесо, снабженное лопастями, помещалось в ванне, наполненной водой; оно приводилось во вращение посредством падающих грузов и благодаря трению вызывало повышение температуры воды. При этом тепловой эквивалент оказался равным 890 (488 м для Цельсия), между тем число, полученное при продавливании воды через узкие трубки, составляло 774 (425 м для Цельсия).

Сравнительно хорошее согласие этих результатов побудило Джоуля опубликовать короткую сводку с изложением всех своих подтвердившихся на опыте воззрений о законах получения силы посредством механических, химических, гальванических, электромагнитных и термических действий, а также посредством совершения работы животными <sup>2</sup>.

В то время как росло число работ, которые на основании нового взгляда о сущности теплоты содействовали

---

<sup>1</sup> Joule, On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power. Phil. Mag. (3) 27, p. 205, 1845.

<sup>2</sup> Scoresby and Joule, Experiments and observations on the mechanical powers of electromagnetism, steam and horses. Phil. Mag. (3) 28, p. 448, 1846.

применению принципа сохранения силы, и пока непрерывно повторявшиеся и варьиовавшиеся опыты Джоуля постепенно обратили на себя внимание специалистов, понятие энергии с разных сторон проникло в другие отрасли естествознания.

Сюда можно отнести исследования Неймана (1845 и 1847 гг.) о законах индуцированных токов, которые привели к результату, что гальваническая индукция в проводнике зависит только от изменения электродинамического потенциала индуцирующей системы токов на проводник, безразлично, зависит ли это изменение от относительного движения весомых частей проводника и системы токов или же от изменения силы токов<sup>1</sup>. Правда, в обоих сочинениях Неймана, рассматривающих этот предмет, внутренняя связь его положения с нашим принципом еще явно не выступает.

Новые идеи были перенесены также и на область органической природы. Либих, исходя из убеждения, что паровая машина не может доставить теплоты больше, чем она вначале получила от котла, и что гальванический ток цепи производит теплоты не больше, чем может быть получено путем обыкновенной химической реакции превращающихся в элементе веществ, энергично защищал положение, что и теплота, произведенная животным организмом, полностью может быть получена прямым путем в результате сгорания средств питания<sup>2</sup>. Правда, при этом он натолкнулся на ту трудность, что произведенные Дюлонгом и Дебре калориметрические опыты по измерению количества теплоты, отданной телом животных, дали слишком большие численные значения. Непосредственная теплота сгорания соответствующих количеств водорода и углерода оставляла лишь от 70 до 90% теплоты, действительно отданной животным. Правильное объяснение этого обстоятельства было дано Гельмгольцем, который подчеркнул, что нельзя непосредственно

<sup>1</sup> Franz Ernst Neumann, Allgemeine Gesetze der induzierten Ströme. Abh. d. kgl. Akad. d. Wiss., Berlin 1845, Pogg. Ann. 67, p. 31, 1846.

F. Neumann, Über ein allgemeines Prinzip der mathematischen Theorie induzierter elektrischer Ströme. Abh. d. kgl. Akad. d. Wiss., Berlin 1847. G. Reimer 1848.

<sup>2</sup> J. Liebig, Über die tierische Wärme. Lieb. Ann. 53, p. 63 1845.

сравнивать теплоту, полученную в результате сгорания средств питания, и теплоту сгорания содержащихся в них химических элементов <sup>1</sup>.

В указанном сочинении Гельмгольца мы одновременно находим краткий обзор различных следствий, полученных при последовательном проведении „Принципа постоянства эквивалентной силы при возбуждении одной силы природы другой силой“ в различных областях физики и соответствовавших тогдашнему уровню исследования. Правда, что касается превращения механической работы в теплоту, то Гельмгольц еще не занимается механическим эквивалентом теплоты, хотя он, исходя из оснований, о которых мы говорили выше, уже стал на сторону теории движения против вещественной теории. Но он уже упоминает о законе постоянства количества теплоты при химических реакциях, независимо от пути, по которому происходит соединение. Что касается процессов, происходящих в постоянных гидроэлектрических токах, то закон Ома вместе с законом Ленца (Джоуля) об образовании теплоты в цепи и электролитическим законом Фарадея приводит к положению, что вся теплота, произведенная в цепи, эквивалентна величине электрохимического обмена в цепи, независимо от его порядка, а именно, что эта теплота равна произведению разрядившегося количества электричества на его плотность (теперь лучше сказать — на его напряжение).

Эти рассуждения, далее, развиты и изложены в более систематической форме в сочинении Гельмгольца, появившемся в свет вслед за предыдущим, в котором впервые было выяснено, исходя из уровня тогдашнего развития физики, универсальное значение принципа сохранения силы для всех явлений природы; это изложение дано в виде сжатого обзора.

23 июля 1847 г. Герман Гельмгольц прочел на заседании Берлинского физического общества доклад о принципе сохранения силы <sup>2</sup>. В этом термине, как и в других употребляемых им выражениях: „живая сила“ и „сила

<sup>1</sup> H. Helmholtz, Fortschr. d. Phys. v. J. 1845, p. 346, Berlin 1847. Wiss. Abh. I, p. 8.

<sup>2</sup> H. Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft., Berlin, Reimer 1847. Wiss. Abh. I p. 12.



напряжения“, Гельмгольц примыкает так же, как и Майер, к лейбницевому понятию силы, хотя в остальном он сохраняет принятую в науке терминологию Ньютона. Для трактовки принципа Гельмгольцем характерно то, что он, полностью стоя на позиции механического мировоззрения, рассматривает принцип, как непосредственное сообщение механического закона сохранения живой силы (стр. 17 и след.). Введение к этой работе содержит ряд дедуктивных рассуждений, из которых вытекает, что целью физических наук является сведение явлений природы к движениям отдельных материальных точек, действующих друг на друга с притягивающими или отталкивающими силами, зависящими определенным образом от их расстояний. Что при этом допущении можно вывести с помощью ньютоновых аксиом принцип сохранения живой силы, этому учит механика; но Гельмгольц также показывает и обратное, что можно вместо этого исходного пункта принять в качестве совершенно равнозначущего и тот пункт, который уже Карно и Клапейрон сделали основой своих теорий, а именно, невозможность *perpetuum mobile*. В применении к механическим процессам природы Гельмгольц высказывает это положение следующим образом: „Представим себе систему известным образом расположенных друг относительно друга тел, которые начинают двигаться под влиянием сил взаимодействия до тех пор, пока они не придут в другое определенное положение; приобретенные ими скорости мы можем рассматривать, как результат определенной механической работы (можно эти скорости вновь превратить в работу). Если мы хотим теперь заставить действовать силы вторично для того, чтобы еще раз получить ту же самую работу“ (и таким образом получить периодически работающую машину), „то мы должны эти тела вновь вернуть к начальным условиям путем приложения к ним других сил, находящихся в нашем распоряжении; для этого мы должны опять затратить известное количество работы этих последних сил. В данном случае то количество работы, которое получается, когда тела системы переходят из начального положения во второе, и количество работы, которое затрачивается при их обратном переходе из второго положения в первое, всегда одно и то же, каким бы способом, по какому бы пути, или с какой бы скоростью этот переход ни был совершен“.

В математической форме этот закон выражается в виде принципа живой силы. Этот принцип вместе с допущением, что все силы сводятся к силам, действующим между точками, ведет тогда с помощью ньютоновых аксиом к тому следствию, что элементарные силы являются силами центральными, т. е. действуют притягивающим или отталкивающим образом с интенсивностью, зависящей только от расстояния; это допущение и есть как раз то, из которого исходили выше, в первом случае.

Преобразование принципа живой силы, предпринятое Гельмгольцем для того, чтобы превратить его в принцип сохранения силы, заключается в том, что в уравнение, выражающее соотношение живой силы  $L$  и работы  $A$ , произведенной действующими силами ( $L = A + \text{const}$ ), он вводит вместо понятия работы  $A$  понятие количества сил на напряжения  $U$ , равное и противоположное по знаку величине работы  $A$ . Сила напряжения, так же как и работа, зависит только от мгновенного состояния системы, и вышеуказанное уравнение можно формулировать следующим образом: сумма количеств живой силы и силы напряжения остается неизменной во времени:  $L + U = \text{const}$ . Если мы эту сумму коротко обозначим, как силу, заключенную в системе, то тем самым мы получим закон сохранения силы.

Как ни незначительным кажется на первый взгляд это преобразование, — перспектива, которую оно открывает во всех областях физики, чрезвычайно велика; ибо возможность его обобщения для любых явлений природы легко бросается в глаза. Главное основание для такого обобщения заключается в том, что принцип сохранения силы выступает параллельно с давно уже нам известным и, так сказать, перешедшим в инстинкт, принципом сохранения материи. Так же, как количество содержащейся в системе тел и измеряемой их весом материи не может быть никакими средствами уменьшено или увеличено, какие бы различные физические и химические превращения ни происходили в системе, так и количество содержащейся в системе силы представляет собой самостоятельную, совершенно неизменяемую величину. Сила, так же как и материя, может быть представлена в многообразных формах, но прежде всего она проявляется в двух основных формах: как живая сила и как сила напряжения; обе эти формы могут высту-

пать различным образом; живая сила — как видимое движение, как свет, как теплота; сила напряжения — как поднятие тяжести, как упругое напряжение, как электрическое напряжение, как химическая разность и т. д. Но сумма всех этих запасов сил, некоторым образом накопленных в различных хранилищах, остается неизменно одной и той же, и все процессы природы состоят лишь в переносе одних форм в другие.

Представление Гельмгольца существенно отличается от взглядов Майера тем, что последний принимает ряд качественно различных форм силы, как движение, тяжесть, теплота, электричество и т. д., между тем как Гельмголец, соответственно его механическому мировоззрению, объединяет все разнообразные формы явлений в двух понятиях — живой силы и силы напряжения, — что является дальнейшим шагом к упрощению наших представлений о всех явлениях природы.

Для того чтобы применить принцип к любому процессу, протекающему в системе тел, необходимо лишь выразить все различные виды живой силы и силы напряжения в какой-либо момент времени и найти их сумму. Эта сумма представляет тогда всю силу, присущую системе, и не меняется со временем, поскольку исключается какое-либо внешнее воздействие. Разумеется, все отдельные члены этой суммы, стало быть, все отдельные количества силы должны измеряться одной и той же мерой; но поскольку мы измеряем в физике различные виды сил, как, например, живую силу видимого движения, теплоту и т. д., различными условными мерами, то необходимо при суммировании свести каждый вид силы к общей механической мере, т. е. установить их механический эквивалент, — а здесь-то и лежит известная трудность, с самого начала противостоящая применению принципа; общего правила, которое бы позволяло наперед, независимо от принципа, вычислить в каждом случае значение эквивалента, не существует. На самом деле, мы уже неоднократно видели, что применение принципа при пользовании неверными значениями эквивалента приводило к ошибочным заключениям; поэтому значение соответствующего эквивалента необходимо найти для каждого вида силы в отдельности, а это может быть сделано лучше всего путем применения принципа к наиболее простому и легко обозримому случаю.

Интересно с этой точки зрения проследить за ходом мыслей Гельмгольца при рассмотрении им различных физических явлений в их связи с принципом сохранения силы.

Сначала он рассматривает область механики в более узком смысле слова, для которой, как уже упомянуто, общий принцип выражается в виде известного закона живой силы. Этому закону подчиняются движения, происходящие под действием всеобщей силы тяготения, движения несжимаемых твердых и жидких тел, поскольку живая сила видимого движения не теряется вследствие трения или неупругого удара, наконец, движения идеально упругих твердых и жидких тел; кроме того, сюда следует причислить еще явления звука, света, а также и теплового излучения, поскольку при этих явлениях не происходит уничтожения движения вследствие абсорбции.

Во всех остальных случаях, согласно закону сохранения силы, потерянная живая сила должна проявиться в какой-либо другой форме; и в самом деле, при абсорбции тепловых лучей она проявляется в виде теплоты, при абсорбции световых лучей, тождество которых с тепловыми и химически действующими лучами Гельмголец уже признал, — в виде света (фосфоресценция) или теплоты, или же химического действия. Точно так же и при потере силы в случае удара неупругих тел или трения принцип сохранения силы требует возмещения ее в какой-либо другой форме, и это возмещение Гельмголец находит частью в изменении молекулярного строения трущихся или соударяющихся тел, сопровождающемся увеличением количества внутренних сил напряжения, частью в акустических и электрических действиях, но главным образом, в термических действиях. Он заключает, что согласно принципу сохранения силы, во всех случаях трения, не сопровождающихся молекулярными изменениями, электрическими явлениями и т. д., вместо потерянной механической силы каждый раз должно возникнуть определенное количество теплоты, эквивалентное затраченной работе; при этом он цитирует первые опыты Джоуля, методы измерения в которых были еще слишком не точны, чтобы заслужить полное доверие. (Работы Р. Майера были тогда еще почти неизвестны.)

Он рассматривает также и воззрение Карно-Клапейрона, согласно которому теплота как таковая не уничтожается и поэтому производит механическую работу лишь

при переходе от более высокой температуры к более низкой, и обстоятельно доказывает его несостоятельность. За принятие абсолютного увеличения количества теплоты вследствие трения говорили уже опыты Деви (стр. 28), и к такому же заключению вынуждало явление образования теплоты при движении электричества, а именно, при зарядке банки электрофором или при возбуждении тока магнитом. Таким образом отсюда следует, что теплота заключается не в существовании вещества, а в его изменениях или движениях, так что „количество теплоты, содержащейся в теле, может быть рассматриваемо, как сумма живой силы теплового движения (свободная теплота) и количества той силы напряжения в атомах, которая при изменении их расположения может вызвать тепловое движение (скрытая теплота, внутренняя работа)“.

Что касается образования теплоты при химических процессах, то Гельмгольц приводит высказанное Гессом положение (стр. 30) о том, что при химическом соединении всегда образуется одинаковое количество теплоты, в каком бы порядке и через какие бы промежуточные ступени ни происходил процесс соединения. Правда, это положение возникло первоначально из представления о неизменности теплового вещества, но оно оказывается также и следствием принципа сохранения силы.

Затем следует рассмотрение действий теплоты, из которых, главным образом, исследуется образование механической силы. Здесь упоминаются опыты Джоуля (стр. 41), в которых сжатый воздух выпускался сначала в атмосферу, а затем в эвакуированный сосуд. В первом случае, соответственно работе, произведенной при преодолении сопротивления воздуха, происходит понижение температуры воздуха, между тем как в последнем случае нельзя установить никакого изменения температуры. В заключение обсуждаются теоретические исследования Клапейрона и Гольцмана.

Значительную часть исследования занимают применения принципа к электричеству и магнетизму, большей частью появившиеся здесь впервые. Сначала рассматриваются статическое электричество, действия которого подразделяются на механические (движение электричества вместе с проводниками) и термические (движение внутри проводников); при этом Гельмгольц пользуется механической или,

как се теперь называют, электростатической системой единиц. Значение количества электрических сил напряжения получается из суммы потенциалов различных находящихся в рассматриваемой системе электрически заряженных тел друг на друга и на себя самих. Гельмгольц пользуется здесь определенным потенциалом, несколько отличным от обычно употребляемого в настоящее время, а именно, во-первых, он его берет с противоположным знаком и, кроме того, приписывает потенциал заряда на самого себя вдвое большим, чем это делают теперь. Если, следовательно, в результате действия электричества возникает живая сила (видимого движения или теплоты), то ее величина измеряется уменьшением электрической силы напряжения. Если при электрическом разряде производится только теплота, то последняя равна возмещению (теперь — уменьшению) полного электрического потенциала. Отсюда для батарей, наружная обкладка которых соединена с землей, следует закон, что теплота разряда пропорциональна квадрату разрядившегося количества электричества и обратно пропорциональна величине емкости батарей, независимо от формы замыкающего проводника; этот закон был в основном подтвержден опытами Рисса. Кроме того, благодаря пользованию механической системой мер, в выражение теплоты разряда, в знаменатель, входит еще в качестве множителя механический эквивалент теплоты.

Переходя к гальванизму, Гельмгольц излагает сначала обе противостоящие друг другу гипотезы о причине гальванического тока, — контактную теорию и химическую теорию; первая ищет место возбуждения тока в поверхности соприкосновения металлов, вторая — в химических процессах в цепи. Гельмгольц находит эквивалент работы, совершенной гальваническим током, в произведенном им химическом разложении проводников второго класса, из чего следует, что если бы существовал хотя бы один проводник второго класса, который не разлагается током, то контактная теория вступала бы тогда в противоречие с принципом сохранения силы. Возражения против контактной теории, вытекающие из этого допущения, уже были нами упомянуты выше (стр. 30 и сл.). Если же заранее рассматривать каждый проводник второго класса как электролит, то допущение контактной силы не только не содержит никакого противоречия, но дает также простое и удобное пред-

ставлены о сущности электрического напряжения, ибо можно себе представить, что различные металлы действуют на электричество с различными силами притяжения. В состоянии равновесия электрическое напряжение должно быть тогда равно разности живых сил, которые единица электричества приобрела бы благодаря этим силам притяжения при переходе внутрь каждого из этих металлов; следовательно, напряжение должно быть независимо от величины и формы поверхности соприкосновения. В таком случае непосредственно получается, что закон напряжения справедлив и для ряда последовательно связанных металлов, ибо тогда электрическое напряжение между первым и последним металлом не зависит от металлов, расположенных между ними.

Гельмгольц сначала рассматривает такие гальванические цепи, в которых происходит только химическое разложение, но не поляризация. Исходя из закона Ома для силы тока и закона Ленца для образования теплоты, он из равенства электрической и химической теплоты получает, что электродвижущая сила элемента (Даниеля, Грове) равна разности количеств теплоты, которые выделяются при окислении эквивалентов обоих металлов и растворении окиси в кислоте. Отсюда также следует, что все цепи, в которых происходят одинаковые химические процессы, обладают одинаковой электродвижущей силой; соответствующие опыты были проделаны Поггендорфом.

Затем привлекаются к рассмотрению также и цепи с поляризацией, сначала такие, в которых имеет место только поляризация, но нет сколько-нибудь заметного химического разложения. Здесь получаются непостоянные, скоро исчезающие токи, служащие по существу лишь для установления электрического равновесия между жидкостями и металлами. Если поляризация первоначально одинаковых пластин вызывается внешними электродвижущими силами, то, выключая поляризующие силы, можно вновь получить потерянную при этом силу первоначального тока в виде вторичного тока (тока деполяризации). Если явления поляризации и химического разложения имеют место одновременно, то можно возникший ток разделить на две части — на ток поляризации и на ток разложения, и обе эти части рассмотреть в отдельности предыдущим способом. Но теплота, возникающая во всей цепи, — независимо от того,

пропорционально ли ее количество квадрату силы тока, или, как допускает также Гельмгольц, оно следует в известных местах другому закону, — эта теплота всегда тождественна той теплоте, которая вызывалась бы в результате происходящих в элементах химических процессов, если бы они протекали обычным путем, не образуя электричества.

Если, таким образом, источником гидроэлектрических токов следует считать химические процессы, то эквивалент силы, вызываемой термоэлектрическими токами, Гельмгольц находит в открытых Пельтье действиях таких токов в местах спая двух металлов; именно, принцип сохранения силы требует, чтобы теплота, возникающая внутри проводников, была равна полному количеству теплоты, поглощенному в местах спая. В качестве следствия из этого допущения получается между прочим положение, что действие Пельтье на месте спая пропорционально силе тока и что электро-термическая сила термической цепи возрастает в том же отношении, как и теплота, поглощаемая в обоих местах спая единицей силы тока.

Затем Гельмгольц рассматривает силовые действия магнетизма точно таким же образом, как и действия статического электричества. Магнитная сила напряжения измеряется аналогично определенным магнитным потенциалом магнитов друг на друга и на самих себя, и простотой этой величины дает возрастание живой силы. При этом следует различать постоянный магнетизм от магнетизма, изменяющегося благодаря индукции. В первом случае, при постоянных стальных магнитах, потенциал магнита на самого себя есть величина постоянная, следовательно, он может быть совсем опущен; напротив, при индуцированном магнетизме этот потенциал является переменным. Гельмгольц ограничивается при этом рассмотрением таких тел (из мягкого железа), в которых магнетизм индуцирован до предела (до полного насыщения), т. е. таким образом, что магнитный поверхностный заряд, которым всегда можно заменить внутреннее распределение магнетизма, расположен по такому же точно закону, как и поверхностное распределение электричества в электрически индуцированном, первоначально незаряженном изолированном проводнике. Это допущение, как известно, содержится в качестве специального случая в теории магнитной индукции Пуассона.



Переходя к явлениям электромагнетизма и принимая за основу законы Ампера и Пеймана об электродинамических действиях, Гельмгольц применяет принцип сохранения силы к замкнутым токам. Если постоянный магнит движется под влиянием гидроэлектрического тока, протекающего в неподвижном проводнике, то в качестве эквивалентных сил следует принять в расчет следующие силы: 1) живую силу движения магнита, 2) теплоту, выделенную током в цепи, и наконец, 3) химическую работу, произведенную в элементах. Алгебраическая сумма этих эквивалентов должна обладать значением, не меняющимся во времени, ее изменение во времени, следовательно, равно нулю. Живая сила магнита, приобретенная им за элемент времени  $dt$  с помощью потенциала тока на магнит  $J \cdot V$  (ток  $J$ , согласно Амперу, может быть заменен магнитным двойным слоем), равна  $J \cdot \frac{dV}{dt} \cdot dt$ ; далее, теплота, образующаяся в цепи за то же время, равна  $J^2 \cdot W \cdot dt$  ( $W$  — сопротивление); наконец, потребленная химическая работа равна  $-A \cdot J \cdot dt$  ( $A$  — электродвижущая сила элемента); следовательно, мы получаем условие:

$$J \frac{dV}{dt} dt + J^2 W dt - AJ dt = 0,$$

или

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

Сравнивая эту формулу с законом Ома, мы получаем закон электромагнитной индукции, гласящий, что каждое изменение положения магнита индуцирует в замкнутом проводнике электродвижущую силу:  $-\frac{dV}{dt}$ , которая измеряется скоростью изменения потенциала магнита на проводник, обтекаемый единицей силы тока. Этот закон в основном согласуется с законом Неймана для электрической индукции, выведенным совсем другим путем, и отличается от него по форме лишь тем, что Нейман должен умножить изменение потенциала еще на неопределенную константу  $e$  для того, чтобы получить значение индуцированной электродвижущей силы, между тем как в выводе Гельмгольца эта константа получает определенное значение, зависящее

только от выбранных единиц измерения (в ныне употребляемой магнитной системе единиц она равна 1, а в системе, употреблявшейся тогда Гельмгольцем, она равна обратному значению механического эквивалента теплоты, ибо он измерял сопротивление тем количеством теплоты, которое производит единица силы тока за единицу времени).

Описанный способ прицепляя принцип сохранения силы приводит нас к принципиально важному соображению. Можно задать вопрос, вправе ли мы заранее принять в расчет различные эквиваленты сил именно таким образом, каким мы это сделали выше; можно ли считать, что в сумму сил входят только живая сила магнита, теплота, образующаяся в цепи, и химическая работа. По аналогии с предыдущими законами было бы естественно предположить, что потенциал  $J \cdot V$  тока на магнит можно так же рассматривать, как определенный вид силы, и присоединить в качестве члена к сумме различных эквивалентов сил, вследствие чего уравнение сохранения должно было бы содержать еще один добавочный член  $\frac{d(J \cdot V)}{dt} \cdot dt$ . Так же,

как в случае движения двух магнитов, магнитную силу напряжения считают определенным силовым эквивалентом и измеряют последний значением магнитного потенциала, так и в случае электромагнитных сил, столь тесно связанных с магнитными, возникает мысль ввести электромагнитную силу напряжения наряду с другими видами сил в качестве особого эквивалента. Правда, в этом случае принцип сохранения силы привел бы к следствию, который расходится с выведенным выше законом индукции, а также с опытом.

Правильный ответ на вопрос может лишь гласить, что фактически не существует никакого средства заранее, без помощи опыта, решить, следует ли считать электромагнитный потенциал особым видом силы, или нет (см. стр. 46). Только то обстоятельство, что принятие высказанного допущения при применении закона сохранения силы приводит к противоречию с опытом, оправдывает наше заключение, что и на самом деле не существует электромагнитной силы напряжения, между тем как магнитная сила существует, по крайней мере, если мы будем держаться современных представлений о магнетизме.

Отсюда следует, что часто высказывавшееся утверждение, будто электромагнитная индукция является непосредственным следствием принципа сохранения силы, не вполне верно. С таким же правом можно было бы, например, сразу приять, что ток, вступающий во взаимодействие с магнитом, ведет себя по отношению к нему совершенно так же, как постоянный магнит. Тогда при его движении сила тока осталась бы постоянной, химическая работа превратилась бы полностью в теплоту и принцип сохранения силы оправдался бы точно так же, как и в случае движения постоянного магнитного двойного слоя, находящегося во взаимодействии с магнитом. Замкнутая металлическая цепь вела бы себя так же индифферентно по отношению к магниту, как и по отношению к любому немагнитному телу; напротив, покоящийся постоянный магнит вызывал бы в переменном токе (текущем в неподвижном проводнике) известные индукционные действия.

Индукционные явления, стало быть, не могут быть выведены только из одного принципа сохранения силы, но должны опираться так же одновременно и на опыт, следовательно, они являются не следствием принципа самого по себе, но также следствием дальнейшего допущения, что не существует других видов сил, кроме принятых выше в расчет; но зато из этого допущения совершенно точно получается количественное определение этих сил.

Какое практическое значение имеют эти соображения, показывает применение принципа к взаимодействию двух токов. Здесь уравнение, данное Гельмгольцем, несовершенно; а именно оно содержит в качестве эквивалентных сил только живую силу движения проводников тока, произведенную в проводниках теплоту и потребленную химическую работу; между тем позднее оказалось, что существует также и электродинамический эквивалент силы, в настоящее время называемый электрокинетической энергией, измеряемой (отрицательным) потенциалом обоих токов друг на друга. Эта величина должна быть при составлении полного уравнения сохранения силы включена в качестве члена в сумму отдельных видов сил; лишь тогда это уравнение будет правильно.

Точно так же, как потенциал токов друг на друга, так и потенциал одного тока на самого себя дает вид силы, который, строго говоря, должен был бы быть учтен так же

и выше при вычислении электромагнитных действий (самоиндукция). Эти вопросы мы рассмотрим систематически в третьем разделе этой книги. Здесь же мы лишь еще раз подчеркнем, насколько важно при применении принципа сохранения силы введение правильного эквивалента силы для каждого отдельного явления.

Заключительная часть работы Гельмгольца содержит указание на процессы в органической природе, поскольку они могут быть приведены в связь с нашим принципом, в особенности на накопление химической силы напряжения у растений под влиянием химически действующих солнечных лучей, и на образование теплоты животным телом, о чем мы уже выше говорили; там же приводится и опровержение некоторых возражений против принципа.

Изложенное в великолепном плапе, охватывающее в малом объеме множество фактов и идей, часть которых разработана детально другими исследователями лишь по прошествии ряда лет, — это сочинение останется навсегда одним из замечательнейших и поучительнейших памятников в истории развития принципа сохранения силы.

Впечатление, которое эта работа произвела среди специалистов при своем появлении, не было сколько-нибудь значительным. Новый принцип был тогда как раз непопулярен; он требовал столь радикального преобразования всех физических воззрений, что принимали его вообще весьма холодно и большей частью отклоняли. Поэтому и получилось так, что это сочинение, ставшее впоследствии столь знаменитым, не получило вначале распространения в широких кругах (например, В. Томсон, по его собственному заявлению, ознакомился с ним лишь в 1852 г.). Нужно было действие еще некоторых стимулов, прежде чем произошел перелом в общем мнении.

Прежде чем перейти к изложению этих стимулов, мы уломяем здесь о критических замечаниях Клаузиуса по поводу сочинения Гельмгольца; первая часть их появилась в 1853 г. (когда, стало быть, победа принципа уже определлась) <sup>1</sup>. В этих замечаниях, с одной стороны, критически рассматриваются некоторые применения, которые Гельмголец сделал из принципа сохранения силы, в част-

---

<sup>1</sup> R. Clausius, Über einige Stellen in der Schrift von Helmholtz über die Erhaltung der Kraft. Pogg. Ann. 89, p. 568, 1853.

ности способ определения потенциала проводника на самого себя (стр. 49); затем разбирается вопрос о согласии с теорией опытов Рисса над действиями теплоты при электрическом разряде, а также вытекающая из теории независимость количества произведенной теплоты от природы замыкающей проволоки; далее, рассматривается воззрение Гольцмана об эквивалентности теплоты и работы; с другой стороны, выдвигается возражение против положения Гельмгольца (стр. 44), что сводимость сил природы к центральному силам (действующим от точки к точке в направлении соединяющей их линии с интенсивностью, зависящей только от расстояния) является необходимым следствием закона живой силы.

На эти замечания Гельмгольц обстоятельно возразил и в частности относительно последнего положения показал (неизменно опираясь на механическое мировоззрение), что его вывод зависит только от предположения, что реальные действия имеют свое полное основание в отношениях реальных предметов друг к другу <sup>1</sup>.

Положение точки относительно другой определяется только их расстоянием, а отсюда следует, что живая сила, если она зависит только от положения точки, тем самым может зависеть только от расстояния; это приводит тогда к допущению о центральных силах (подробнее об этом сказано в третьем разделе). Иначе дело обстоит, если вместо точки берется протяженный бесконечно малый элемент; здесь существуют в общем различного рода направления, и вполне мыслимо, что живая сила точки, движущейся под влиянием действующего элемента, имеет различные значения в зависимости от того, в каком направлении берется ее расстояние от элемента. Но Гельмгольц показывает, что если живая сила точки является произвольно заданной функцией ее координат, то действие элемента вполне можно заменить действием системы точек (с бесконечно многообразными способами их распределения), находящихся внутри или же на поверхности элемента и действующих на эту точку, как обычно, с центральными силами; таким образом и этот общий случай сводится к существованию центральных сил. Как известно, мы поль-

---

<sup>1</sup> H. Helmholtz, Erwiderung auf die Bemerkungen von Hrn. Clausius. Pogg. Ann. 91, p. 241, 1854. Wiss. Abh. I, p. 76.

зуюмся этим приемом, когда, например, мы представляем дальподействие элементарного магнита, как совместное действие двух полюсов, каждый из которых действует соответственно обычным центральным силам.

В заключение Гельмгольц дополняет осуществленное им ранее применение принципа к области магнетизма и электродинамики, кладя в основу теорию магнитной индукции Пуассона и собственные исследования о колебаниях индуцированных токов <sup>1</sup>. При этом он находит, что сохраняющийся гальванический ток сам по себе представляет эквивалент силы, пропорциональный квадрату своей интенсивности (электродинамический потенциал на себя самого). Когда ток прерывается, то этот запас силы превращается в теплоту либо непосредственно (искра при разряде), либо же опосредованным путем, через возникающий экстра-ток. Здесь же доказывается и согласие с принципом сохранения силы общего закона индукции магнитов или токов Неймана. После второго возражения Клаузиуса дискуссия была закончена <sup>2</sup>.

Возвращаясь опять к 1847 г., мы находим прежде всего еще одну новую работу Джоуля <sup>3</sup>, опубликовавшего ряд своих опытов по определению механического эквивалента теплоты; эти опыты относились к образованию теплоты при трении в жидкостях. Лопастное колесо из латуни или железа, погруженное в жидкость [вода, спермацетовое масло, ртуть], приводимое во вращение падающими грузами, и теплота, произведенная благодаря трению в жидкости, сравнивалась с затраченной работой. Отношение этих величин дало механический эквивалент теплоты в среднем в 430 килограмметров.

Постепенно увеличивалось количество тех исследователей, которые, следуя примеру Джоуля, принимали участие в дальнейшей разработке новой теории во вновь открывавшихся областях ее применения. Уже выше упомя-

---

<sup>1</sup> H. Helmholtz, Über die Dauer und den Verlauf der durch Stromesschwankungen induzierten elektrischen Ströme. Pogg. Ann. 83, p. 505, 1851. Wiss. Abh. I, p. 429.

<sup>2</sup> R. Clausius, Über einige Stellen d. Schrift v. Helmh. üb. d. Erh. d. Kr. Zweite Notiz, Pogg. Ann. 91, p. 601, 1854.

<sup>3</sup> Joule, On the mechanical equivalent of heat as determined by the heat evolved by the friction of fluids. Phil. Mag. (3) 31, p. 173, 1857. Pogg. Ann. 73, p. 479, 1848.

путый Сеген старший, еще более уверенный в правильности своих воззрений на сущность теплоты, также вычислил механический эквивалент теплоты, измеряя охлаждение водяного пара (от 180 до 80° C), происходящее вследствие совершения паром работы при расширении <sup>1</sup>. Средний результат оказался равным 449 килограммометрам.

Далее, следует здесь упомянуть также и о работах Грове <sup>2</sup>, который, исходя из механического мировоззрения, в течение долгого времени занимался исследованием законов превращения различных сил природы друг в друга и затем объединил прочитанные им на эту тему в Лондоне, в Royal Institution, лекции в несколько более популярную книгу о родстве сил природы <sup>3</sup>; эта книга была переведена в 1856 г. Муано на французский язык и позднее неоднократно переводилась также и на немецкий <sup>4</sup>.

Заслуживает внимания то обстоятельство, что вместе с открытием механического эквивалента теплоты и развитием общего принципа сохранения энергии шла рука об руку выработка взгляда, согласно которому все явления природы покоятся на движениях; этот взгляд часто даже отождествлялся с общим принципом. Но, строго говоря, принцип учит лишь тому, что отдельные силы природы превращаются друг в друга в неизменных отношениях, но не позволяет делать какое-либо заключение о том способе, которым осуществляется это превращение. Следовательно, из справедливости принципа ни в коем случае нельзя вывести необходимость механического мировоззрения; между тем, наоборот, принцип оказывается необходимым следствием этого воззрения, по крайней мере, когда при этом исходят из центральных сил (стр. 44). Это последнее обстоятельство в связи с потребностью в создании единого представления о способе действия сил природы в достаточной мере объясняет факт столь быстрого и безогово-

<sup>1</sup> Séguin aîné, Note à l'appui de l'opinion émise par M. Joule, sur l'identité du mouvement et du calorique. Compt. Rend. 25, p. 420, 1847.

<sup>2</sup> W. Grove, Résumé de quelques leçons sur les rapports des divers agents ou forces physiques. L'Institut Nr. 750—753, 1848.

<sup>3</sup> W. Grove, The correlation of physical forces. 3. Aufl. 1855.

<sup>4</sup> W. Grove, Die Verwandtschaft der Naturkräfte, deutsch von E. v. Ruszdorf, Berlin 1863, von Schaper, Braunschweig 1871. Русский перевод книги В. Грове, Соотношение физических сил, вышел в 1863 г., пер. А. Валенского, и Ил. Мечникова.

рочного принятия механической теории, которая до сих пор на самом деле повсюду блестяще подтверждалась; в настоящее время я по меньшей мере не разделяю тех опасений, которые связывались с вопросом о всеобщей применимости этой теории, как якобы слишком узкого и ограниченного взгляда на явления природы <sup>1</sup>.

В то время как работы Джоуля постепенно приобретали заслуженное признание, в особенности в Германии, и уже начались даже споры о приоритете (между Майером <sup>2</sup>, Джоулем, Сегеном <sup>3</sup>, Кольдлингом <sup>4</sup>), наиболее выдающиеся физики Англии еще воздерживались от принятия новой теории в течение долгого времени. Правда, В. Томсон в своем сообщении Британской ассоциации в 1848 г. о теории электромагнитной индукции обращает внимание на тесную взаимосвязь, которая имеется между работой (work), затраченной на движение индуцирующего магнита, и интенсивностью возникшего благодаря этому движению тока <sup>5</sup>; но он все же остается при допущении, что благодаря индуцированному току теряется механический эффект определенной величины, и не задается при этом вопросом, чем эта потеря заменяется. Тем не менее он настолько ясно признавал значение и плодотворность принципа невозможности получить работу из ничего, что он снова принял теорию Карно, основанную на той же мысли, и, пользуясь новейшими данными наблюдения, а именно данными Реньо, применил ее к вычислению движущей силы тепловых машин <sup>6</sup>. О трудностях, на которые он натолкнулся, мы уже упоми-

---

<sup>1</sup> E. Mach, Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Prag. 1872. Calve.

<sup>2</sup> R. Mayer, Sur la transformation de la force vive en chaleur et réciproquement. Compt. Rend. 27, p. 385, 1848 etc.

<sup>3</sup> Séguin aîné, Note à l'appui de l'opinion émise par M. Joule, sur l'identité du mouvement et du calorique. Compt. Rend. 25, p. 420, 1847.

<sup>4</sup> A. Colding, Det kongel. danske vidensk. selsk. naturv. og math. afh. (5) II, 1843, p. 121, 167.

On the history of the principle of the conservation of energy Phil. Mag. (4) 27, p. 56, 1864.

<sup>5</sup> W. Thomson, Report of the 18. Meeting of the British Association for the adv. of sc. Notices and abstr. of communic., p. 9, 1848. On the theory of electromagnetic induction.

<sup>6</sup> W. Thomson, An account of Carnots theory of the motive power of heat. Transact. of the Roy. Soc. of Edinburgh, vol. XVI. 541, 1849.



наил выше (стр. 27); во всяком случае он не считал невозможным их преодоление на этом пути. Так как впрочем старая теория Карно все же отчасти покоилась на правильной основе, то некоторые следствия ее оказались в согласии с опытом, например, заключение, сделанное Дж. Томсоном<sup>1</sup> и затем экспериментально подтвержденное В. Томсоном<sup>2</sup>, что внешнее давление понижает точку замерзания воды.

Тем временем Джоуль продолжал свои работы с железной выстойчивостью и все более точными методами. Если в первую очередь он должен был доказать существование механического эквивалента теплоты, т. е. постоянство численного отношения между работой и теплотой в разнообразнейших процессах их превращения, то теперь, опираясь на свои многосторонние опыты, он стремился найти возможно более точное значение этого эквивалента. Из всех ранее использованных им методов, он выбрал в качестве наиболее достоверного метода получение теплоты при помощи движения лопастного колеса в воде или ртути или же путем трения чугунных дисков друг о друга; таким образом из многочисленных опытов он определил, с учетом по возможности всех мыслимых источников ошибок, механический эквивалент единицы теплоты в 772 футофунта (относительно английского фунта и градуса Фаренгейта ртутного термометра), или, относя единицу теплоты к килограмму и градусу Цельсия, в 423,55 килограмметра<sup>3</sup>; это число с учетом лежащих в его основе единиц может быть еще и теперь рассматриваемо, как одно из наиболее достоверных значений этой важной константы (ср. ниже в третьем разделе).

Если принцип эквивалентности работы и теплоты, по мере успеха работ Джоуля, все больше завоевывал признание, то все же до этого времени ни с чьей стороны не была предпринята попытка положить этот принцип

---

<sup>1</sup> J. Thomson, Theoretical considerations on the effect of pressure in lowering the freezing-point of water. Trans. Roy. Soc. Edinburgh XVI, p. 575, 1849.

<sup>2</sup> W. Thomson, The effect of pressure in lowering the freezing-point of water experimentally demonstrated. Phil. Mag. (3) 37, p. 123, 1850. Pogg. Ann. 81, p. 163, 1850.

<sup>3</sup> J. P. Joule, On the mechanical equivalent of heat. Phil. Trans., London 1850, p. 61.

в основу столь же обстоятельной теории теплоты, какой была теория Карно. Рудольфу Клаузиусу выпало на долю обогатить науку такой теорией.

В появившейся незадолго до того работе <sup>1</sup> он исходит еще из допущения, что теплота является неуплотжаемым веществом. После этого Клаузиус опубликовал в 1850 г. в „Анналах физики“ (Annalen der Physik) Погендорфа работу о движущей силе теплоты, в которой он в согласии с идеями, разбросанными в сочинениях Гельмгольца и Джоуля, разработал основные мысли об эквивалентности теплоты и работы <sup>2</sup>. Эту основную мысль он высказывает в следующем положении: „Во всех случаях, в которых работа возникает при помощи теплоты, затрачивается количество теплоты, пропорциональное произведенной работе, и обратно, путем затраты такого же количества работы производится то же самое количество теплоты“. Этим уточнена теория, противоположная теории Карно, и опровергнут ряд понятий Карно. Когда тело претерпевает круговой процесс и в заключение возвращается к старому начальному положению, определенному температурой и плотностью, то, согласно Карно, вся сумма полученных в течение процесса извне количеств теплоты равна сумме отданных телом количеств теплоты, независимо от того, какую внешнюю работу тело при этом в целом совершило. Отсюда следует, что тело, выходя из определенного произвольно выбранного нулевого состояния, для достижения другого определенного состояния должно в целом получить извне определенное количество теплоты, совершенно независимо от того пути, на котором происходит этот переход. Это количество теплоты Карно называет полной теплотой (Gesamtwärme) тела в данном состоянии. Клаузиус же полагал, что в новой теории это понятие полной теплоты уже неприемлемо; ибо количество теплоты, которое тело

---

<sup>1</sup> Clausius, Über die Veränderungen, welche in den bisher gebräuchlichen Formeln für das Gleichgewicht und die Bewegung elastischer fester Körper durch neuere Beobachtungen notwendig geworden sind. Pogg. Ann. 76, p. 46, 1849.

<sup>2</sup> Clausius, Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. Pogg. Ann. 79, p. 368, 500, 1850; ср. также R. Clausius, Abhandl. üb. d. mechanische Wärmetheorie. 1. Aufl. Braunsch. 1864, 2. Aufl. Braunsch. 1876.

должно получить извне путем теплопроводности или излучения, для того, чтобы перейти из одного состояния в какое-либо другое, существенно зависит от внешней работы, которую оно при этом переходе совершает, — зависит, следовательно, от пути перехода. К сожалению, обозначение Клаузиуса „полная теплота“ дало повод к недоразумению, поскольку другие физики придали это название другой величине, которая на самом деле зависит только от мгновенного состояния. Как уже упомянуто выше (стр. 48), Гельмгольц обозначает словами „количество содержащейся в теле теплоты“ сумму содержащейся в нем живой силы и силы напряжения; эта величина, естественно, зависит только от мгновенного состояния, безразлично, какого более специального представления придерживаются о способе взаимодействия мельчайших частиц тела, ибо она представляет содержащийся в теле запас силы. Для этой последней величины Клаузиус принял употреблявшееся позднее В. Томсоном и теперь веде применяемое выражение „внутренняя энергия тела“<sup>1</sup>; но в сочинении, о котором мы сейчас говорим, еще нет специального обозначения для этого понятия. Вернее сказать, Клаузиус, как и Гельмгольц, разделяет весь запас силы на две части — на свободную теплоту (сумму живых сил) и внутреннюю работу (сумму сил напряжения). Каждая из этих величин сама по себе является определенной функцией состояния. Старое понятие скрытой теплоты тем самым снимается: когда теплота не производит никакого повышения температуры, то она не является скрытой теплотой, но вообще исчезает, ибо она превращается в работу.

Для установления основных уравнений теории Клаузиус пользуется методом круговых процессов Клапейрона и применяет его к постоянным (permanente) газам и насыщенным парам. При этом он вводит столь детально развитое впоследствии допущение, что правильность, которая сказывается в поведении всех постоянных газов по отношению к изменениям давления и температуры и которая выражена в законах Мариотта и Гей-Люссака, имеет свои основания в одинаковом строении этих газов. В них связь между молекулами настолько ослаблена, что при распре-

<sup>1</sup> R. Clausius, Abh. üb. d. mech. W. 1. Aufl. I., p. 281, 1864. 2. Aufl. I., p. 33, 1876.

нии газов не совершается никакая внешняя работа (гипотеза Майера, стр. 33), и что, стало быть, весь внутренний запас силы, поскольку он может изменяться, сводится к свободной теплоте (живой силе). В таком случае вся внешняя работа совершается исключительно за счет теплоты газа. Мы видим, что это представление непосредственно приводит к современной теории газов. К этим допущениям Клаузиус прибавляет еще одно, а именно, что теплоемкость при постоянном объеме для постоянного газа постоянна (независима от температуры), и приходит таким образом к различным положениям о теплоемкости, частью совершенно новым, частью уже подтвержденным экспериментом. Точно так же он выводит и законы расширения при определенных внешних условиях: при постоянной температуре, при постоянном давлении, а также при прекращении подвода теплоты ниже; эти законы оказались в хорошем согласии с опытом.

Вторая часть работы содержит существенное расширение теории путем привлечения принципа Карно о совершении работы при переходе теплоты от более высокой к более низкой температуре. Клаузиус находит, что этот принцип, хотя и противоречит первоначальному истолкованию основных законов механической теории теплоты, все же содержит правильную и очень ценную мысль, которой нужно лишь придать соответствующую форму, чтобы она могла играть роль также и в новой теории. Эта мысль по сути своей гласит, что если при круговом процессе теплота превращается в механическую работу, то получение работы необходимо связано с переходом некоторого другого количества теплоты от более высокой к более низкой температуре. А именно, теплота стремится к переходу от более высокой температуры к более низкой, и это стремление может быть использовано для получения работы (превращения теплоты в работу); но при этом существует определенный максимум получаемой работы, который зависит только от температур, между которыми происходит переход теплоты, но не от природы соответствующего тела. Для того чтобы вызвать изменение теплоты в противоположном направлении, ее переход от более низкой температуры к более высокой, требуется всегда затратить определенное количество работы (превращение работы в теплоту), которое по крайней мере должно быть равно

максимальному количеству работы, получаемому при обратном переходе.

В таком видоизменении принцип Карно, дальнейшая разработка которого привела позднее Клаузиуса к его второму началу механической теории теплоты, не содержит никакого противоречия с принципом эквивалентности теплоты и работы, но лишь дополняет его, поскольку принцип Карно регулирует условия взаимного превращения эквивалентных видов силы. С этого момента в дальнейшем развитии теории теплоты оба указанных принципа резко отделяются друг от друга; эти принципы на самом деле не стоят ни в какой логической связи друг с другом<sup>1</sup> и поэтому мы в данном сочинении впредь будем заниматься изложением лишь того из них, который непосредственно примыкает к общему закону сохранения энергии.

В заключительной части сочинения Клаузиуса излагаются различные методы вычисления механического эквивалента теплоты, причем упоминается также и опыт Джоуля; в качестве наиболее вероятного значения окончательно принимается число, несколько большее 400 киллограммометров. Мы полагаем, что тот период, когда механическая теория теплоты получила перевес, можно не без основания датировать от этого сделавшего эпоху сочинения.

Почти одновременно с Клаузиусом начал разрабатывать теорию теплоты с новой механической точки зрения и В. Дж. М. Ранкин<sup>2</sup> (мы проходим здесь мимо попыток обосновать механическую теорию теплоты, не получивших сколько-нибудь серьезного осуществления, как например, попыток Буи-Балло<sup>3</sup>, Вильгельми<sup>4</sup> и др.). Ранкин не удовлетворился, подобно Клаузиусу, простым предположением о взаимной превращаемости теплоты в работу, но еще

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* Согласно исследованиям Л. Больцмана, результаты которых впоследствии оправдались в различных областях, второе начало теории теплоты по существу является вероятностным законом.

<sup>2</sup> W. J. M. Rankine, Über die mechanische Theorie der Wärme, Pogg. Ann. 81, p. 172, 1850. (Brief.) Phil. Mag. (4) 2, p. 61, 1851. On the centrifugal theory of elasticity, as applied to gases and vapours. Phil. Mag. (4) 2, p. 509, 1851.

<sup>3</sup> Buys-Ballot, Schets eener physiologie van het onbewerkte ryk der natuur. Utrecht 1849.

<sup>4</sup> L. Wilhelmy, Versuch einer mathematisch-physikalischen Wärmetheorie, Heidelberg 1851.

дополнил его рядом специальных представлений об особой природе того движения, которое мы воспринимаем в качестве теплоты<sup>1</sup>. Тепловое движение, по его мнению, состоит в мощном вихревом движении атмосфер, окружающих атомы тел; живая сила этого движения и составляет количество имеющейся теплоты. Если к телу подводится теплота извне, то часть теплоты идет на увеличение этой живой силы (истинная удельная теплоемкость), а остаток служит для изменения расположения атомов. Следовательно, мы здесь имеем, так же как и у Клаузиуса, различие между свободной теплотой и внутренней работой. Однако можно непосредственно видеть, что исследования Клаузиуса покоятся на более достоверной базе, ибо они содержат только строгие следствия из принципа эквивалентности теплоты и работы, а отнюдь не произвольные, по меньшей мере, предположения о природе теплоты. Кроме того, поскольку мы в нашем изложении по возможности хотим быть независимыми от молекулярных гипотез, у нас нет никакого основания входить в более близкое рассмотрение представлений Ранкина.

В это же время и В. Томсон, побужденный исследованиями гальванических процессов, перешел в ряды поборников механической теории; с этого времени он значительным рядом работ, касавшихся самых различных применений нового принципа, содействовал развитию теории точно так же, как Джоуль экспериментальным путем содействовал установлению существования и численного значения механического эквивалента теплоты.

В первой относящейся сюда работе В. Томсон исходит из основного положения, что ток магнитоэлектрической машины производит во всей цепи количество теплоты, эквивалентное затраченной для образования тока теплоте<sup>2</sup>; но если тот же ток одновременно производит электродитические действия, то произведенная теплота меньше первоначального количества теплоты и притом на такую величину, которая возникла бы при обратном соединении разложенного вещества. Последнее количество теплоты Томсон называет

<sup>1</sup> M. Rankine, On the mechanical action of heat. Trans. Roy. Soc. Edinburgh (geles. Febr. 4, 1850) vol. XX, p. 147, 191, 195, 205, 425, 441, 565, 1853.

<sup>2</sup> W. Thomson, On the mechanical theory of electrolysis. Phil. Mag. (4) 2, p. 429, 1851.

поэтому тепловым эквивалентом имевшего место химического действия. Это основное положение применяется к токам, возникающим под действием механического вращения круглого металлического диска, находящегося под индуцирующим влиянием земного магнетизма. Путем подходящего расположения проволок на диске можно получить в них ток, который вызывает также и химическое разложение, и таким образом можно проверить правильность вышеуказанного положения. Томсон таким же образом, как и Гельмгольц (стр. 50), выводит из него следствие, что электродвижущая сила гальванического элемента в абсолютной мере равна механическому эквиваленту того химического действия, которое вызывается в нем единицей тока за единицу времени.

В следующей статье он разбирает вопрос об использовании теплоты, выделяемой током в проводнике, для измерения сопротивления этого проводника в абсолютной магнитной мере<sup>1</sup>. А именно, если разделить измеренную в калориях теплоту, возникающую за единицу времени, на ее механический эквивалент, то получают количество выделяемой током теплоты  $J^2 \cdot W$  в механической мере; эта величина, разделенная на квадрат измеренной в магнитной мере силы тока, дает выражение для сопротивления  $W$  проводника в абсолютной мере. Единица сопротивления определяется тогда так, что ток, равный единице, за единицу времени производит количество теплоты, равное единице механической работы. Вычисление, произведенное для удельного сопротивления серебра и ртути, дало результаты, хорошо согласующиеся с результатами, найденными Вебером совершенно другим путем. Последний основывал свое определение сопротивления на том, что он полагал индукционную константу Неймана  $e$  (стр. 52) равной единице<sup>2</sup>. Оба определения, стало быть, приводят к одним и тем же значениям сопротивления, как это и должно быть, согласно теоретическому выводу закона индукции Гельмгольцем.

<sup>1</sup> W. Thomson, Applications of the principle of mechanical effect to the measurement of electro-motive forces and of galvanic resistances in absolute units. Phil. Mag. (4) 2, p. 551, 1851.

<sup>2</sup> W. Weber, Electrodynamische Massbestimmungen, insbesondere Widerstandsmessungen. Abh. d. Leipz. Akad. I, p. 197, Pogg. Ann. 82, p. 337, 1851.

В том же сочинении излагаются и примененныя изложенного выше положения о равенстве количеств теплоты, произведенных гальваническим и обыкновенным химическим путем. Если гальваническая теплота проявляется исключительно в форме джоулевой теплоты (теплоты Лепца), т. е. если она всегда пропорциональна квадрату силы тока, то электродвижущая сила  $E$ , как уже указано выше, равна количеству химически выделенной в элементе теплоты  $A$ , отнесенному к единице тока и единице времени. Ибо тогда из эквивалентности термического действия  $J^2 \cdot W$  и химического действия  $J \cdot A$  следует

$$A = J \cdot W$$

и согласно закону Ома  $A$  равно  $E$ .

Томсон нашел, что это допущение оправдывается для элемента Даниэля, причем он воспользовался данными Эндрюса о тепловом эффекте тех процессов, которые протекают в этом элементе. Но вполне мыслимо также — замечательно, что Томсон уже здесь явно обращает внимание на этот случай, — что теплота, соответствующая химическим процессам, может проявиться не только в виде джоулевой теплоты, т. е. что она может превратиться в работу тока не полностью, а часть ее может проявиться в качестве локальной или вторичной теплоты, в особенности на границе двух проводников. Эта локальная (местная) теплота может следовать совсем другому закону, чем джоулева теплота, именно, она может быть пропорциональна силе тока и даже стать отрицательной. Тогда электродвижущая сила  $E$  элемента уменьшится на величину, соответствующую произведенной локальной теплоте. Пусть эта теплота равна  $J \cdot C$ ; если всю выделенную теплоту мы теперь приравняем, согласно принципу энергии, теплоте, произведенной химическим процессом, то получим

$$J^2 \cdot W + J \cdot C = A \cdot J,$$

откуда следует

$$J \cdot W (= E) = A - C.$$

Томсон приводит здесь высказанный Фарадеем взгляд<sup>1</sup>, к которому присоединился и Джоуль, что в элементе Даниэля электродвижущее действие производят только процессы

<sup>1</sup> M. Faraday, Exp. Res. Phil. Trans. London 1834 Apr., § 919.



окисления цинка и восстановления окиси меди и что, напротив, образование теплоты, которое соответствует растворению окиси цинка в серной кислоте и выделению окиси меди из медного купороса, проявляется в виде особой локальной теплоты (положительной у анода и отрицательной у катода) независимо от возбуждения тока. Что в общем такое локальное образование теплоты имеет место, следует также из поведения столба Смея (платинированное серебро, серная кислота, цинк), электродвижущая сила которого меньше, чем вычисленная на основании учета химического выделения теплоты. Здесь, следовательно, должно иметь место локальное образование теплоты, эквивалентное превращению химической работы над Джоулевой теплотой.

1851 г. принес еще одну публикацию Джоуля, сначала мало обратившую на себя внимание, но позднее ставшую основой для новой ветви физики, для современной теории газов<sup>1</sup>. Исходя из представления, что теплота газа заключается в живой силе движения мельчайших частиц тела, Джоуль отнюдь не рассматривал этого движения подобно Деви, а позднее Ранкингу, в виде колебаний и вращений; в согласии с идеями Давида Бернулли<sup>2</sup> и Герарпата<sup>3</sup> он полагал, что молекулы газа свободно летят во все стороны и благодаря непрерывным ударам о стенки сосуда вызывают силу, которая воспринимается нами, как давление. Отдельная молекула, следовательно, движется прямолинейно с постоянной скоростью, пока она не столкнется либо с другой молекулой, либо со стенкой сосуда; здесь имеет место идеально упругий удар. Это простое допущение дает одновременно возможность установить численные значения для средней скорости молекулы. Джоуль упростил это вычисление, представляя газ заключенным в полый куб и считая, что каждая молекула движется с одной и той же скоростью в одном из трех направлений, параллельных граням куба. Отсюда он получил закон Бойля-Мариотта, а также пропорциональность между количеством теплоты (полной

---

<sup>1</sup> J. P. Joule, Some remarks on heat and the constitution of elastic fluids. Mem. of the Phil. Soc. of Manchester (читано Oct. 3, 1848) (2) vol. IX, p. 107, 1851. Phil. Mag. (4) 14, p. 211, 1857.

<sup>2</sup> Daniel Bernoullis, Ansicht über die Konstitution der Gase. Pogg. Ann. 107, p. 490, 1859.

<sup>3</sup> Herapath, On the dynamical theory of airs. Athen. 1, p. 722, 1860.

живой силы), температурой (живая сила отдельной молекулы) и давлением. Для скорости молекулы водорода при  $60^{\circ}$  Фаренгейта и давления ртутного столба в 30 дюймов получилось значение в 6225 английских футов в секунду. Для различных газов получился закон, согласно которому равные объемы при равном давлении содержат одинаковую живую силу.

Непреодолимая трудность возникла у Джоуля благодаря допущению, что молекулы следует рассматривать, как простые материальные точки, что, следовательно, полное количество теплоты, полная живая сила газа происходит исключительно от поступательного движения молекул. Так, если образовать выражение для живой силы поступательного движения всех молекул, исходя из вычисленной выше скорости, то при делении его на механический эквивалент теплоты оно должно было бы дать количество теплоты, содержащейся в газе, а отсюда можно было бы вычислить теплоемкость газа при постоянном объеме.

Джоуль нашел, что вычисленная таким образом теплоемкость значительно меньше, чем наблюдаемая в действительности, и не мог найти для этого обстоятельства никакого удовлетворительного объяснения. Такое объяснение вместе с соответствующим видоизменением теории было дано лишь впоследствии Клаузиусом.

Представления Джоуля о природе газа в основном были повторены и частью еще далее развиты в сообщении Британской ассоциации, сделанном Дж. Дж. Уотерстоном в том же году<sup>1</sup>. Эти идеи сначала не обратили на себя никакого внимания, но после того, как почва для них оказалась более благоприятной, они вновь были возрождены и, подкрепленные идущими им навстречу воззрениями химиков, сравнительно быстро получили всеобщее признание. Во всяком случае только с этого времени теория теплоты заслуживает названия механической теории, ибо утверждение лишь о способности ее превращения в работу еще ничего не говорит о природе теплоты.

Вернемся вновь к рассмотрению дальнейшего развития закона сохранения энергии. После того как общая справедливость этого принципа и его исключительная плодотвор-

---

<sup>1</sup> J. J. Waterston, On a general theory of gases. Rep. of the 21. Meeting of the Brit. Ass. 1851, Notices und abstracts, p. 6.

ность были констатированы в достаточном числе случаев, количество его применений и обобщений стало быстро накапливаться и интерес к ним стали проявлять все более широкие круги. Каждый год приносил множество новых достижений в этой области. Сначала В. Томсон работал тем же методом, как и Клаузиус, динамическую теорию теплоты, окончательно разорвав со старыми взглядами Карно<sup>1</sup>. Он положил в основу представление, что теплота сводится к движению, что, следовательно, произведенная ею работа требует затраты соответствующего количества живой силы колеблющихся молекул и некоторой внутренней работы. Одновременно он ввел в свою теорию также и видоизмененный принцип Карно, с его применениями к обратимым процессам. В этом сочинении впервые встречается определение содержащейся в теле механической энергии в том общем смысле этого слова, в каком мы теперь его применяем. Как известно, теплота, которая должна быть сообщена телу для того, чтобы оно перешло от определенного нулевого состояния к другому определенному состоянию, существенно зависит от внешней механической работы, которую тело совершает при этом переходе; чем больше эта работа, тем больше теплоты должно получить тело извне (стр. 61). Если же количество произведенной работы вычитается из количества сообщенной теплоты (измеренной механически), то всегда получается одинаковая величина, на каком бы пути этот переход ни был совершен. Томсон называет эту величину механической энергией тела в данном состоянии, она вполне определена этим состоянием с точностью до аддитивной константы, зависящей от выбранного нулевого состояния. Как мы видим, эта величина является той же функцией, которую Гельмгольц обозначил (стр. 48), как количество полной теплоты тела (сумма внутренних живых сил и сил напряжения). Томсоновская форма определения имеет то преимущество, что с ее помощью возможно непосредственное численное определение значения функции.

Еще более обстоятельно рассматриваются особенности и способы вычисления энергии тела в дальнейшем сочинении Томсона, в котором доказывается, что полное зна-

---

<sup>1</sup> W. Thomson, On the dynamical theory of heat. Phil. Mag. (4) 4, p. 8, 106, 168, 424, 1852.

ченне механического действия (алгебраической суммы теплоты и работы), которое тело отдает вовпе при переходе от одного состояния к другому, зависит только от этих обоих состояний, но не от способа перехода<sup>1</sup>. Следовательно, механическая энергия определяет полный эффект, который получается при переходе тела из его состояния в (произвольно выбранное) пулевое состояние. Абсолютным пулевым состоянием было бы такое состояние, исходя из которого тело не могло бы дать никакого положительного эффекта, следовательно, не могло бы произвести ни теплоты, ни работы; но такое состояние недостижимо при наших средствах. Как уже выше было замечено, томсоновское обозначение энергии было сначала принято Клаузиусом и затем получило все более широкое распространение.

К этим теоретическим работам Томсона о механических действиях теплоты примыкает в качестве применения теории исследование о действиях лучистой теплоты и света, а также об источниках сил, представленных в распоряжение человека природой<sup>2</sup>. Свет и лучистая теплота при этом отождествляются; оценивается значение солнечного света для процесса ассимиляции в растениях и тем самым для дыхания животных (ср. Р. Майер, стр. 34) и различаются три основных источника работы на земле, — главным образом, излучение солнца, затем во вторую очередь относительное движение земли, солнца и луны (приливы и отливы) и, наконец, в меньшей мере также и земные источники силы.

Следующий вопрос о возникновении и постоянном восстановлении излученной солнечной теплоты разбирается в статье Дж. Дж. Уотерстона<sup>3</sup>, где дан расчет количества теплоты, которую производит тело при падении на землю или на солнце с бесконечно большого расстояния, благодаря приобретаемой им при этом живой силе. На основании

---

<sup>1</sup> W. Thomson, On the quantities of mechanical energy contained in a fluid mass, in different states, as to temperature and density. Phil. Trans. Edinburgh (прочт. Dec. 3, 1851) vol. XX, p. 475, 1853. Phil. Mag. (4) 3, p. 529, 1852; подробнее: Phil. Mag. (4) 9, p. 523, 1855.

<sup>2</sup> W. Thomson, On the mechanical action of radiant heat or light; on the power of animated creatures over matter the sources available to man for the production of mechanical effect. Phil. Mag. (4) 4, p. 256, 1852.

<sup>3</sup> J. J. Waterston, On dynamical sequences in kosmos. Athen, 1853, p. 1099.

этого расчета Уотерстон так же, как уже до него Майер (стр. 34), заключил, что покрытие отдаваемой солнцем теплоты происходит за счет работы вытоновой силы тяготения, будь то вследствие падения космических масс на солнце или же благодаря непрерывно еще продолжающемуся уплотнению самого солнца. Первую мысль далее развила В. Томсон, а последнюю — Гельмгольц.

К этому же времени относится и попытка обосновать на принципе сохранения живой силы теорию взаимодействия между колебаниями эфира и колебаниями весовых молекул; эта попытка была сделана в сочинении Дж. Поуэра<sup>1</sup>.

От теории теплоты Томсон вновь возвращается к теории электричества и магнетизма для того, чтобы и здесь применить новые принципы. Сначала появилось исследование о термоэлектрических токах<sup>2</sup>. Это исследование, в котором, правда, в значительной мере используется улучшенный принцип Карно, на основании открытого Гуммингом в 1823 г. обращения термоэлектрических токов<sup>3</sup>, привело к новому и поразительному результату, что гальванический ток производит в неравномерно нагретом проводнике, кроме джоулевой теплоты, пропорциональной квадрату силы тока, еще и другую теплоту, впоследствии названную томоновской. Эта теплота прямо пропорциональна силе тока, и поэтому при изменении направления тока меняет свой знак. Если следует считать, что джоулева теплота образуется вследствие сопротивления проводника, то томоновская теплота происходит от действующей внутри проводника электродвижущей силы. После долгих трудов Томсону удалось это чисто теоретически выведенное положение подтвердить и экспериментально<sup>4</sup>.

Следующее важное применение теории содержится в со-

<sup>1</sup> J. Power, Theory of the reciprocal action between the solar rays and the different media by which they are reflected, refracted or absorbed. Phil. Mag. (4) 6, p. 218, 1853.

<sup>2</sup> W. Thomson, On a mechanical theory of thermo-electric currents. Phil. Mag. (4) 3, p. 529, 1852. Proc. of Edinb. Soc. II, p. 91, 1852.

<sup>3</sup> Cumming, Phil. Trans., Cambridge 1823, p. 61.

<sup>4</sup> W. Thomson, On the dynamical theory of heat. Thermo-electric currents. Phil. Mag. (4) II, p. 214, 281, 379, 433, 1856. Далее, 8, p. 62, 1854.

W. Thomson, On the electrodynamic properties of metals Phil. Trans., London 1856, p. 649.

чнении Томсона о токе разряда наэлектризованного проводника, например, шара, связанного точкой проволокой с другим проводником<sup>1</sup>. При прохождении тока из одного проводника в другой полная энергия системы должна остаться постоянной. Но эта энергия состоит из следующих трех частей: 1) электростатического потенциала; 2) теплоты, произведенной током разряда; 3) электродинамической энергии тока. Что энергия последнего рода существует, что, стало быть, существование гальванического тока само по себе представляет определенный запас энергии (actual energy или mechanical value of the current), вытекает из того, что, исчезая, ток (например, в виде экстратока) может производить теплоту без затраты какой-либо другой энергии. Эта энергия существенно положительна, следовательно, пропорциональна квадрату силы тока, но она не должна рассматриваться просто как живая сила движущихся в токе и обладающих инертной массой электрических частиц, хотя бы потому, что ее значение согласно опыту существенно зависит от формы проводника. Это значение равно нулю, когда проводник имеет такую форму, что рядом с каждым элементом тока непосредственно протекает противоположно направленный элемент тока; в этом случае экстраток совершенно исчезает<sup>2</sup>.

Если, суммируя вышеуказанные три выражения, составить выражение полной энергии системы и сложить изменение этой величины для каждого элемента времени равным нулю, то получается уравнение для определения зависимости силы тока от времени. Томсон нашел отсюда, что разряд может протекать двумя совершенно различными способами в зависимости от значения различных содержащихся в задаче констант. Либо ток разряда течет постоянно в том же направлении с вначале возрастающей, а затем постепенно вновь уменьшающейся силой, либо же направление тока осциллирует, и проводник попеременно заряжается то положительно, то отрицательно. При этом абсолютное значение максимальной силы тока постепенно уменьшается до нуля. Наличие обоих видов разряда с тех пор

---

<sup>1</sup> W. Thomson, On transient electric currents. Phil. Mag. (4) 5, 393, 1853.

<sup>2</sup> M. Faraday, Exp. Res. Phil. Trans., London 1835, p. 50, § 1096.

многokратно было доказано как экспериментально, так и теоретически. После Томсона из английских физиков разработкой новых идей занимался, главным образом, Ранкин.

Наряду с некоторыми специальными применениями<sup>1</sup>, он попытался также дать общее определение понятия энергии, применение которого не было бы ограничено только областью теплоты, но охватывало бы все силы природы<sup>2</sup>. Он называет энергию „Every affection of substances which constitutes or is commensurable with a power of producing change in opposition to resistance“, что Гельмгольц переводит так: „всякое воздействие (Zukunimnis) субстанции, которое заключается в силе, или сравнимо с силой и способно производить изменения, при которых должно быть преодолено сопротивление“<sup>3</sup>. При этом Ранкин различает и определяет два основных вида энергии: актуальную или кинетическую, и потенциальную энергию (энергия движения и энергия положения). По смыслу они полностью совпадают с понятиями живой силы и силы напряжения у Гельмгольца. Он занялся также общим исследованием о превращении различных видов энергии друг в друга, в котором, однако, неограниченная всеобщность куплена ценой значительного ущерба для точности выражений<sup>4</sup>. Вообще приведенное определение энергии, повидимому, не обладает в физическом отношении каким-либо особенно высоким значением, ибо оно многое оставляет слишком неопределенным. Определение может быть названо физически пригодным только тогда, когда с его помощью можно задать для любого случая численное значение определяемой величины — требование, которое далеко не выполняется данным определением, как раз в противоположность определению Томсона (стр. 70).

Здесь следует еще упомянуть работу Джоуля о вычислении некоторых химических теплот соединений (окись меди,

<sup>1</sup> M. Rankine, Mechanical theory of heat — Specific heat of air. Phil. Mag. (4) 5, p. 437, 1853.

M. Rankine, On the application of the law of the conservation of energy to the determination of the magnetic meridian on board ship. Phil. Mag. 4 (6), p. 140, 1853.

<sup>2</sup> M. Rankine, On the general law of the transformation of energy. Phil. Mag. (4) 5, p. 106, 1853.

<sup>3</sup> Fortschr. d. Phys. v. J. 1853, Berlin 1856, p. 407.

<sup>4</sup> Ср. также Rankine, Outlines of the Science of energetics, Edinb. Journ. (2) II, p. 120, 1855.

окись свинца, вода) гальваническим путем <sup>1</sup>. Если в цепь тока вместо металлического проводника включается разлагающий аппарат таким образом, что сила тока остается при этом той же, что и раньше, то очевидно энергия, подведенная током к разлагающему аппарату, в целом равна энергии, ранее подведенной к проводнику, так как в остальной цепи процесс происходит без изменения. Подведенная к проводнику энергия заключается только в теплоте, энергия же, подводимая к разлагающему аппарату, состоит из теплоты и химической работы; поэтому, вычисляя уменьшение количества теплоты в разлагающем аппарате, можно найти химическую работу, которая и является теплотой соединения разложенных веществ.

Мы проследили развитие принципа энергии в результате трудов английских физиков вплоть до 1853 г. Решающий перевес, который новая теория получила в это время в научном мире, метко характеризуется в речи, которой В. Гопкинс, президент 23 собрания Британской ассоциации в Хэлле, открыл заседание; в этой речи он отметил заслуги Румфорда, Джоуля, Ранкина, Томсона <sup>2</sup>.

В то время как в Англии неутомимо работали над развитием теории, в Германии так же не оставались праздными. Здесь Клаузиусу принадлежит главная заслуга дальнейшей разработки установленных им же в его первом сочинении принципов о движущей силе теплоты. Сначала появилось исследование о действиях электрического разряда <sup>3</sup>. Эти действия могут быть различной природы, в частности механического или теплового рода, но во всех случаях произведенная при разряде полная энергия, т. е. сумма произведенной механической работы и теплоты, равна уменьшению электрической энергии, стало быть, уменьшению электростатического потенциала. Это положение Клаузиус высказывает в такой форме: „Сумма всех возникающих при электрическом разряде действий равна приросту потенциала всего электричества на самого себя“. Потенциал

---

<sup>1</sup> J. P. Joule, On the heat disengaged in chemical combinations, Phil. Mag. (4) 3, p. 431, 1852.

<sup>2</sup> W. H o p k i n s, Dynamical theory of heat. Rep. of Brit. Ass. 23. Meeting Hull 1853, p. XLV.

<sup>3</sup> R. C l a u s i u s, Über das mechanische Äquivalent einer elektrischen Entladung und die dabei stattfindende Erwärmung des Leitungsdrahtes. Pogg. Ann. 86, p. 337, 1852.



здесь берется еще с противоположным знаком. За выводом этого положения следуют замечания о согласии теории с отдельными опытами.

В следующей работе Клаузиус переходит к рассмотрению действий стационарного гальванического тока внутри металлического проводника<sup>1</sup>. Когда по металлическому проводнику течет постоянный ток, не испытывающий никаких индукционных действий извне, то этот ток возбуждается исключительно благодаря накоплению на поверхностях различных проводников свободного статического электричества. Отсюда Клаузиус приходит к такому положению: „Работа, произведенная при определенном движении количества электричества силой, действующей в проводнике, равна происходящему при таком движении увеличению (уменьшению) потенциала этого количества электричества и свободного электричества друг на друга“. Так как в металлическом проводнике не происходят ни механические, ни химические действия, то эта работа полностью превращается в теплоту; таким образом и получается закон нагревания Джоуля.

В то время как текущее таким образом электричество переходит внутри проводника от более высоких к более низким значениям потенциала и вследствие этого непрерывно производит теплоту, должны быть, с другой стороны, и такие места, где оно при своем течении по замкнутой цепи вновь переходит к первоначальному значению потенциала; эти места находятся на пограничных поверхностях двух соседних проводников, где потенциал испытывает скачок, и, следовательно, протекающее через такое место электричество производит или же потребляет на бесконечно малом пути конечную работу. Эта работа в зависимости от обстоятельств может превращаться в теплоту или же в химическую энергию. Первый случай имеет место в термоэлектрических цепях, действия которых Клаузиус сделал предметом дальнейшего исследования<sup>2</sup>. Здесь работа, произведенная электричеством при прохождении через место соприкосновения двух

---

<sup>1</sup> R. Clausius, Über die bei einem stationären Strom in dem Leiter getane Arbeit und erzeugte Wärme. Pogg. Ann. 87, p. 415, 1852.

<sup>2</sup> R. Clausius, Über die Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die thermoelektrischen Erscheinungen. Pogg. Ann. 90, p. 513, 1853.

термоэлектрически деятельных металлов, проявляется в открытом Пельтье явлении возникновения или поглощения теплоты. Что касается вопроса, всегда ли теплота Пельтье эквивалентна работе, совершаемой при преодолении электрического напряжения на месте спая, то Клаузиус явно высказывает принципиально важное, но до сего дня еще окончательно не разъясненное положение. Как известно, действие Пельтье на месте спая двух металлов вовсе не пропорционально электроскопическому напряжению (напряжению Вольта), которое эти металлы показывают в электрометре при соприкосновении. Мы займемся более обстоятельным выяснением этого важного для применения принципа сохранения энергии факта лишь в третьем разделе. Здесь мы только упомянем, что Клаузиус, так же как и Томсон, применяет второе начало механической теории теплоты к термоэлектрическим явлениям и при этом приходит к таким же результатам.

Несколько удивительна та воздержанность, с которой отнеслись французские физики к столь быстрому развитию вновь открытого принципа вплоть до середины пятидесятих годов; очевидно, они не могли так скоро решиться на отказ от разработанной, главным образом, во Франции вещественной теории теплоты, хотя произведенные в калориметрии и теплопроводности важные опыты могли быть истолкованы почти без всякого изменения и с точки зрения новой теории. Даже еще в 1854 г. мы находим в *Comptes Rendus*<sup>1</sup> составленное Эрмитом, офицером в отставке, описание машины, действующей по способу электрофора, которая одновременно может давать и электричество и работу!

Первым из выдающихся французских физиков, порвавшим со старыми представлениями, был В. Реньо; в своей большой экспериментальной работе о теплоемкости газов он точными измерениями окончательно установил, что теплоемкость постоянных газов существенно не зависит от объема, что, следовательно, теплота, произведенная посредством сжатия, не может быть приписана изменению теплоемкости<sup>2</sup>, как это принимали раньше.

<sup>1</sup> *Hermite, Théorie et description d'une machine à courants électriques. Compt. Rend. 39, p. 1200, 1854.*

<sup>2</sup> *V. Regnault, Recherches sur les chaleurs spécifiques des fluides élastiques. Compt. Rend. 36, p. 676, 1853.*

Тем временем движение, возникшее в науке благодаря новому учению, стало все более расширяться, развернулись поиски все новых точек зрения и новых его применений. Следствия либо подтверждались опытом, либо же давали интересные, скрытые до того, возможности взглянуть в хозяйство природы. В феврале 1854 г. Гельмгольц прочел в Кенигсберге научно-популярный доклад о взаимодействии сил природы, главное содержание которого заключалось в изложении нового принципа, преимущественно его применений к теории теплоты<sup>1</sup>. Вопрос о возмещении излученной солнцем теплоты, источника всякой земной жизни, был разрешен путем допущения, что солнце все вновь и вновь нагревается благодаря непрерывному уплотнению. При этом получилось, что уменьшение диаметра солнца на одну 10 000-ю часть своей теперешней величины производит количество теплоты, которое в состоянии поддерживать излучение солнца в течение 2100 (согласно более позднему расчету, в течении 2289) лет при встоящей его интенсивности.

Несколько иной ответ дал на этот вопрос Томсон, а именно он предположил, что на солнце попадают извне космические массы, которые благодаря своему падению вызывают нагревание солнца<sup>2</sup>. Томсон вычислил, что если отдача теплоты солнцем постоянно вновь покрывается этим способом, то диаметр солнца должен возрастать в течение 4000 лет на  $\frac{1}{10}$  дуговой секунды.

Другое применение механической теории теплоты к вычислению энергии солнечного излучения Томсон сделал в отношении плотности светового эфира<sup>3</sup>. Если световые и тепловые лучи считать тождественными, то вся тепловая энергия, отдаваемая излучением солнца земле, доставляется живой силой колеблющихся частиц эфира, а отсюда можно вычислить, принимая за основу измерения интенсивности излучения Пуье, плотность светового эфира. Правда, для этого необходимо знать скорость колебаний отдельной

---

<sup>1</sup> H. Helmholtz, Über die Wechselwirkung der Naturkräfte. Königsb. 1854. Vortr. und Reden I, p. 25.

<sup>2</sup> W. Thomson, Mémoire sur l'énergie mécanique du système solaire. Compt. Rend. 39, p. 632, 1854.

<sup>3</sup> W. Thomson, Note sur la densité possible du milieu lumineux et sur la puissance mécanique d'un mille cube de lumière solaire. Compt. Rend. 39, p. 529, 1854.

частицы эфира или, поскольку мы знаем ее период, амплитуду этих колебаний. Томсон принимает, что скорость, с которой частица эфира проходит через свое положение равновесия, меньше чем пятидесятая часть скорости распространения света; это допущение можно с уверенностью принять, так как отношение амплитуды колебания к длине волны мало, а отсюда следует, что английский кубический фут эфира обладает большей массой, чем 156-триллионная часть фунта.

Все эти вычисления естественно потребовали знания механического эквивалента теплоты и понятно, что потребность возможно более точного определения этой важной константы вскоре дала себя чувствовать; ибо хотя измерения Джоуля и могут быть признаны относительно достоверными, но всё же его наиболее точные результаты различаются еще в третьем знаке. Здесь перед физиками было плодотворное поле для экспериментальных исследований, и мы видим, как постепенно возникает целая литература по вопросу об определении механического эквивалента теплоты; правда, большая часть этих исследований была проведена по уже известным методам, и лишь немногие могли сравниться по точности с вычислениями Джоуля; в дальнейшем мы упомянем лишь о тех, которые основывались на существенно новых идеях. Вслед за Джоулем, опытные данные которого были объединены Л. Соре<sup>1</sup>, большие заслуги в этой области принадлежат Г. А. Гирну, выполнившему длинный ряд экспериментальных работ. Побужденный сначала премией, объявленной Берлинским физическим обществом, он сообщил в 1855 г. результаты некоторых опытов, поставленных по совершенно различным более или менее оригинальным методам<sup>2</sup>. Правда, данные, полученные из отдельных опытов для механического эквивалента теплоты, отличались друг от друга отнюдь не незначительно. Так, наблюдение образования теплоты посредством трения чугунного барабана о металлическое тело дало

---

<sup>1</sup> L. Soret, Sur l'équivalence du travail mécanique et de la chaleur. Arch. d. scienc. phys. et. nat. 26, p. 33, 1854.

<sup>2</sup> G. A. Hirn, Recherches expérimentales sur la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur. 1855. Fortschr. d. Phys. v. J. 1855 (Referat von Clausius).

G. A. Hirn, Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur présentées à la société de physique de Berlin. Colmar 1858.

число в 371,6 килограмметров, а наблюдение над пробурыванием куска металла дало число в 425 килограмметров. Принципиальную важность имело вычисление теплового эквивалента путем сравнения работы, произведенной паровой машиной, с затраченной в ней теплотой, ибо здесь впервые основой измерения делается совершение работы, а не ее потребление, если не считать немногих опытов Джоуля над расширением воздуха при преодолении давления. Результат (по вычислениям, улучшенным Клаузиусом)<sup>1</sup> оказался равным 413 килограмметрам. Наконец, Гирн исследовал также количество теплоты, отдаваемой вонне человеческим телом в состоянии покоя и во время работы. В последнем случае это количество более значительно, вследствие усиленного дыхания работающего тела; все же, согласно теории, преобладание произведенной теплоты должно быть меньше, чем это соответствует увеличенному потреблению кислорода, потому что одновременно совершается работа. Гирн нашел, что это заключение подтверждается на самом деле, но вследствие многих неподдающихся контролю источников ошибок получил количественно весьма различные результаты. Это побудило его к странному заключению, что эквивалент теплоты вовсе не постоянен и что, следовательно, механическая теория теплоты покоится на ложной основе.

Тем не менее Гирн не отказался от дальнейших исследований; позднее, опыты, поставленные над трением твердых тел под сильным давлением, давшие эквивалентное число в 451 килограмметр<sup>2</sup>, и в особенности результаты, полученные в новых опытах над паровыми машинами, заставили его, наконец, согласиться с допущенным постоянством эквивалента теплоты<sup>3</sup>.

Эта мысль также проведена в его богатом по содержанию сочинении о механической теории теплоты (1862), в котором он, впрочем, рассматривает теплоту не как движение, но, так же как и Майер, считает ее „особым началом“<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Fortschr. d. Phys. v. J. 1855, p. XXIII.

<sup>2</sup> G. A. Hirn, Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur présentées à la société de physique de Berlin. Colmar 1858.

<sup>3</sup> Hirn, Equivalent mécanique de la chaleur. Cosmos XVI, p. 313, 1860.

<sup>4</sup> G. A. Hirn, Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur, Paris et Colmar 1862.

В этом сочинении он опубликовал ряд новых опытов по определению эквивалента теплоты. Эти опыты состояли в исследовании трения жидкости, заключенной между массивным и полым цилиндрами (результат 432 килограмметра), затем в исследовании истечения воды под высоким давлением (результат 433 килограмметра) и, далее, в изучении удара твердых тел. Железный цилиндр, подвешенный на двух парах канатов, падает боком на служащий в качестве наковальни и также подвешенный гранитный блок (из песчаника), а между ними находится свинцовый цилиндр, который благодаря удару нагревается (результат 425 килограмметров). Другие опыты были поставлены над расширением газов (результат 441,6 килограмметра). В качестве среднего значения из всех своих опытов Гирн выбирает значение механического эквивалента в 432 килограмметра, следовательно, это значение превышает число Джоуля примерно на два процента. Напротив, Фавр в 1858 г. напел из наблюдений над образованием теплоты при трении стальных пружин, прижатых к вращающемуся диску, число 413,2 килограмметра<sup>1</sup>.

Прежде чем перейти к обсуждению других определений теплового эквивалента, полученных путем электрических измерений, мы бросим еще взгляд на дальнейший ход развития теории теплоты в то время. После того как всеобщая справедливость закона эквивалентности теплоты и работы была всеми признана, общий интерес стал обращаться все более и более от этого положения ко второму началу механической теории теплоты, к видоизмененному принципу Карно, так что изложение развития этой теории мы здесь должны существенно ограничить. Большинство тогдашних исследований в этой области как экспериментального, так и теоретического характера обсуждало или уже предполагало справедливость принципа Карно, так что редко можно натолкнуться на новое положение, которое оказалось бы чистым следствием принципа сохранения энергии. Такое положение высказано в сочинении Г. Кирхгофа<sup>2</sup>; оно

<sup>1</sup> P. A. Favre, Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur. Compt. Rend. 46, p. 337, 1858.

<sup>2</sup> G. Kirchhoff, Über einen Satz der mechanischen Wärmetheorie und einige Anwendungen desselben. Pogg. Ann. 103, p. 177, (203), 1858.

касается зависимости количества теплоты, отдаваемой воле при химическом соединении двух тел, от температуры, при которой происходит реакция, а также от теплоемкостей тел и их соединения, и основано лишь на предположении, что внутренняя энергия (по Кирхгофу — функция действия) тела полностью определяется его мгновенным состоянием; для ее значения, а следовательно, и для всего отдаваемого воле действия совершенно безразлично, происходит ли химический процесс непосредственно, или же оба тела сначала приводятся к другой температуре и затем уже происходит этот процесс, если только конечное состояние опять остается одним и тем же.

Подобный же закон для теплот растворения солей при различных температурах был развит уже в 1851 г. Персоном, который при этом исходил еще из старого представления о тепловом веществе<sup>1</sup>. На самом деле оба представления ведут здесь к одинаковой цели (если отвлечься от внешней работы), как мы уже заметили выше (стр. 30) по поводу закона Гесса о химической теплоте, покоящемся на той же основе.

Новым видом энергии занимается Томсон в исследовании расширения жидкой пленки<sup>2</sup>; в этом исследовании показано, что поверхностное натяжение в состоянии произвести работу. Но здесь применение принципа Карно играет уже слишком существенную роль и поэтому мы займаться этой работой подробнее не будем.

Тем временем и так называемая механическая теория теплоты в более узком смысле слова сделала важный шаг вперед. Сначала в 1856 г. Крэниг в своей работе<sup>3</sup>, — содержание которой в основном совпадает с содержанием уже упомянутой статьи Джоуля 1851 г., хотя они ни в какой мере не связаны, — обратил всеобщее внимание на гипотезу, согласно которой отдельные частицы газа летают в пространстве взад и вперед по прямолинейным траекториям с неизменной скоростью; благодаря ударам этих частиц о твердую стенку мы замечаем давление газа, а

<sup>1</sup> C. Person, Recherches sur la chaleur latente de dissolution. Ann. d. chim. et d. phys. (3) 33, p. 448, 1851.

<sup>2</sup> W. Thomson, On the thermal effect of drawing out a film of liquid. Proc. Roy. Soc. London, IX, 255, 1858.

<sup>3</sup> A. Krönig, Grundzüge einer Theorie der Gase, Berlin 1856. Pogg. Ann. 99, p. 315, 1856.

благодаря их живой силе, — содержащуюся в нем теплоту. Крэниг при этом придает особое значение подтверждению закона эквивалентности теплоты и работы, показывая, что, когда сила расширения газа совершает работу, живая сила частиц в соответствующей мере уменьшается. В остальном он, как и Джоуль, предполагает, что молекулы газа следует представлять себе в виде простых материальных точек, и поэтому он натолкнулся на ту же трудность, о которой мы уже выше упомянули, а именно, что вычисленная из такого механического представления теплоемкость при постоянном объеме значительно меньше, чем та же теплоемкость, измеренная калориметрическим путем. Только Клаузиусу удалось разрешить этот сомнительный пункт и притом весьма счастливым образом<sup>1</sup>; он допустил, что теплосодержание газа, следовательно, вся его внутренняя живая сила, определяется не только поступательным движением молекул, но что существует еще и колебательное движение внутри молекулы, живая сила которого, согласно общему механическому закону, должна быть прибавлена к первой для того, чтобы получить всю живую силу. Согласно этому предположению отдельная молекула и у простого газа должна распадаться еще на более мелкие составные части (атомы), и если давление газа определяется только поступательным движением молекул, то теплота складывается как из поступательного, так и из колебательного движения. Но так как у идеальных газов как давление, так и теплота пропорциональны абсолютной температуре, то отсюда следует, что живая сила поступательного движения находится в постоянном отношении ко всей живой силе, содержащейся в газе, и это отношение зависит только от природы газа. Клаузиус нашел это отношение для всех двуатомных газов равным 0,6315, между тем, как для всех газов, в которых в молекулу объединяются больше чем два атома, на интрамолекулярные колебания затрачивается сравнительно большая часть всей живой силы.

Но здесь мы уже подошли к более специальным вопросам, далеко отстоящим от нашей задачи — обрисовать развитие понятия энергии. Достаточно указать на то, что

---

<sup>1</sup> R. Clausius, Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. Pogg. Ann. 100, p. 353, 1857.



попытка трактовать теплоту газа как живую силу отдельных частиц в действительности оказалась в основном удачной и что вследствие этого два различных вида энергии, которые до того времени по форме и содержанию считались различными, а именно теплота и движение, слились в один вид. Что тепловые явления, рассматриваемые с этой новой точки зрения, целиком следуют закону сохранения энергии, — заранее ясно, пока предполагают, как это и делается вообще в теории газов, что силы, действующие между молекулами и атомами, являются центральными силами, или что удар двух частиц является идеально упругим; ибо здесь мы находимся как раз в области чистой механики, для которой уже Гельмгольц отметил совпадение закона живых сил с законом сохранения энергии. То, что Гельмгольц обозначал общими выражениями „внутренняя сила напряжения“ и „живая сила“, было уточнено благодаря новой теории газов до деталей, и хотя распространение теории на жидкости и твердые тела до сих пор еще, вследствие более сложных соотношений, не сделало сколько-нибудь стоящих упоминания успехов, все же эти трудности в большей мере определяются несовершенством методов, чем существом дела.

Нам остается еще напомнить о дальнейшем ходе применений нашего принципа в области электричества и магнетизма в середине и в конце пятидесятих годов. Здесь мы впервые встречаем работу В. Томсона, которая дает своего рода обзорные различия видов энергии, встречающихся в электрических и магнитных процессах<sup>1</sup>. А именно, когда такой процесс производит работу, что естественно происходит всегда за счет какого-либо запаса энергии, то, согласно Томсону, эта работа совершается за счет одного из трех различных видов энергии, содержащихся в гальванических токах: 1) электростатической энергии, 2) магнитной энергии и 3) электрокинетической (электродинамической) энергии (стр. 73); если бы электрические частицы обладали инертностью, то живая сила движения в токе также внесла бы свою долю в этот последний вид энергии. Следовательно, суммируя эти три отдельные вида энергии,

---

<sup>1</sup> W. Thomson, On the mechanical values of distributions of electricity, magnetism and galvanism. Phil. Mag. (4) 7, p. 192, 1854.

получают содержащуюся в системе тел полную электромагнитную энергию.

Способ превращения энергии, происходящего в замкнутой гальванической цепи тока, подробно рассмотрен Козеном<sup>1</sup>. Выделение теплоты током должно было навести на мысль, что и этот процесс можно использовать для численного расчета механического эквивалента теплоты; согласно этому методу и был произведен ряд определений. После опытов Джоуля, упомянутых на стр. 39, которые дали число 460 килограммометров, Леру первый вновь вернулся к этому вопросу<sup>2</sup>. Посредством магнитоэлектрической динамомашинны он произвел ток и сравнил калорический эффект последнего с затратой механической работы. Результат оказался равным 458 килограммометрам на единицу теплоты. Фавр поступал несколько иначе: он возбуждал ток не при помощи магнитной индукции, а посредством гидроцепи, а затем включал электромотор и измерял теплоту, выделяемую током, сначала при работе мотора, а затем без нее<sup>3</sup>. В последнем случае выделенная теплота по отношению к химическому действию была естественно более значительной. Сравнение с работой, совершенной в первом случае, дало в качестве эквивалента числа, колебавшиеся между 426 и 464 килограммометрами.

Несколько меньшее значение — 399,7 — получил Квинтус Ицилийс непосредственным измерением джоулевой теплоты<sup>4</sup>. Последний был побужден к этому исследованию очевидным противоречием, которое получалось при сравнении значений теплоты тока, полученных из опытов Ленца<sup>5</sup> над гальваническим образованием теплоты, со значениями, требуемыми теорией. Это противоречие относилось к величине постоянного коэффициента  $c$  в формуле для теплоты

---

<sup>1</sup> J. H. Koosen, Über die Gesetze der Entwicklung von Wärme und mechanischer Kraft durch den Schliessungsdraht der galvanischen Kette. Pogg. Ann. 91, p. 427, 1854.

<sup>2</sup> J. P. le Roux, Memoire sur les machines magnéto-électriques. Ann. d. chim. (3) 50, p. 463, 1857.

<sup>3</sup> P. A. Favre, Recherches sur les courants hydro-électriques. Compt. Rend. 45, p. 56, 1857.

<sup>4</sup> G. v. Quintus Icilius. Über den numerischen Wert der Konstanten in der Formel für die electrodynamische Erwärmung in Metalldrähten. Pogg. Ann. 101, p. 69, 1857.

<sup>5</sup> E. Lenz, Über die Gesetze der Wärmeentwicklung durch den galvanischen Strom. Pogg. Ann. 61, p. 18, 1844.

тока, выделенной за единицу времени

$$Q = c \cdot J^2 \cdot W.$$

Если  $Q$  измерено в механической мере, то эта константа, согласно теории, равна единице — в предположении, что сила тока  $J$  и сопротивление  $W$  выражены в абсолютной мере (стр. 66); если же теплота задается в калориях, то  $c$  равно обратному значению механического эквивалента теплоты. Напротив, Гольцман <sup>1</sup> вычислениями на основании опытов Ленца <sup>2</sup> получил в четыре раза большее значение для  $c$ . Квинтус Ицилиус попытался сгладить спор между теорией и наблюдением; впрочем решение заранее было вне сомнения, ибо уже ранее Томсон (стр. 66) предпринял совершенно подобное же исследование и при этом нашел достаточно хорошее согласие.

На самом деле из опытов Квинтуса Ицилиуса получилось для этой константы значение меньшее, чем у Ленца, и более близко подходящее к тому, которое требуется теорией. Если соответственно требованию теории эту константу рассматривали как обратное значение механического эквивалента теплоты, то отсюда получалось выше названное число 399,7. Так как вопрос о причине расхождения результатов Ленца и Квинтуса Ицилиуса еще оставался нерешенным, то Босша вынужден был позднее еще раз вернуться к этому предмету, и тогда он констатировал, что вероятной причиной неверности числа, вычисленного из опытов Ленца, является значительное различие сортов меди, которые были использованы в опытах Ленца, данные которых были затем взяты в расчетах Гольцмана <sup>3</sup>.

Другой путь для нахождения механического эквивалента теплоты избрал Босша <sup>4</sup>, выражая электродвижущую силу гальванического элемента (Даниэля) один раз в единицах теплоты, а затем в абсолютных магнитных единицах и доля

<sup>1</sup> C. Holtzmann, Die mechanische Arbeit, welche zur Erhaltung eines elektrischen Stromes erforderlich ist. Pogg. Ann. 91, p. 260, 1854.

<sup>2</sup> E. Lenz, Über die Gesetze der Wärmeentwicklung durch den galvanischen Strom. Pogg. Ann. 61, p. 18, 1844.

<sup>3</sup> J. Bosscha, Über das mechanische Äquivalent der Wärme, berechnet aus galvanischen Messungen. Pogg. Ann. 108, p. 162, 1859.

<sup>4</sup> p. 169, l. c.

оба числа друг на друга; отношение дает механический эквивалент теплоты. Используя некоторые данные Джоуля, он нашел для эквивалента теплоты около 421,1 килограмметра.

Исходя из назревшей потребности, Босша первый сопоставил в 1858 г. все определения механического эквивалента теплоты, сделанные различными физиками как путем простого вычисления, так и непосредственно опытным путем, и получил таблицу, которая, правда, содержала довольно нестрые ряды чисел<sup>1</sup>. Все же наиболее достоверные опыты, к которым в первую очередь принадлежали опыты Джоуля и Гирпа, давали числа, колебавшиеся в основном в пределах между 420 и 430 килограмметрами. О более поздних определениях эквивалента теплоты мы будем еще говорить в третьем разделе этой книги.

Особый интерес вызвало к тому времени применение новых механических принципов к теории гальванических цепей и происходящих там подчас очень сложных процессов электролиза. Еще Гротгус сделал попытку обосновать теорию гальванического разложения на чисто механических представлениях; затем эти представления развил Клаузиус, причем для достижения лучшего согласия с законом Ома он все же ввел некоторые существенные видоизменения более старых воззрений<sup>2</sup>; так, прежде всего он ввел допущение, что молекулы электролита в естественном состоянии не обладают какими-либо определенными положениями равновесия, вокруг которых они колеблются, а движутся совершенно нерегулярно, причем в результате случайных комбинаций легко может случиться, что молекула распадется на обе свои составные части, электроположительную и электроотрицательную (частичные молекулы, *Teilmoleküle*), или, наоборот, что две отдельные частичные молекулы при случайном столкновении соединятся в одну общую молекулу. Мы все же не можем здесь более подробно заниматься этими отдельными вопросами, а исследуем лишь применения закона сохранения

---

<sup>1</sup> J. Bosscha, *Het behoud van arbeidsvermogen in den galvanischen Stroom*. Leiden 1858. E. Jochmann, *Fortschr. d. Phys.* v. J. 1858, p. 351.

<sup>2</sup> R. Clausius, *Über die Elektrizitätsleitung in Elektrolyten*, Pogg. Ann. 101, p. 338, 1857.

энергии к этим процессам, совершенно независимо от каких-либо специальных представлений. Сюда прежде всего относится исследование работы, которую ток совершает внутри электролита и которая в проводниках первого класса в общем превращается полностью в теплоту. Клаузиус нашел, что ее значение полностью соответствует значению работы в металлических проводниках <sup>1</sup>; следовательно, закон нагревания Джоуля справедлив и здесь, как уже давно было подтверждено экспериментом. Дело обстоит несколько иначе, если вставить в электролит пористую диафрагму, мембрану из животной ткани или что-либо подобное. Тогда в общем наступает явление электрического осмоса, т. е. известное количество жидкости гонится током через разделяющую стенку. В этом случае ток, кроме уже отданной работы, должен произвести еще другую работу, которая прежде всего обусловлена необходимостью преодоления гидростатического давления, противодействующего движению жидкости, а также и трения жидкости в порах стенки <sup>2</sup>.

Еще важнее для теории установление общей связи между химической работой тока и его термическими действиями — вопрос, который мы уже имели повод неоднократно затрагивать и который занимал физиков вплоть до новейшего времени; Босша первый занялся им специально. Основная мысль как его работы, так и всех последующих исследований по этому вопросу, — мысль, являющаяся непосредственным следствием закона сохранения энергии, — заключается в том, что в стационарном гальваническом токе сумма произведенной током теплоты эквивалентна полной затрате химической энергии. Но Босша сначала исходил из необоснованного предположения, что термические действия тока ограничиваются лишь джоулевой теплотой, откуда, согласно уже ранее развитым Гельмгольцем и Томсоном положениям, следовало, что электродвижущая сила должна непосредственно измеряться химической работой, потребляемой единицей тока в единицу времени. Это положение, правда, подтвердилось специально для элемента Даниэля (стр. 67). Определив сначала электродвижущую силу такого элемента электромагнитным способом

<sup>1</sup> R. Clausius, l. c., p. 340.

<sup>2</sup> p. 357, l. c.

и сравнив затем ее значение с результатами термохимических опытов Фавра и Зильбермана, Эндрюса и Джоуля, Босша нашел вполне удовлетворительное совпадение <sup>1</sup>. Уверенность в том, что электродвижущая сила цепи эквивалентна соответствующему ей химическому тепловому действию, была тогда повидимому весьма широко распространена; так, Мари-Дэви и Труст решили совсем отказаться от термохимических опытов и вместо них наблюдать лишь магнитную иглу, что, конечно, было несколько поспешно <sup>2</sup>. Как только обратили внимание на то, что кроме джоулевой теплоты в цепи тока имеют место также и другие термические действия (теплота Пельтье была и так давно известна), то это следствие из основного принципа должно было быть поставлено под сомнение. Но мы уже показали на стр. 68, что теплота, вторично выделенная или поглощенная, необходимо требует видоизменения этого правила; и наоборот, из каждого отклонения величины электродвижущей силы от вышеуказанного правила следует с необходимостью заключить, что в цепи имеет место тепловое действие, отклоняющееся от действия по закону Джоуля.

Босша также уяснил себе это следствие и попытался его проверить в деталях <sup>3</sup>. Приведенное уже выше (стр. 67) воззрение Фарадея <sup>4</sup>, что в цепи Даниэля электродвижущее действие производит только окисление цинка и меди, а растворение или выделение окиси вызывает лишь местное тепловое действие, было им отклонено, так как электродвижущая сила, вычисленная на основе этого допущения из опытов Фавра и Зильбермана, оказалась слишком малой; напротив, при разложении воды он увидел себя вынужденным принять местное возникновение теплоты. Именно, если электродвижущую силу поляризации при разложении воды между платиновыми электродами вычисляют один раз из

<sup>1</sup> J. Bosscha, Über die mechanische Theorie der Elektrolyse. Pogg. Ann. 101, p. 517, 1857.

<sup>2</sup> Marié-Davy et Troost, Mém. sur l'emploi de la pile comme moyen de mesure des quantités de chaleur développées dans l'acte des combinaisons chimiques. Ann. d. chim. (3) 53, p. 423, 1858; Compt. Rend. 46, p. 936, 1858.

<sup>3</sup> J. Bosscha, Über die mechanische Theorie der Elektrolyse. Pogg. Ann. 103, p. 487, 1858; далее 105, p. 396, 1858.

<sup>4</sup> M. Faraday, Exp. Res. Phil. Trans., London 1834, Apr., § 919.

теплоты сгорания водорода, а затем из вызванного включением разлагающего аппарата ослабления электрического тока, то находят, что второе число примерно на 60% больше первого. Это отклонение по мнению Босша зависит от того обстоятельства, что электролитически выделенные газы не сразу появляются в их обычном виде, а сначала проходят через „активное“ состояние, аллотропическую модификацию, которая характеризуется тем, что в ней каждый газ обладает большей потенциальной энергией (атомы менее связаны), чем в естественном состоянии, вследствие чего при соединении активных газов друг с другом должно иметь место большее тепловое действие; электродвижущая сила, наблюдаемая при поляризации, по мнению Босша, соответствует этой большей теплоте связи в активном состоянии. С другой стороны, после того как газы переходят к их естественному состоянию, в каждом газе освобождается определенное локальное количество теплоты, причем это количество не находится ни в какой прямой зависимости с электрическими процессами. Согласно этому представлению, избыток энергии, который дает электродвижущая сила поляризационного тока по сравнению с химической теплотой сгорания водорода, должен быть эквивалентен местной теплоте, освобождающейся в обоих газах при переходе из активного состояния в естественное. Эта местная теплота естественно вызывает значительное ослабление тока во всей цепи, в которой протекает разложение воды, так как затрата энергии, которой она требует, происходит за счет электродвижущего действия.

Так как впрочем согласно опыту электродвижущая сила поляризации не постоянна, а существенно зависит от плотности тока у электродов, то Босша должен был принять дальнейшее допущение, что не вся теплота, освобождающаяся при переходе газа из активного состояния в естественное, проявляется локально, но что при больших поверхностях электродов, где определенная часть газа переходит в обычное состояние уже непосредственно у электродов, соответствующее количество энергии передается всему току и, следовательно, превращается в джоулеву теплоту. Этим можно было бы объяснить зависимость поляризационного тока от плотности тока, а также от природы металла электродов и от электролита.

Разумеется, что о непосредственной причине локального

выделения теплоты можно держаться и других взглядов, чем Босша, — это вопрос, о котором принцип сохранения энергии заранее не позволяет делать какого-либо заключения: принцип энергии удовлетворяется, если локальная теплота вообще проявляется в заранее рассчитанном количестве в соответствующем месте.

Об этих требуемых принципом энергии отклонениях гальванического образования теплоты от джоулева закона Босша яснее всего высказывается в более поздней работе, в которой главным образом рассматривается столб Смее и локальное выделение теплоты в нем <sup>1</sup>.

Мы теперь подошли в изложении истории развития нашего принципа примерно к 1860 г. За короткое время, примерно в 18 лет, этот закон из совершенно скрытого или по крайней мере незамеченного бытия поднялся до уровня господствующей силы во всей области естествознания; до этого времени такую историю испытало только великое открытие Ньютона, но оно относится лишь к ограниченной области явлений природы. При такой скорости распространения не следует удивляться, если и в это время все еще встречались отдельные физики, в особенности среди более старого поколения, которые не совсем подружился с новыми идеями. Известно, что гениальный Фарадей находил некоторые недостатки в понятии потенциальной энергии, в той форме, которую ему придал Ранкин <sup>2</sup>. Он не хотел удовольствоваться простым допущением, что два притягивающихся тела обладают на большем расстоянии большей потенциальной энергией, а искал для этой энергии особый физический субстрат в измененных свойствах промежуточной среды; но следует, конечно, заметить, что эти соображения касаются собственно не содержания принципа энергии, а лишь способа его проведения.

Что при применении нового принципа случались также и недоразумения, не должно слишком удивлять, учитывая непривычность обусловленного этим принципом способа мышления и заключения. Уже Гельмгольц в своей работе

---

<sup>1</sup> J. Bosscha, Über das Gesetz der galvanischen Wärmcentwicklung in Elektrolyten. Pogg. Ann. 108, p. 312, 1859.

<sup>2</sup> M. Faraday, On the conservation of force. Phil. Mag. (4) 13, p. 225, 1857; 17, p. 166, 1859 etc. Cp. M. Rankine, On the phrase „potential energy“ and on the definitions of physical quantities. Phil. Mag. (4) 33, p. 88, 1867.



„О сохранении силы“<sup>1</sup> обсуждает некоторые возражения, которые Matteucci, исходя из собственных опытов, выставил против допустимости новых представлений, правда, тогда еще не сформулированных в виде особого принципа<sup>2</sup>; обоснование им этих возражений лучше всего показывает, как трудно было тогда физику школы проникнуть в дух принципа. Между прочим он приводит в качестве возражения тот факт, что цинк при своем растворении в серной кислоте выделяет одинаковое количество теплоты как в том случае, когда он растворяется обычным химическим путем, так и тогда, когда пользуясь платиновой пластиной в качестве второго электрода, образуют гальваническую цепь (цепь Смея). В первом случае процесс производит только теплоту, во втором же случае — одновременно теплоту и электричество, и поэтому согласно вышеуказанному положению количество теплоты, выделенной в последнем случае, должно было быть меньше на величину эквивалента произведенного электричества. Matteucci не обратил внимания на то, что этот эквивалент в конце процесса равен нулю, ибо произведенное электричество вновь исчезает, оно служит лишь средством для перевода химической потенциальной энергии в термическую энергию.

Еще более невероятным кажется нам утверждение, будто ток должен, согласно принципу, произвести меньше теплоты в цепи, когда он отклоняет магнитную стрелку, чем в том случае, когда такое отклонение не имеет места; ибо это заключение основано на полном непонимании понятия работы.

Но еще и в более позднее время мы иногда встречаем ошибочные мнения. Так, Соре в 1857 г. считал предварительным постулатом для принципа сохранения энергии положение, что гальванический ток, который посредством электромагнитных действий производит механическую работу в одной части цепи, должен в этой части выделять меньше Джоулевой теплоты, чем в другой части, обладающей таким же гальваническим сопротивлением, но не производящем механических действий, — ошибка, в которую впрочем впали и другие физики<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> H. v. Helmholtz, *Wiss. Abh.* I, p. 66, 1883.

<sup>2</sup> Matteucci, *Bibl. univ. Genève Suppl.* Nr. 16, 1847, p. 375.

<sup>3</sup> L. Soret, *Recherches sur la corrélation de l'électricité dynamiques et des autres forces physiques*, *Arch. d. sc. phys.* 36, p. 38, 1857.

Если мы отвлечемся от этих единичных случаев недоразумений, то мы можем со всей определенностью утверждать, что около 1860 г. борьба вокруг признания новой теории закончилась и решение было окончательно принято в ее пользу. Принцип сохранения энергии подтвердился в качестве вполне приемлемого принципа всюду, где разработка экспериментальных методов дошла до такого состояния, что позволяла его проверить, и был принят в число аксиом, которые служат основой и исходным пунктом дальнейшего исследования. Постепенно слово „энергия“ внедрилось и на континенте, перейдя сюда из Англии, в особенности после того, как Клаузиус ввел это понятие в учение о теплоте.

С этого времени начинается новая эпоха в развитии всего точного естествознания. До тех пор, всюду, где еще не удалось, как в механике и астрономии, найти основные законы, управляющие всеми отдельными явлениями, приходилось пользоваться чисто индуктивным методом; с этого времени стали обладать принципом, который, будучи испытан во всех известных областях путем тщательных исследований, являлся отличным руководством и в совершенно неизвестных и неисследованных областях.

Прежде всего уже вся постановка вопроса была направлена по правильному пути, а это уже является одним из существенных элементов успешного исследования; и кроме того, на всем протяжении этого пути в руках исследователя был безошибочный контроль, применение которого никогда не изменяло. С тех пор принцип энергии образует солиднейший исходный пункт всех естественно-научных умозрений и уже многократно был использован для этой цели.

Но одновременно мы видим, какие последствия для нашего настоящего исследования влечет за собой это изменение роли принципа среди остальных законов природы. Если до того это положение было узко ограничено, относящаяся сюда литература была более или менее резко отделена от остальной, то теперь применения начинают распространяться по всем направлениям и постепенно теоретизироваться в специальных областях; и если мы хотим рассмотреть следы дальнейшего исторического развития принципа, хотя бы только в физике, то мы наталкиваемся на отдельные и очень детальные вопросы, которые, большей частью еще ждут окончательного разрешения.

Поэтому, поскольку вообще эти вопросы еще относятся к истории принципа, а не являются лишь чистыми применениями его к различным недоказанным гипотезам, нам кажется целесообразным в интересах наглядности рассматривать их не здесь, а лишь в связи с изложением различных отдельных видов энергии, в третьем отделе этой книги; второй же раздел посвящен задаче — на основе предшествующего исторического развития обосновать понятие энергии во всей его всеобщности, разделить различные виды формулировок принципа сохранения энергии и наглядно их расположить и, наконец, критически рассмотреть доказательства справедливости принципа и их силу.

## ВТОРОЙ РАЗДЕЛ

### ФОРМУЛИРОВКА И ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ПРИНЦИПА

Каждое физическое определение, претендующее на пригодность, должно в конечном счете сводить определяемое понятие к таким понятиям, происхождение которых коренится в непосредственных чувственных восприятиях — так, чтобы для более или менее точного числового выражения соответствующей величины требовалось только непосредственное наблюдение. Явления природы доходят до нашего сознания через самые различные чувства; поэтому здесь, где дело идет прежде всего об установлении общего определения понятия энергии, не было бы полезно исходить с самого начала из механического понимания природы. В самом деле, ведь механическая мера, которой мы можем измерить любое явление, дана нам не непосредственно; наоборот, ее нужно сперва найти. Поэтому первой нашей задачей прежде всего явится обоснование определения энергии исключительно на измеримых фактах, независимо от какого-либо частного понимания.

Исходя из этой точки зрения, мы можем поступить двояким образом. А именно мы можем определять энергию некоторой материальной системы как функцию, значение которой зависит определенным образом от переменных, определяющих состояние системы, следовательно, от положения, скорости, температуры и тому подобных материальных элементов системы. Но это определение предполагает уже справедливость принципа сохранения энергии; ибо для того, чтобы знать, что такая функция вообще существует и как именно она составляется из отдельных величин, необходимо уже знать и применять принцип.

Поэтому мы сначала отдадим предпочтение другому определению энергии, — в основном высказанному В. Томсоном (стр. 71), — которое безотносительно к справедливости прин-

ца сохранения энергии позволяет подсчитать значение энергии материальной системы единственно на основании внешних доступных наблюдению действий, производимых материальной системой при некотором изменении своего состояния. Для этого мы определим энергию (способность производить работу) материальной системы в некотором определенном состоянии, как измеренную в механических единицах работы величину всех действий, которые совершаются вне системы, когда последняя переходит любым образом из своего состояния в произвольно фиксированное нулевое состояние.

Прежде всего требуются некоторые частные разъяснения тех выражений, которые содержатся в формулировке этого положения. Под „произведенными вне системы действиями“, или, короче, под „внешними действиями“, мы понимаем все изменения, происшедшие в природе в результате рассматриваемого процесса, которые связаны с положением и свойствами окружающих тел, не входящих в данную систему; под этим понимается, следовательно, так же и изменение положения системы относительно окружающей среды, ибо оно зависит не только от положения самой системы, но и от положения окружающих тел. Чтобы получить внешние действия во всей их полноте, лучше всего представить себе систему сначала полностью изолированной в бесконечном пространстве и только тогда ввести те тела, действие которых необходимо для выполнения требуемого перехода. Если, например, система движется под влиянием тяжести, то к внешним действиям относится также изменение положения системы относительно Земли; измеренное в единицах работы значение этого изменения является той работой, которая производится силой тяжести при движении (подробнее об этом будет дальше). Конечно, когда Земля включается в рассматриваемую материальную систему, получается нечто другое; тогда работа силы тяжести уже не является внешним действием.

Далее, что касается употребленного в определении выражения „измеренная в механических единицах работы величина“ (короче: механический эквивалент) внешних действий, то оно, конечно, имеет определенный смысл только при одном из следующих предположений: либо внешние действия суть исключительно механические по своей

природе, т. е. заключаются в получении или затрате живой силы или механической работы, либо, в том случае если они — какой-либо другой природы, их механический эквивалент известен каким-либо иным образом. Но, если ни одно из этих предположений не выполняется, если мы принимаем, например, что внешние действия состоят в выполнении какого-либо своеобразного изменения, в образовании некоторого движущего начала, механический эквивалент которого неизвестен, то данное нами определение, естественно, изменяет нам, т. е. перестает быть пригодным. Чтобы выйти из положения, нужно попытаться устранить каким-нибудь путем вновь произведенное движущее начало, употребляя его, например, для совершения механической работы или же для произведения таких действий, которые сводимы к механической мере работы (механический эквивалент которых известен). Если эта попытка удастся, то можно в конце концов выразить все внешние действия через эквивалент работы и таким образом достигнуть цели; тогда механический эквивалент некоторого действия представляется в виде такого количества работы, в которое это действие может быть превращено. Впрочем при этом остается еще совершенно нерешенным, получается ли различное количество работы, если превращение происходит различным способом. Но вполне мыслим также и случай, что превращение нового агента полностью в механические действия вообще невозможно, и в этом случае данное разъяснение понятия механического эквивалента, а, стало быть, также и определение энергии — неудовлетворительно.

Предположим, например, что нам еще неизвестен механический эквивалент теплоты и что мы должны подсчитать энергию какого-нибудь тела при определенной температуре и обычном атмосферном давлении; пусть нулевое состояние тела характеризуется определенной меньшей температурой, хотя бы  $0^{\circ}\text{C}$ . Очень легко привести тело в нулевое состояние, отнимая у него определенное количество теплоты, например, посредством теплопроводности. Но производимое при этом внешнее действие, нагревание среды, никакими средствами не может быть превращено полностью в механическую работу; какие бы опыты ни были произведены для этой цели, всегда остается некоторое изменение, которое непосредственно в единицах работы нельзя измерить,

Можно было бы эту теплоту превратить в работу, например, посредством расширения носителя теплоты, но тогда в этом расширении снова имелось бы некоторое действие, механический эквивалент которого неизвестен и которое, стало быть, не сводилось бы к изменениям, измеряемым механически; короче говоря, этим путем никогда нельзя было бы получить выражение для значения энергии.

Из этого следует, что в приведенном случае данное толкование понятия „механического эквивалента“ действия требует соответственного дополнения. Это дополнение мы можем основать на том обстоятельстве, что если некоторое действие не может быть полностью превращено в механическую работу, то все же оно может быть само произведено путем затраты известного количества работы. Поэтому во всех случаях, где первое толкование недостаточно, мы обозначим в качестве механического эквивалента внешнего действия такое количество работы, которое нужно затратить, чтобы это действие произвести, или, короче, которое может быть превращено в это действие ие любым путем; таким образом при всех обстоятельствах мы получаем выражение для механического эквивалента работы внешних действий и тем самым для энергии рассматриваемой системы. Это, в самом деле, обнаруживается непосредственно в описанном примере, где внешнее действие состоит в нагревании тела. В то время как полностью превратить это действие в работу невозможно, все же в нашем распоряжении имеются различные методы, чтобы вызвать это действие применением чисто механических средств, т. е. чтобы нагреть тело от первоначальной более низкой до более высокой температуры, имеются такие механические средства, как удар, трение, сжатие. При применении последнего способа нужно, конечно, позаботиться о том, чтобы после произведенного сжатия тело вновь расширилось без затраты внешней работы, с тем, чтобы теплота, полученная от сжатия, не терялась после того, как тело возвратится к своему первоначальному давлению. Механический эквивалент нагревания равен, таким образом, количеству работы, которая это нагревание вызывает.

Отсюда мы видим, что при употреблении указанных положений определение энергии какой-нибудь материальной системы во всех случаях дает по крайней мере одну, выработанную в известных единицах положительную или отри-

цательную величину, которая может быть установлена с большей или меньшей точностью, в зависимости от точности имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных методов. Само собой понятно, что это определение независимо от каких-либо гипотетических представлений о свойствах действующих в природе различных начал, в частности, независимо также и от механического воззрения, так как это определение покоится единственно на непосредственном измерении величин механической работы; дальше, и что особенно замечательно, оно совсем независимо от справедливости принципа сохранения энергии, ибо оно оставляет совершенно нерешенным вопрос о том, будет ли значение энергии различным или нет при применении различных методов перевода материальной системы из данного состояния в нулевое состояние; вместе с тем оно оставляет совершенно открытым вопрос о том, соответствует ли всякое внешнее действие однозначно определенному механическому эквиваленту.

Мы должны здесь особо разобрать одно возражение, которое может быть выставлено против употребления данного определения. А именно может случиться, что переход системы из данного состояния в произвольно фиксированное нулевое состояние вообще невыполним. Пусть, например, материальная система состоит из определенного количества углерода, которое в нулевом состоянии образует модификацию алмаза, а в данном состоянии, энергия которого должна быть определена, выступает, например, в виде аморфного угля. Здесь переход в нулевое состояние невыполним никакими экспериментальными средствами<sup>1</sup>, хотя обратный переход и возможен, и, стало быть, определение энергии с самого начала отказывается служить. Мы даже можем идти еще дальше. Вполне мыслимы случаи, в которых переход не может быть осуществлен ни в одном направлении: ни из данного состояния в нулевое, ни в обратном; однако — это, конечно, является предположением — в обоих состояниях налицо одна и та же система, т. е. те же химические элементы. Выберем для этого определенный пример. Декстроза и левулеза являются двумя химическими

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* За истекший период Муассон (Moisson) нашел способ получения алмаза из угля. Однако этот метод для измерения энергии не применим, и поэтому в дальнейшем может быть использован вышеприведенный пример.



индивидами совершенно одинакового количественного состава, так что можно мыслить соединение тех же самых атомов один раз в декстрозу, а другой раз — в левулезу. Однако в то же время оба эти соединения не превращаемы друг в друга, и также никак не могут быть синтетически образованы из своих элементов; стало быть, при теперешнем состоянии науки невозможно никакими внешними средствами, в том числе и разложением на элементы, перевести систему из одного состояния в другое. И если бы удалось было определить энергию некоторого количества декстрозы, считая нулевым состоянием такое же количество левулезы, то данное определение энергии совершенно изменило бы нам; к этому примеру возможно, конечно, присоединить еще много других.

На приведенное возражение мы можем ответить двояким образом. Во-первых, мы могли бы с известным правом сослаться на то, что здесь речь идет вовсе не о действительно выполняемом измерении значения энергии, которое и без того не может быть произведено с абсолютной точностью, и для которого мы все равно должны найти другие методы. Здесь же идет речь об установлении достаточно ясного смысла понятия энергии, независимо от того, является ли путь, которым достигнуто это понятие, доступным только для представления или также и для эксперимента. Для этого было бы достаточно доказательством того, что описанный переход из данного состояния в нулевое вообще возможен в природе, т. е. что существующие силы природы при соответствующем взаимодействии в состоянии вызвать этот переход. Надо помнить в виду, что эксперимент заключается только в более или менее произвольном комбинировании известных сил природы и что область, на которую эти комбинации распространяются, во всяком случае можно считать крайне ограниченной по сравнению с многообразием согласованных действий, постоянно протекающих без нашего участия в неорганическом и органическом мире. Если мы и не в состоянии превратить по желанию аморфный уголь в алмаз, то все же ничто не мешает нам принять — об этом говорят многие аналогии, — что может быть на протяжении тысячелетий алмаз мог выделяться в кристаллизационном процессе из раствора обычных соединений углерода, а если с этим согласиться, то можно с уверенностью говорить и об определенных

внешних действиях и их работе. Во всяком случае еще неизвестен ни один факт, который мешал бы нам верить, что силы природы в состоянии перевести все субстанции, включая органические субстанции и организованные тела, во все другие, если только они образованы из тех же самых химических элементов; итти дальше этого нет необходимости.

Принципиальная важность изложенных здесь положений требует того, чтобы мы, стремясь к устранению малейшего пробела в определении понятия энергии, учитывали возможность хотя бы самого по себе и невероятного предположения. В самом деле, в каждом случае, когда наше определение по какой-либо причине не приводит к цели, мы можем помочь себе другим путем, а именно тем, что упомянутый случай мы пока совсем исключим из рассмотрения и вернемся к подходящему для него определению понятия энергии только позднее (стр. 103), когда мы овладеем различными положениями, позволяющими вычислить величину энергии при всех обстоятельствах.

К этим положениям мы приходим через установление принципа сохранения энергии, который мы во всех случаях, где определение энергии вообще применимо, можем выразить следующим образом: энергия материальной системы в определенном состоянии, взятая в отношении к другому определенному „нулевому“ состоянию, имеет однозначное значение; или, другими словами, если мы заменим здесь формулировку определения (стр. 96): измеренная в единицах механической работы величина всех действий (механический эквивалент), которые материальная система производит в своем внешнем окружении, когда она любым образом переходит из некоторого определенного состояния в произвольно фиксированное нулевое состояние, имеет однозначное значение и является, следовательно, независимой от способа перехода<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* Этот закон содержит одновременно определенное указание, относящееся к экспериментальному доказательству справедливости принципа энергии в природе, применимое во всех случаях, когда система может переходить из одного определенного состояния в другое несколькими способами. Одну и ту же систему переводят двумя различными путями из одного определенного состояния в другое произвольно выбранное нуле-

Откладывая доказательство этого закона до другого места, мы берем его здесь пока как данный; приведем сначала только доказательство, что все другие формы, в которых обычно выражают этот принцип, могут быть выведены из приведенной нами и, стало быть, заключаются в ней.

Прежде всего — принцип невозможности *perpetuum mobile*. Если мы установим нулевое состояние системы таким образом, что оно тождественно с данным состоянием, энергию которого нужно определить, то мы можем положить величину энергии равной нулю, так как тогда, очевидно, система не нуждается ни в каком внешнем изменении для того, чтобы перейти от первоначального состояния в нулевое. Но эта величина, равная нулю, однозначна для любого способа перехода, и, следовательно, мы имеем закон: механический эквивалент действий, которые некоторая материальная система вызывает в своем внешнем окружении, равен нулю, когда система, выходя из некоторого определенного состояния, изменяется любым образом, и, наконец, вновь возвращается в первоначальное состояние (короче говоря, когда она проделывает циклический процесс). Но между тем как этот закон, исключаящий возможность создания *perpetuum mobile*, с необходимостью вытекает из вышеприведенного принципа, логически вывести из него (т. е. из принципа невозможности *perpetuum mobile*. *Пер.*) принцип энергии невозможно, как мы пока только заметим, а потом докажем подробнее.

Другой вывод из этого принципа получается следующим образом. Весь процесс  $A \rightarrow N$ , когда материальная система переходит из начального состояния  $A$  через некоторые промежуточные состояния  $B, C, \dots, M$  в конечное состояние  $N$ , мы можем мысленно разложить на любое число следующих друг за другом отдельных процессов:  $A \rightarrow B, B \rightarrow C, \dots, M \rightarrow N$  таким образом, что конечное состояние каждого отдельного процесса, вплоть до послед-

---

вое состояние, а затем соответствующими измерениями исследуют, является ли в обоих случаях работа всех внешних действий одной и той же или нет. Смотря по тому, получается ли первое или второе, принцип либо верен, либо неверен. Из этого следует, что принцип сохранения энергии не является ни тавтологией, ни замаскированным определением, ни постулатом, ни априорным суждением; он представляет собой опытный закон.

него, составляет начальное состояние последующего. Тогда очевидно, что величина работы внешних действий для всего процесса  $A \rightarrow N$  равна сумме тех соответствующих величин, которые приходится на каждый отдельный процесс, а отсюда вытекает положение: энергия системы в состоянии  $A$ , отнесенная к нулевому состоянию  $N$ , равна сумме энергий в состояниях  $A, B, C, \dots, M$ , отнесенных к соответствующим нулевым состояниям  $B, C, D, \dots, N$ ; выражая это положение в легко понятном обозначении, получим

$$[AN] = [AB] + [BC] + [CD] + \dots + [MN].$$

К этому положению мы добавим еще другое, такое же простое. Согласно только что выведенному уравнению, в связи с принципом невозможности *perpetuum mobile*,

$$[AN] + [NA] = [AA] = 0;$$

откуда

$$[AN] = -[NA],$$

т. е. энергия системы в состоянии  $A$ , взятая в отношении к состоянию  $N$ , которое принимается за нулевое, равна и противоположна энергии системы в состоянии  $N$ , взятой в отношении к состоянию  $A$  как нулевому. Очевидно, что для применяемых символов имеют место совершенно такие же законы вычисления, как и для геометрического сложения отрезков.

Мы можем теперь использовать выведенные здесь положения, чтобы дополнить общее определение понятия энергии, которое мы распространим также и на случаи, до сих пор исключенные из рассмотрения (стр. 101). Именно, если переход из состояния  $A$  в состояние  $N$  невыполним, но возможен переход от  $N$  к  $A$ , как в одном из вышеприведенных примеров, то мы определим искомую энергию  $[AN]$ , как энергию  $[NA]$  с противоположным знаком; при еще более сложных обстоятельствах мы вводим любые промежуточные состояния  $B, C, \dots$  и разлагаем весь переход от  $A$  до  $N$  на ряд отдельных переходов, которые могут быть выбраны так, что каждый, сам по себе, возможно выполнять или в прямом или в обратном направлении. Таким путем мы всегда можем, применяя приведенные законы, прийти к выражению энергии; потому что, если бы

это не могло иметь места, если бы мы не могли последовательно получить переход от  $A$  до  $N$  путем введения соответствующих промежуточных состояний, то мы имели бы перед собой в обоих этих состояниях вообще не одну и ту же материальную систему, и, стало быть, тогда вопрос о значении энергии был бы с самого начала абсурдным.

Что такой способ расширения определения энергии не представляет искусственного усложнения понятия, а основан на природе вещей, лучше всего следует из того, что при всяком практическом выплнении энергии материальной системы, например, в термодинамике, на самом деле приходится пользоваться способом, предписанным нашим определением; нет никакого другого средства и никакого другого метода измерения, который позволил бы нам миновать найденный нами путь для определения значения энергии.

Если мы отнесем энергию материальной системы в определенном состоянии  $A$  один раз к состоянию  $N$ , как к нулевому, а потом к другому состоянию  $N'$ , то из соотношения

$$[AN] - [AN'] = [AN] + [N'A] = [N'N]$$

вытекает, что равенство в значениях энергии состояния  $A$ , обусловленная различным выбором нулевых состояний, дается величиной, которая зависит вовсе не от свойств состояния  $A$ , а исключительно от свойств обоих нулевых состояний. Поэтому если мы при определении энергии оставляем выбор нулевого состояния совершенно открытым, то тем самым мы оставляем неопределенным в выражении энергии только некоторую аддитивную постоянную.

Но теперь мы дадим принципу еще другую формулировку, которая очень важна для наших предстоящих рассуждений. Если мы представим себе материальную систему, переведенную посредством какого-либо процесса из одного состояния  $A$  в другое состояние  $B$ , то работа имевших место внешних действий в принятом нами обозначении равна

$$[AB] = [AN] - [BN],$$

причем  $N$  представляет собой произвольно выбранное состояние той же системы; т. е. энергия системы, отнесенная к некоторому произвольно фиксированному нулевому состоянию  $N$ , в результате этого процесса уменьшилась на вели-

чину работы возникших внешних действий, или, что то же самое, энергия системы увеличилась на величину работы действий, которые исчезли, использованы, затрачены вне системы, чтобы изменить состояние системы.

Если процесс протекает таким образом, что во внешнем окружении не обнаруживается никаких действий, то  $[AB] = 0$  и, следовательно,  $[AN] = [BN]$ . Энергия в состоянии  $A$  равна энергии в состоянии  $B$ .

Таким образом энергия материальной системы, определенная в отношении к произвольному нулевому состоянию, не изменяется, если при выполнении какого-либо процесса не совершаются никакие внешние действия, или, другими словами, если в системе имеют место только внутренние действия. В этой форме принцип представляется как принцип сохранения энергии; эта форма, благодаря несколько измененной трактовке понятия энергии, оказывается чрезвычайно удобной в смысле непосредственной наглядности и плодотворной для дальнейшего рассмотрения. А именно до сих пор мы всегда рассматривали энергию системы как величину, понятие которой существенно связано с внешними действиями, вызываемыми системой при каких-либо изменениях; ибо, по определению, величина энергии измеряется только через внешние действия, и поэтому, если энергии хотят мысленно приписать материальный субстрат, то его надо искать в окружении системы; только здесь энергия находит свое объяснение, а следовательно, и свой смысл. Поскольку материальную систему совершенно абстрагируют от внешних действий, нельзя говорить об ее энергии, потому что тогда она не определена. В согласии с этим пониманием находится обозначение энергии Кирхгофом, как „функции действия“ („Wirkungsfunktion“). С другой стороны, из выведенной последней формы принципа мы видим, что энергия системы остается постоянной, если происходящий в ней процесс не вызывает никаких внешних действий, хотя внутренние действия могут быть значительными и разнообразными. Это положение приводит нас к трактовке содержащейся в системе энергии как величины, которая по своему смыслу независима от внешних действий. Система обладает известным количеством энергии, которая при фиксированном нулевом состоянии полностью определяется мгновенным состоянием и может быть во всякое время подсчитана путем перевода

системы в нулевое состояние. Это количество остается постоянным, будет сохраняться, пока система не передает вовне и соответственно не получает извне никаких действий, внутренние же действия изменяют только ее форму, но не величину. Теперь мы можем представить себе энергию как находящуюся внутри самой системы, как род запаса (по К. Нейману: „капитал“), который не уничтожается внутренними действиями, и это понимание чрезвычайно удобно для непосредственного представления, благодаря своей аналогии с сохранением материи, которая также может превращаться в различные формы, но не изменяется по своему количеству (массе). Так же как общая масса тела представляется как сумма отдельных масс содержащихся в нем химических субстанций, так и энергия системы составляет сложением отдельных видов энергии, и можно проследить до малейших деталей изменение и превращение этих различных видов энергии, подобно тому как это можно сделать в отношении изменений материи, чему мы в последующем найдем многочисленные примеры. Несомненно, что главным образом на этой аналогии основана та сравнительно поразительная легкость, с которой принцип сохранения энергии завоевал в течение нескольких лет всеобщее признание и стал всеобщим убеждением.

Можно было бы поставить здесь вопрос, полезно ли в самом деле для нормального развития принципа такое отклонение от первоначального определения понятия и субстанциональное его толкование, которое основано все же исключительно на аналогии и, стало быть, само по себе, не дает права на какие-либо выводы. В самом деле, нужно согласиться, что этот вопрос заранее отнюдь нельзя считать недопустимым, ибо можно даже доказать, что благодаря именно этой измененной трактовке понятие энергии (речь идет о понятии, а не о величине, которая дана раз навсегда через общее определение) приобретает нечто неопределенное. Вспомним, например, о различных толкованиях, которые могут быть даны понятию электростатической энергии системы заряженных проводников в равновесном состоянии. Одни ищут энергию в некотором напряженном состоянии диэлектрика, окружающего систему проводников, и считают ее распределенной в пространстве диэлектриков, другие же — в дальнем действии электрических зарядов проводника, распределенных по их поверхности.

Пока противоречие между обеими теориями остается неразрешенным, т. е. пока ограничиваются рассмотрением таких процессов природы, которые одинаково удовлетворительно объясняются обеими теориями, этот вопрос остается совершенно открытым; в таком случае неопределенность лежит в понятии энергии, в том, что неизвестно место, которое должно быть ей отведено, и нет никакого средства найти его. Если же оставаться при первоначальном определении, то энергия понималась бы только как некоторое определенное число, как известная величина работы, и при этом исключается, конечно, всякая неопределенность понятия.

А между тем именно из названного примера, — за которым позднее последуют еще другие, — ясно, что с субстанциональной трактовкой понятия энергии, о котором идет здесь речь, связана не только большая степень наглядности, но и прямой прогресс в познании. Этот прогресс основан на побуждении к дальнейшему физическому исследованию. При такой трактовке уже не станут удовлетворяться знанием численного значения энергии, но попытаются доказать существование различных видов энергии в различных элементах системы в отдельности и проследить их переход в другие формы и к другим элементам точно так же, как это делается по отношению к движению некоторого количества вещества в пространство. Но поскольку вопрос ставится так, неопределенность, лежащая до сих пор в самом понятии, принимает форму некоторой разрешимой физической проблемы; и в самом деле, надо ожидать, что благодаря детальному исследованию способа действия всех действующих в природе начал, станет совершенно определенным и физическое значение энергии, так что тогда всю энергию материальной системы можно будет рассматривать как совокупность отдельных элементов, каждый из которых имеет свое особое, определенное место в материи. Можно согласиться, что это так называемое вещественное понимание энергии как запаса действий, мера которых определяется мгновенным состоянием материальной системы, когда-либо позднее, возможно, и отслужит свою службу, и уступит место другому более общему и более высокому понятию. Во всяком случае задача физического исследования в настоящее время — развить во всех деталях эту трактовку, как наиболее наглядную и плодотворную, и проверить ее следствия с помощью опыта; в этом направлении



можно отыскать еще и другие новые точки зрения, как это мы увидим позднее.

Ставя себе задачей систематически провести это в работе, причем мы будем одновременно знакомиться с наиболее удобными для применения формами принципа, мы исходим из рассмотрения любого процесса в природе, происходящего в какой-нибудь материальной системе. Такой процесс состоит всегда в ряде изменений, которым подвержена система. При этом мы можем всегда различать два случая. Один случай, когда изменения, происходящие в системе, совершенно независимы от внешнего окружения, в котором система находится; так что, если мыслить всю не относящуюся к системе материю удаленной из пространства, процесс протекал бы совершенно таким же образом; в этом случае мы говорим только о внутренних действиях. Другой случай, — когда течение процесса существенно подвержено влиянию внешних тел; в этом случае мы должны привлечь к рассмотрению, кроме возможных внутренних действий, еще и внешние. Ясно, что это различие между внутренними и внешними действиями не является абсолютным, но существенно зависит от выбора материальной системы: мы можем свести всякое внешнее действие к внутреннему, мысленно включая в систему тела, в которых или между которыми действие происходит; поэтому для любого взятого процесса всегда можно достигнуть путем соответствующего расширения системы того, что все изменения представляются как внутренние действия. Строго говоря, не существует вообще никакого процесса, который бы состоял только во внутренних действиях, так как совокупность тел всего мира постоянно находится во взаимодействии друг с другом, так что, как бы далеко наша система ни распространялась, всегда вовне будет находиться материя, которая будет оказывать на нее действия. Тем не менее всюду, где дело идет о вычислениях, оказывается достаточным рассматривать только такие величины, которые больше некоторой определенной малой величины, являющейся их нижней границей, так что мы, действительно, можем во всяком явлении природы, несмотря на исключение бесконечного числа тел, привести дело к исследованию только внутренних действий. В дальнейшем мы будем считать, что этот выбор системы всегда осуществляется, так что мы будем вести речь прежде всего только о внутренних действиях.

В этом случае принцип сохранения энергии (стр. 105) выражает то, что энергия системы является постоянной, неизменной во времени величиной. Следовательно, если мы обозначим состояние системы тел в начальный момент изменений как начальное состояние, а другое ее состояние по истечении конечного или бесконечно малого времени как конечное состояние процесса, то энергия системы в начальном состоянии равна энергии в конечном состоянии, или, иначе, равенство энергий в начальном и конечном состояниях равно нулю. Чтобы использовать это положение, необходимо знать общее выражение энергии системы. Но, как мы знаем, энергия вполне определяется мгновенным состоянием системы с точностью до аддитивной постоянной и, стало быть, она должна выражаться однозначной функцией от тех величин, которые это состояние определяют. Поэтому речь теперь идет прежде всего о том, каковы же величины, определяющие состояние системы, и этот вопрос подводит нас к более близкому рассмотрению понятия состояния вообще.

Если ограничиться рассмотрением явлений движения, то под состоянием системы материальных точек можно понимать совокупность положений и скоростей всех точек системы. Следовательно, величины, определяющие состояние, суть пространственные координаты точки и их первые производные по времени; только от этих величин зависит энергия системы; когда они заданы, то вообще весь процесс движения и, следовательно, все переменные системы определены как функции времени. Но для любых физических явлений это определение состояния недостаточно, и мы дадим поэтому следующее более общее определение: „Состояние материальной системы в определенный момент времени есть совокупность всех тех величин, мгновенными значениями которых полностью определяется течение во времени процесса, происходящего в системе“ (внешние действия здесь исключены). Тогда энергия системы является определенной функцией этих величин.

К этим „величинам, определяющим состояние“, кроме уже упомянутых переменных, определяющих механическое состояние, относятся температура, электрическая и магнитная плотность, сила гальванического тока и т. д. Такие же величины, как ускорение, скорость изменения температуры и т. д., исключаются, потому что эти величины все-

гда определяются через указанные выше, и знание их уже не необходимо для определения хода процесса во времени. Это верно и тогда, когда сила зависит не только от положения и скорости, но еще и от ускорения, как это имеет место в основном электрическом законе Вебера; ибо здесь, хотя сила и принимается пропорциональной ускорению<sup>1</sup>, все же в конце концов всегда получается соотношение, которое раз навсегда сводит ускорение к положению и скорости, так что оно никогда не может быть дано произвольно, — пункт, который иногда упускают из виду.

В общем случае все величины, определяющие состояние, друг от друга независимы, и следовательно, чтобы иметь возможность полностью определить состояние, нужно знать значение каждой отдельной переменной; но часто также случается, что наперед заданные неизменные условия предписывают определенное число соотношений между этими различными величинами, так что некоторые из этих величин могут оказаться зависимыми от остальных. Подобный случай мы имеем, например, в механике, когда между координатами движущихся точек существуют определенные уравнения связей, — так, например, когда две точки связаны друг с другом прямой постоянной длины. Тогда, очевидно, положения и скорости друг от друга не независимы, а состояние определяется уже меньшим числом переменных, чем в том случае, когда точки совершенно свободны.

Подобные случаи мы встречаем часто и в других процессах. Например, такое соотношение между величинами, определяющими состояние, представляет закон Ома в его применении к постоянному току гальванической батареи. Электродвижущая сила цепи (сумма электрических напряжений от пар соприкасающихся проводников), сопротивление и сила тока являются величинами, определяющими состояние; поэтому в общем случае, когда необходимо определить мгновенное состояние всей системы тел, проводящей ток, значения всех трех величин должны быть даны независимо друг от друга; только наперед заданное условие, что состояние является стационарным, устанавливает зависимость этих величин друг от друга, так что одна из них

---

<sup>1</sup> W. Weber, Elektrodynamische Massbestimmungen, insbesondere über das Prinzip der Erhaltung der Energie. Abh. d. k. sächs. Ges. d. Wiss. X, Nr. 1, p. 1, 1871. Ср. также IX, p. 573, 1864.

оказывается определенной двумя другими. Но если это условие не выполняется, тогда ничто не мешает предположить, что в некоторое мгновение устанавливается сила тока, которая не соответствует значению, требуемому по закону Ома для стационарного состояния, так что пока она не дава самостоятельно, можно считать, что состояние вовсе не определено; в таком случае сила тока вообще не остается постоянной, но известным образом изменяется с тем, чтобы при возможности перейти в стационарное состояние. Это обнаруживается, например, при явлении постепенного возрастания тока с того мгновения, когда цепь замкнута; тогда сила тока в течение более или менее короткого времени возрастает от нуля до своей постоянной величины.

Но в своей наиболее общей форме закон Ома вовсе не выражает никакого соотношения между величинами, определяющими состояние, так как общее выражение электродвижущей силы содержит член, который появляется при наличии индукции собственного или постороннего тока, а этот член со своей стороны содержит производную от силы тока по времени, которая не относится к величинам, определяющим состояние.

Рассмотрим еще дальнейший пример: временное намагничивание. Если принять, согласно обычной, обоснованной Пуассоном теории, что в теле, подвергающемся магнитной индукции, например, в мягком железе, магнитный момент пропорционален намагничивающей силе, то вновь получается соотношение исключительно между величинами, определяющими состояние; ибо ведь и магнитная сила может быть выражена непосредственно через магнитное состояние тел и среды. Но, с другой стороны, известно также, что это соотношение выражает только определенное состояние, наступившее по истечении конечного времени, а именно состояние магнитного равновесия, и что если рассматриваться будет именно этот промежуток времени, то, конечно, нужно исходить из состояния, в котором магнитный момент еще не достиг того значения, которое установилось бы при определенной намагничивающей силе в состоянии равновесия. Вообще ясно, что всякое стационарное и равновесное состояние дает особое уравнение связи между величинами, определяющими состояние.

Получающаяся в некоторых случаях зависимость друг от друга величин, определяющих состояние, имеет для

нашего исследования важное значение. Причиной этого является то обстоятельство, что в каждом таком случае выражение энергии может быть приведено к различным формам, благодаря чему оно дает повод к неопределенности понятия, указанной уже на стр. 107. Посмотрим теперь, как в определенном рассматриваемом случае получается выражение энергии для данной материальной системы, находящейся в определенном состоянии. Прежде всего надо исходить из того, что числовое значение этой величины, как это вытекает из общего определения, всегда односторонне определено; его находят, согласно определению, сперва произвольно устанавливая нулевое состояние, а потом измеряя указанным образом механический эквивалент внешних действий, которые вызываются переходом в нулевое состояние. Если численное значение для определенного случая найдено, то этим еще не дано, конечно, общего выражения энергии в ее зависимости от величин, определяющих состояние; нужно затем исследовать, как изменяется найденное численное значение, когда будут изменяться величины, определяющие состояние. Это изыскание является общей задачей экспериментального исследования, в котором дело идет о том, чтобы установить при помощи опыта количественную зависимость одного явления от другого. Положим, что закон этой зависимости найден; тогда, следовательно, энергия системы может быть выражена как функция величин, определяющих состояние, и, стало быть, задача решена.

Однако здесь надо различать два случая. Если величины, определяющие состояние, действительно изменялись всеми возможными способами, то значение энергии может быть выражено как функция этих величин только единственным образом, так как в этом случае все переменные независимы друг от друга. Эту функцию мы будем называть в последующем „первичным“ выражением энергии; она имеет всеобщую и безусловную значимость. Но часто встречаются случаи, когда исходят не из всех возможных сочетаний значений величин, определяющих состояние, а, например, только из таких, которые выражают равновесное или стационарное состояние, или вообще такие состояния, многообразие которых, как ранее было описано, ограничивается одним или несколькими уравнениями связи между величинами, определяющими состояние. В каждом таком

случае выражение энергии, как функции от величин, определяющих состояние, определяется не однозначно, но может быть приведено с помощью этих уравнений связи к различным формам, путем замены одной какой-нибудь переменной другой; в таком случае невозможно и решение вопроса о форме первичного выражения энергии до тех пор, пока ограничиваются такими состояниями. Отсюда между прочим мы видим, что вычисление энергии из равновесного или же только стационарного состояния никогда не может привести к первичному выражению ее, как это можно усмотреть уже из примера электростатического состояния равновесия, приведенного на стр. 106. В самом деле, здесь еще и поныне нельзя с определенностью решить, которая из обеих данных форм представляет первичное выражение энергии, и каждую из них можно пока произвольно рассматривать как первичную<sup>1</sup>. То же самое справедливо и для других случаев, приведенных на стр. 110 и сл. Возьмем, например, постоянный гальванический ток силы  $i$ , с электродвижущей силой  $\epsilon$  и общим сопротивлением  $w$ ; тогда Джоулева теплота, произведенная в единицу времени в проводнике с сопротивлением  $w$ , может быть выражена различным образом: либо через  $i^2w$ , либо через  $\epsilon i$ , либо же через  $\frac{\epsilon^2}{w}$ .

Которое из этих значений следует рассматривать как первичное выражение теплообразования, можно решить, только перейдя от рассмотрения постоянного тока к переменному, т. е. устранив условие, которое здесь связывает друг с другом величины, определяющие состояние; в таком случае находят, что искомым первичным выражением является только  $i^2w$ .

Мы рассмотрим еще другой относящийся сюда случай, который касается определения энергии упругих тел. Если совершенно упругое твердое или жидкое тело благодаря присутствию ему силам в состоянии совершать движения (колебания), не испытывая при этом какого-либо внешнего воздействия, связанного с затратой работы, то согласно нашему принципу его энергия от времени не зависит. Предположим дальше, что движение будет таким, что возможная разность температур, возникающая в этом процессе

<sup>1</sup> *Прим.* 1908. За это время, как известно, удалось установить, что первая из обеих форм является первичной, и при том установить это удалось благодаря исследованию динамических процессов, а именно герцевских волн.

благодаря деформациям, не выравнивается посредством теплопроводности,—это можно, как правило, предположить в случае звуковых колебаний. В этом случае мгновенное состояние тела всегда определяется положением (деформацией) и скоростью всех частиц, в частности, температура частицы зависит только от ее деформации, поэтому и значение энергии можно представить как функцию только положения и скорости. Но так как скорость всегда содержится в выражении энергии в форме живой силы, то из неизменности полной энергии мы выводим заключение, что сумма живой силы и какой-то функции деформации является постоянной в течение всего процесса. Эта функция деформации известна под названием силовой функции или потенциала упругих сил; она представляет такого рода энергию, которая обусловлена общей деформацией. Но следует учесть, что эта форма энергии выводится не из наиболее общего состояния тела, а только из таких состояний, в которых исключается теплопроводность. Следовательно, здесь налицо опять случай, когда имеется связь между величинами, определяющими состояние; и действительно можно легко показать, что силовая функция не является первичным выражением энергии; она теряет поэтому свое значение, когда сделанное здесь ограничение исчезает и когда переходят к рассмотрению более общих состояний.

Наиболее ясно это выступает при движении так называемых идеальных газов, ибо для них первичное выражение энергии общеизвестно. Рассмотрим газ, совершающий колебание, например, при постоянном объеме, причем внешние действия исключены, и вычислим сначала силовую функцию при сделанном выше предположении об отсутствии теплопроводности. Тогда давление  $p$  материальной частицы полностью определяется ее объемом  $v$ , а именно

$$p = \frac{C}{v^{\frac{c_p}{c_v}}},$$

причем  $C$  означает константу, зависящую от природы газа, а  $c_p$  и  $c_v$  суть удельные теплоты; тепловая функция принимает значение

$$-\int p \, dv = \frac{1}{\frac{c_p}{c_v} - 1} \cdot \frac{C}{v^{\frac{c_p}{c_v} - 1}} + \text{const.}$$

На основании принципа сохранения энергии сумма всей живой силы колебаний и силовой функции, взятой для всех материальных частиц, не зависит от времени. Но силовая функция не представляет теперь первичного выражения энергии, напротив, последняя для единицы массы имеет вид  $c_v \cdot T + \text{const}$ , совершенно независимо от объема. При этом  $T$  является абсолютной температурой,  $c_v$  дано в механической мере работы. Таким образом, мы во всяком случае можем упомянутое положение выразить и в другой форме, подставляя вместо силовой функции выражение  $c_v \cdot T + \text{const}$ . Можно, на самом деле, непосредственно убедиться, что при принятых здесь условиях оба эти выражения равнозначны, так как

$$\frac{1}{c_p - 1} \cdot \frac{C}{v c_v - 1} = c_v \cdot T;$$

ибо используя приведенное выше значение  $p$ , мы получим уравнение

$$\frac{1}{c_p - c_v} \cdot p v = T,$$

которое справедливо вообще для всякого состояния идеального газа.

Пока ограничиваются рассмотренными здесь движениями, совершенно безразлично, какую из обеих форм энергии кладут в основу вычисления и наглядного представления; первая форма имеет даже то преимущество, что в ней не нужно принимать во внимание изменений температуры, поэтому ею пользуются главным образом в теории упругости. Но как только сделанное ограничение устраняется, необходимо вернуться к первичному выражению энергии.

Поскольку, как мы это видели, получение первичной формы энергии связано с уничтожением всех ограничивающих связей между величинами, определяющими состояние, постольку никогда нельзя утверждать, что мы действительно нашли эту первичную форму, потому что мы никоим образом не можем быть уверены в том, что те состояния, которыми мы оперируем, действительно являются наиболее общими. Так, например, мы обычно рассматриваем в качестве первичного выражения энергии двух взаимно притягивающихся масс произведение этих масс, деленное на их расстояние, — выражение, которое вытекает из представления о непосред-



ственном дальнем действии. Но вполне мыслимо, — а если принять во внимание направление развития физических теорий в последнее время, — отнюдь не невероятно, что когда-нибудь отойдут от этого представления непосредственной, мгновенно действующей на расстоянии силы притяжения, и ее место заменит действие, которое в измеримое время распространяется от частицы к частице через промежуточную среду посредством своеобразной деформации последней. Если это представление действительно когда-нибудь будет принято, то мы больше не могли бы рассматривать употреблявшееся до сих пор выражение энергии в качестве первичного; его справедливость связана с условием, что действие, исходящее от некоторой массы, уже достигло других масс, а в промежуточной среде установилось стационарное состояние. Но тогда это состояние вовсе не является наиболее общим, и на самом деле тогда первичное выражение энергии изменило бы свою форму и представлялось бы в виде интеграла, распространенного на всю промежуточную среду. Само собой разумеется, что этот вопрос остается открытым, и каждое из двух выражений энергии одинаково справедливо до тех пор, пока отказываются от исследования такого наиболее общего состояния. Насколько вопрос о первичном выражении энергии побуждает к исследованию новых явлений — на это мы уже обращали внимание выше (стр. 107 и сл.).

В дальнейшем мы будем исходить из предположения, что первичное выражение энергии нам известно, поскольку всеобщность рассматриваемых нами состояний является достаточной. Всюду, где такой уверенности нет, лучше временно ограничить эту всеобщность; если мы, например, ограничиваемся рассмотрением равновесных состояний электричества, то мы должны оставить совершенно нерешенным вопрос, искать ли электростатическую энергию, подобно Фарадею и Максвеллу, внутри диэлектрика, или, подобно Кулону и Веберу, на поверхности проводников, и можем по желанию считать каждое из этих выражений первичным. В остальном мы можем представить себе материальную систему в самых разнообразных состояниях: в ней могут находиться тела, движущиеся и покоящиеся, нагретые и холодные, светящиеся и темные, проводники и непроводники, тела наэлектризованные, обтекаемые током и магнитные, короче, в системе могут быть представлены все мыс-

лимые физические явления. Тогда прежде всего обнаруживается замечательный факт, что первичное выражение энергии выступает в форме суммы, отдельные слагаемые которой составляются из определенных характеризующих состояние величин, соответствующих отдельным частным формам явлений. Тем самым полная энергия сама собой распадается на некоторое число отдельных друг от друга независимых энергий, каждая из которых получается особым образом из отдельных свойств рассматриваемого состояния. Это дает нам повод различать в системе различные виды энергии, как-то: энергию механическую, тепловую, химическую, электрическую, магнитную; суммируя их, мы получаем полную энергию системы.

Этот факт, который мы можем назвать принципом наложения друг на друга (суперпозиции) энергий, существенно связан с тем обстоятельством, что многие происходящие в природе явления протекают совершенно независимо друг от друга: нагревание тела не изменяет его веса, электростатический заряд не влияет на магнетизм и т. д.; это обстоятельство можно рассматривать или как причину или как следствие указанного факта. Мы можем принцип наложения энергий, выражающий обобщение целого ряда хорошо известных в физике законов, принять здесь просто как принцип, данный опытом; при дальнейшем исследовании нашей задачи он даст чрезвычайно ценное вспомогательное средство для вывода дальнейших следствий из принципа сохранения энергии.

Чтобы облегчить обозрение отдельных членов этой суммы энергии, было произведено разделение ее с различных точек зрения; так, кроме упомянутого уже нами разделения, основанного на равномерности отдельных явлений природы, которое можно считать наиболее непосредственным, существует еще разделение на кинетическую и потенциальную энергии (энергию движения и энергию положения, стр. 74). Это разделение основано на предположении, что все изменения в природе суть изменения механического характера, оно относит все члены, зависящие только от скоростей, к кинетической энергии, а члены, зависящие только от положений, — к потенциальной энергии. Правда, с тех пор как было обнаружено, что имеются виды энергии, которые определяются одновременно положением и скоростью, способ применения этого разделения стал несколько сомнительным.

Таков, например, случай так называемой электрокинетической энергии гальванического тока, которая зависит не только от силы тока, но и от относительного положения отдельных элементов тока; должна ли эта энергия рассматриваться как кинетическая или же как потенциальная, заранее неясно, хотя обычно ее принимают за кинетическую (ср. третий раздел). Это конечно по существу ничего не меняет, так как величина полной энергии не затрагивается различием этих трактовок.

Другой способ разделения основан на различии между внешней и внутренней энергией, причем под внешней энергией в основном понимается то же, что и под механической энергией в тесном смысле слова (энергия молярного движения), а под внутренней энергией — весь остаток полной энергии. Наконец, Гельмгольц, исходя из другой точки зрения, а именно из точки зрения возможности непосредственного превращения в механическую работу, произвел в новейшее время разделение энергии на свободную и связанную.

Относя рассмотрение отдельных видов энергии к последнему разделу этой работы, укажем прежде всего на удобство, которое вытекает из принципа суперпозиции энергии для наглядности понятия и для вычисления значения полной энергии. В силу сказанного мы можем представить себе полную энергию системы как запас, возникший в результате простого сложения отдельных энергий, подобно тому как общий вес тела получается из сложения весов отдельных содержащихся в нем химических элементов. При этом можно подсчитать величину каждого отдельного вида энергии самого по себе, совершенно независимо от других свойств рассматриваемой системы, если только известны специфические величины, определяющие состояние, которые этому виду энергии соответствуют. Таким образом мы мысленно отводим каждому виду энергии особое место в материи; тем самым мы получаем практическую выгоду, облегчая рассмотрение отдельных видов энергии и предохраняя себя от ошибки упустить какой-либо из них из виду при вычислении полной энергии. В общем каждой действующей в системе силе или вообще каждому особому свойству системы соответствует особый вид энергии, которую нужно считать находящейся в том же самом месте, в котором это свойство проявляется.

Если в системе существуют только такие силы, которые

действуют на неизмеримо малые расстояния, то действие на какую-нибудь материальную частицу будет зависеть только от состояния самой частицы относительно ее непосредственного окружения, и тогда энергия системы получается простым суммированием энергий всех ее материальных частиц. Но совсем иначе получается, когда встречаются силы, непосредственно действующие на расстоянии, так как энергия, обусловленная такой силой, вообще говоря, будет зависеть от тех же величин, как и сама сила, следовательно, и от расстояния обоих действующих друг на друга элементов. В этом случае энергия связывается по существу с одновременным положением обоих элементов, следовательно, она не находится в каком-либо одном месте пространства, и нельзя больше положить полную энергию системы равной сумме энергий отдельных материальных элементов; напротив, к этой сумме надо прибавить еще те виды энергии, которые обуславливаются действиями на расстоянии каждой пары элементов.

Если, предположим, мы нашли бы выражение полной энергии как сумму отдельных видов энергии, то мы должны считать ее величину при всяком изменении системы независимой от времени, между тем как отдельные виды энергии могут изменяться по величине за счет других видов; следовательно, всякий процесс, происходящий в природе, можно рассматривать как превращение отдельных видов энергии друг в друга, в то время как их сумма, весь запас энергии, находящейся в системе, не может ни увеличиваться, ни уменьшаться.

Мы должны теперь сделать дальнейший шаг. До сих пор наши рассуждения относились только к таким изменениям системы, которые происходят исключительно под влиянием внутренних действий, и предполагалось, что материя, не принадлежащая к системе, не оказывает на нее совершенно никакого влияния. Если бы применение принципа сохранения энергии распространялось только на этот случай, то из него можно было бы извлечь сравнительно мало пользы, ибо в этом случае оно давало бы только одно единственное уравнение, а именно уравнение, выражающее постоянство энергии. Кроме того, чтобы исключить в данном процессе все внешние влияния, нужно было бы включить в систему в общем случае большое количество тел, благодаря чему число величин, определяющих состояние, было бы значи-

тельным, и одно уравнение принципа сохранения энергии мало что могло бы дать. Но мы теперь покажем, что для какого-нибудь процесса, протекающего в материальной системе, в общем можно вывести из принципа сохранения энергии не только одно, а бесконечно много уравнений, так что он часто может нам служить для того, чтобы однозначно определить все течение процесса во времени.

В этом проявляется во всей своей плодотворности аналогия нашего принципа с принципом сохранения материи. Сумма весовых масс, существующих в природе, является неизменной, но эти массы меняют свое положение в пространстве; следовательно, если мы рассмотрим определенный ограниченный объем пространства, то содержащаяся в нем масса в общем случае не постоянна, но изменение (прирост) этой массы за известный промежуток времени равно массе, вошедшей за это время в объем извне. Совершенно подобное же положение мы выводим для энергии материальной системы. А именно, точно так же как материя, сумма которой остается постоянной, меняет свое положение в пространстве, так и энергия меняет в материи свое положение и свою форму. Поэтому мы можем провести следующее рассуждение. В материальной системе, которая не подвержена никакому внешнему влиянию, энергия остается постоянной. Но если мы выделим из системы какую-либо совокупность материальных элементов и будем рассматривать их как особую систему, то она будет иметь и свою особую энергию, выражение которой может быть составлено аналогично выражению энергии общей системы. Эта энергия в общем случае не будет оставаться постоянной, — это имело бы место только в том случае, если бы рассматриваемая система в течение процесса совершенно не подвергалась воздействию извне, что в общем случае не будет выполняться; поэтому энергия изменяется и именно в меру внешних воздействий. Следовательно, через внешние воздействия в систему передается извне энергия в количестве, которое определяется положением, развитием на 105 и следующих страницах: изменение энергии, соответствующее определенному изменению состояния материальной системы, равно работе действий, производимых вне системы, чтобы вызвать это изменение состояния.

Приведенный ранее закон включен, конечно, в это положение как частный случай, ибо если нет никаких

внешних действий, то и никакая энергия в систему не может переходить.

Но указанная аналогия с изменением материи, заполняющей определенный объем пространства, удовлетворительна только до известного предела; ибо вся находящаяся в пространстве масса равна сумме масс, содержащихся в отдельных частях пространства, между тем как для всей энергии, содержащейся в материальной системе, подобного положения не существует; по крайней мере оно не существует тогда, когда допускается действие на расстоянии (стр. 119 и сл.). Напротив, энергия системы содержит, кроме суммы энергий отдельных материальных частей, еще и другие виды энергий, и поэтому здесь дело обстоит несколько сложнее.

Если в результате некоторого процесса материальная система испытывает известное изменение состояния, то вычисление работы внешних действий часто может быть весьма облегчено, если принять во внимание то соображение, что величина работы совершенно не зависит от пути, по которому происходит это изменение состояния, и что, стало быть, можно данный процесс и данные внешние действия заменить другими, если они только вызывают точно такое же изменение состояния; ибо тогда и искомая величина работы остается одинаковой. Рассмотрим пример из механики. Энергией твердого тела, находящегося в движении, является его живая сила; она остается постоянной, пока и поскольку не имеется никаких внешних воздействий. Но если извне на тело воздействуют механические силы, то они сообщают телу энергию. При этом внешние воздействия могут быть самого разнообразного рода, соответственно природе взятых сил (сила удара, сила трения, дальнедействующие силы); таким образом в окружающей среде могут совершаться различные изменения: или внешние механические, или внутренние молекулярные, или термические, или электрические. Но работа этих внешних воздействий всегда равна работе, которую производят над телом взятые силы, безразлично, откуда они происходят, и эта работа дает значение сообщенной телу энергии, т. е. прирост его живой силы.

Легко видеть, что число применений принципа в его последней трактовке к некоторому заданному процессу прямо-таки бесконечно как в отношении времени рассмот-

рения процесса, так и в отношении материи. Ибо мы можем, с одной стороны, положить в основу любое большое или малое время рассмотрения, в частности, бесконечно малое время, благодаря чему мы получаем применение принципа к элементарным процессам, а с другой стороны, мы можем положить в основу как угодно большой или малый комплекс материальных элементов, в частности, бесконечно малый комплекс, следовательно, элементарное тело; для каждого такого комплекса принцип дает особое уравнение. Каждый раз нужно выбрать такую комбинацию, для которой вычисление представляется наиболее удобным; само собой разумеется, нужно всегда быть осторожным, чтобы с самого начала точно фиксировать положенную в основу материальную систему [в последующем мы будем ее называть ради краткости „основной системой“ („Grundsystem“)].

Возьмем, например, какое-нибудь количество газа, состояние которого изменяется благодаря сжатию или подводу теплоты извне. Пока мы рассматриваем только газ как основную систему, внешние действия заключаются в изменении положения сжимающего тела и в отдаче теплоты используемым тепловым резервуаром; энергия газа возрастает, следовательно, на величину работы сжатия и на количество подведенного тепла. При этом совершенно безразлично, производится ли сжатие тяжелым поршнем, совершающим работу при своем падении, или же оно производится другим газом, который расширяется и благодаря этому теряет теплоту и т. д. Здесь существенно лишь исключительно совершение механической работы, посредством которой осуществляется это сжатие, а каким способом эта работа совершается, это — безразлично. Предположим теперь более специальный случай: пусть сжатие производится нагруженным поршнем, вес которого уравнивает давление газа; если этот груз мы включим в основную систему, то работа сжатия уже не будет являться внешним действием, вместо нее появляется работа силы тяжести, действующей на груз и обусловленной притяжением его Землей; эта работа равна по величине предыдущей.

Если мы в дальнейшем включим еще и Землю в основную систему, то указанная работа не будет являться внешним действием, но зато в выражении энергии основной системы появляется новый член, а именно энергия тяжести

груза как функция высоты, на которой груз находится. Насколько простым и само собой понятным оказывается это рассуждение для данного случая, настолько же оно важно при переходе от этого простого состояния к более сложным, когда, например, сжимающий груз обладает известной скоростью и давление газа вовсе не равно весу груза.

Может быть, не лишне будет здесь упомянуть об одном словупотреблении, которое, будучи неправильно понятым, легко может стать поводом к ошибкам. Иногда говорят об энергии тяжелого тела как о произведении из его веса на высоту его центра тяжести. Это обозначение неподходяще, если в качестве основной системы мыслится само тело, ибо энергия тела зависит всегда только от его собственного состояния, а отнюдь не от расположения внешних масс; в самом деле, этот способ выражения в случае других центральных сил не встречается. Следовательно, чтобы можно было говорить об энергии тяжести, нужно всегда, хотя бы и молчаливо, мыслить Землю включенной в основную систему; иначе придется работу силы тяжести считать не видом энергии, а внешним действием (Земли, случайно находящейся поблизости, см. стр. 96).

Если мы ближе рассмотрим значение обобщения, которому мы подвергли первоначальную трактовку нашего принципа, то мы увидим, что оно основано главным образом на том, что одно уравнение, выражающее закон сохранения энергии для системы, свободной от всех внешних действий, мы разложили на некоторое число уравнений, характеризующих изменение энергии, т. е. убыль или прирост ее в отдельных частях системы в меру соответствующих внешних действий. При этом мы хотели бы обратить особое внимание еще на один пункт. Если всю систему, которая не подвержена никаким внешним действиям и энергия которой, следовательно, постоянна, мы разделим, например, на две части, которые мы последовательно будем рассматривать в качестве основных систем, то было бы ошибочным считать, что энергия, полученная в течение известного времени одной частью, равна энергии, отданной за то же самое время другой частью. Это положение было бы справедливо только в том случае, если бы энергия всей системы равнялась сумме энергий обеих ее частей, что, как мы уже неоднократно отмечали, в общем случае не выполняется. Возьмем, для примера, две материальные точки, действуя-



щие друг на друга с центральной силой. Энергия системы равна в этом случае сумме живых сил и потенциала центральной силы; она не изменяется со временем. Энергией какой-либо отдельной точки является ее живая сила; изменение этой живой силы может быть измерено внешним действием, которому подвержена точка, т. е. работой, которую совершает над ней сила. При этом вполне может произойти так, что в известное время каждой из обеих точек будет сообщена извне положительная энергия, и вследствие этого живая сила обеих возрастет одновременно. Только в тех случаях, когда действия на расстояния совершенно отпадают, например, в таких явлениях, как явления волнового движения в упругой среде или теплопроводности, можно сказать, что энергия, сообщенная одной материальной совокупности другой совокупностью, будет одновременно теряться.

Вообще представления, из которых исходят при трактовке действия сил природы, играют еще более важную роль в тех случаях, когда мы говорим об энергии произвольно выбранной материальной системы, чем тогда, когда мы рассматривали только такие системы, которые не подвергаются никаким внешним воздействиям. Тогда (см. стр. 112) дело шло только о первичной форме энергии, в величина же энергии для каждого состояния системы устанавливалась с помощью общего определения; так было бы и здесь, если бы мы всегда были в состоянии реализовать измерение так, как это предписывает определение. Но так как благодаря несовершенству средств наблюдения это не всегда имеет место, то может случиться, что для энергии определенной материальной системы, в зависимости от предположений о природе действующих сил, будут получены не только различные формы выражения, но и совершенно различные числовые значения энергии и что разность между этими значениями невозможно будет устранить экспериментальным путем. Примером этому служит уже неоднократно обсуждавшаяся нами природа электрического поля. Энергия произвольно выделенной части диэлектрика, согласно воззрению Фарадея, отлична от нуля; переводя эту часть диэлектрика из напряженного состояния в нейтральное, можно получить работу; между тем как, по представлению Вебера, конденсатор, если отвлечься от возможных вторичных (sekundären) изменений, всегда находится в одном и том же состоянии, не-

зависимо от того, имеется ли свободное электричество на проводниках или нет. Специальные исследования этого вопроса не дали пока никакого окончательного решения; поэтому прежде чем приступить к составлению уравнения, выражающего принцип сохранения энергии, необходимо вначале точно установить точку зрения, которой хотят придерживаться в трактовке исследуемых процессов.

Предпринятое нами разложение уравнения сохранения энергии основывается на том, что из первоначальной системы произвольно выделяется некоторый материальный комплекс в качестве основной системы и рассматривается энергия, полученная и отданная им. Но вместо разложения системы на ее материальные части, мы можем с таким же правом и иногда со значительным успехом принять другое разложение, а именно разложение на объемные части. Данный объем пространства в определенное время всегда содержит определенную материальную систему, и поскольку эта система обладает в тот же момент времени определенной энергией, можно говорить об энергии объема. Энергия фиксированного пространственного объема не будет изменяться со временем, если материя не входит и не выходит из объема, и кроме того, если нет внешних воздействий на материю, содержащуюся в нем; таким образом изменение энергии всегда происходит от одной из этих двух причин, так что мы можем высказать положение: передача энергии в пространственный объем обуславливается как внешними воздействиями на содержащуюся в нем материю, так и, кроме того, входением в него новой материи. Легко ли будет установить выражение энергии, переданной таким образом в объем, будет зависеть от обстоятельств рассматриваемого случая.

В самом деле, мы находим различные применения, в которых это положение оказывает хорошие услуги. Так, например, им в основном пользуется Клаузиус при вычислении теплоты [(джоулевой), произведенной в проводнике постоянным гальваническим током] как для случая, когда вещество проводников покоится, как в проводниках металлических<sup>1</sup>, так и для случая, когда вещество находится

---

<sup>1</sup> R. Clausius, Über die bei einem stationären Strom in dem Leiter getane Arbeit und erzeugte Wärme. Pogg. Ann. 87, p. 415, 1852.

в движении вместе с электричеством, как это имеет место в электролитах<sup>1</sup>. Если мы представим себе произвольный фиксированный объем, через который проходит ток, то энергия, содержащаяся в нем, может быть увеличена: 1) благодаря внешним воздействиям и 2) вследствие притока новой материи. Но при вычислении этого увеличения существенно, из какого представления о природе гальванического тока исходят. Предположим вначале, что электрические частицы ведут себя как материальные атомы с исчезающе малой инертностью, движение которых вызывается действующей на расстоянии силой притяжения или отталкивания всего свободного электричества, находящегося в системе проводников; при этом ради простоты мы можем предположить, что движущимся является только один род электричества. В таком случае энергия материальной частицы (электричества, иона), движущейся в постоянном токе, не зависит от ее положения и не изменяется вместе с потенциальной функцией, ибо последняя определяется внешними массами. Так как в течение известного времени ровно столько же материи входит в „основной объем“, сколько и выходит из него, то этим обстоятельством не обуславливается никакое изменение энергии, и остается принять во внимание только внешние действия. Эти действия дают увеличение энергии, равное работе, которую производят силы всей системы над материей, протекающей во всем объеме. Стало быть, энергия объема увеличивается на величину этой работы; так как при стационарном состоянии электрическая энергия постоянна, то это приводит к увеличению тепловой энергии.

Ход рассуждения будет иным, если представить электричество в виде непрерывно протяженной тонкой несжимаемой жидкости, которая продавливается сквозь проводник благодаря силам, действующим только на измеримо малых расстояниях (род давления). И в этом случае энергия текущих частиц также не зависит от места, поэтому изменение энергии здесь также не обуславливается притоком материи в рассматриваемый объем, как и выше. Но что касается внешних действий, то здесь они сводятся к работе сил, действующих на поверхность объема (все другие силы

---

<sup>1</sup> R. Clausius, Über die Elektrizitätsleitung in Elektrolyten. Pogg. Ann. 101, p. 338, 1857, p. 340.

суть внутренние действия). Эта работа в каждом месте пропорциональна значению потенциальной функции (так же как в жидкостях — давление); следовательно, она больше в месте входа тока, чем в месте выхода его, и тем самым для всей работы, произведенной внешними действиями, мы получаем положительное выражение, значение которого согласуется с тем, которое получается из вышеприведенного рассмотрения.

Если, наконец, принимается, как хотят некоторые, что электрический ток состоит не в перемещении материи, а, подобно теплопроводности, в распространении особых форм движения, то для объяснения джоулевой теплоты необходимо предположить, что живая сила этих движений, входящая в объем за определенный промежуток времени, на некоторую определенную величину превышает выходящую, и что, следовательно, сопротивлением проводников обуславливается некоторый вид абсорбции колебаний, составляющих ток.

На основании выведенных положений мы, очевидно, в состоянии вывести из принципа энергии особое уравнение для каждого материального элемента и каждого элемента объема тела; тем самым, как указано выше, мы действительно, получаем в свое распоряжение бесконечно много уравнений, определяющих ход любого процесса. Но если необходимо однозначно определить течение процесса во времени, то мы не можем ограничиться полученными результатами; ибо решить эту дальнейшую задачу при средствах, которые мы пока получили, мы еще не в состоянии; это было бы возможно только в том случае, если бы изменения отдельного материального элемента зависели только от одной единственной переменной, поскольку для каждого элемента мы можем установить одно уравнение; но в общем случае это не имеет места.

Однако если мы сделаем еще дальнейший шаг, мы можем во многих случаях получить средства, достаточные для решения поставленной задачи; этот шаг состоит в привлечении выше уже попутно использованного принципа суперпозиции энергий. Энергия материальной системы на основе опыта представляется в виде суммы отдельных видов энергий, которые друг от друга совершенно независимы, и поэтому весь запас энергии по существу распадается на ряд отдельных энергий, каждая из которых

может быть определена сама по себе. Если система подвергается внешним воздействиям, посредством которых в систему передается энергия, то в общем случае и эти действия можно разложить на различные виды. Каждый из этих видов действий производит в системе определенное изменение соответствующего ему вида энергии, так что уравнение, выражающее связь изменения всей энергии с внешними действиями, распадается на ряд отдельных уравнений, каждое из которых определяет изменение соответствующего вида энергии в зависимости от особого внешнего действия. Следовательно, мы имеем здесь дальнейшее разложение уравнения энергии, которое отличается от предыдущих тем, что если выше мы разделяли материальную систему на отдельные материальные или объемные части, то здесь энергия разделяется на отдельные ее виды.

Представим себе, к примеру, тело, свободно движущееся в пространстве. Его энергия распадается на две части: на живую силу его видимого движения и на его внутреннюю, например, тепловую энергию. Поскольку нет никакого внешнего воздействия, его полная энергия остается постоянной. Но остается постоянной не только полная энергия, но и каждый из видов энергии сам по себе; тело движется с постоянной скоростью и остается при постоянной температуре; изменение этих величин без соответствующего внешнего действия не происходит ни при каких обстоятельствах, хотя согласно общему принципу вполне возможно было бы превращение одного вида энергии в другой. Если, дальше, мы представим себе, что тело подвергается известным внешним действиям, которые состоят, во-первых, в механической силе, действующей на расстоянии, например, в силе тяжести, и, кроме того, в притоке теплоты, например, посредством излучения, то энергия тела будет возрастать на величину, соответствующую работе, произведенной силой, и количеству подведенной теплоты. Но мы можем сказать еще больше: внешние действия распадаются здесь на два различных вида, каждое из которых влияет только на соответствующий вид энергии: работа силы изменяет только скорость, но не температуру тела, а подведенная теплота повышает только температуру, но не скорость. Различные действия с соответствующими им энергиями принадлежат совершенно раздельным областям, и поэтому каждое из них дает особое уравнение.

Правда, следует признать, что как в этом, так и во всех подобных случаях нельзя а priori утверждать о независимости друг от друга видов энергий, как и внешних действий; это всегда должно быть обосновано экспериментально. Так, можно легко представить себе, что тепловое излучение, заключающееся в колебаниях эфира, производит непосредственное механическое действие на тело, хотя до сих пор такое действие не могло быть с уверенностью доказано<sup>1</sup>, а, с другой стороны, очевидно, что механическая сила, если она действует не на расстоянии, а на поверхность тела, — например, в виде трения или удара, — может превратиться, по крайней мере в большей своей части, непосредственно в теплоту. Вполне мыслимо также, что два вида энергии, которые в течение известного времени рассматривались как независимые друг от друга и которые для некоторых явлений при приближенных вычислениях все еще могут считаться независимыми, при более близком познании сил природы выступают во взаимной зависимости.

Здесь мы фактически сталкиваемся с границей применимости (по отнюдь не справедливости) принципа энергии; ибо если отдельные виды энергии изменяются уже не независимо друг от друга, — каждый в меру соответствующих ему внешних действий, — то мы не можем производить уравнение уравнивания энергии. Тогда принцип сохранения энергии дает для материального элемента меньше уравнений, чем это требуется для вычисления изменения его состояния. Сюда между прочим относятся и все те случаи, в которых процессы, протекающие внутри элемента, не находятся ни в какой непосредственной связи с внешними действиями, как, например, во всех явлениях взрыва и им подобных, в которых минимальные внешние действия могут обусловить величайшие и разнообразнейшие взаимопревращения отдельных видов энергий. При этом встает вопрос: по какому закону, в каком направлении происходит в таких случаях превращение энергии? Этот вопрос выходит из

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* Это уже доказано Лебедевым (Ann. d. Physik, 6, p. 433, 1901) в согласии с теорией Максвелла. Поэтому мы должны теперь считать принцип суперпозиции в отношении к разделению тепловой и механической энергии верным только весьма приближенно. Ср. также следующие предложения в тексте и книгу: M. Planck, Zur Dynamik bewegter Systeme, Sitz.-Ber. d. k. preusz. Akad. d. Wiss. v. 13, Juni 1907.

рамки настоящего исследования; ответ на него вовсе не вытекает из простого закона сохранения энергии, но его нужно обосновывать на совершенно новых, независимых от этого закона принципах. Такой принцип мы имеем в виде обоснованного Карно и Клаузиусом второго начала механической теории теплоты — закона, показывающего направление, в котором протекают взаимопревращения различных видов энергии<sup>1</sup>.

Но указанные ограничения отнюдь не уменьшают ту высокую практическую ценность, которую имеет разделение внешних действий соответственно их влиянию на отдельные виды энергии. Эта ценность заключается главным образом в том, что мы получаем твердую точку зрения, которая позволяет обзирать условия взаимопревращения видов энергии, а тем самым и многообразия сил природы вообще. Ибо всегда вновь приходят к вопросу: какие изменения энергии совершаются независимо друг от друга? И ответ на этот вопрос дает первое средство вскрыть порядок в кажущихся столь запутанными явлениях, которые разветвляются в рамках мельчайшего процесса; это делает доступным экспериментальное исследование отдельных явлений.

Без принципа суперпозиции энергий невозможно было бы отделить механику от теплоты, электричество от магнетизма, и с самого начала было бы недопустимым разделение всей физики на различные области. А возможно ли будет в позднейшее время установить меньше видов энергии, чем теперь, не сведутся ли все они к одному или двум видам, — на это теперь также нельзя ответить, как нельзя ответить, например, и на вопрос: существенно ли отличается весомая материя от светового эфира или нет? Но то, что мы, основываясь только на указанной теперь точке зрения, на самом деле в состоянии с помощью развитых нами формулировок принципа сохранения энергии вывести основные законы механики, как и остальных частей физики, притом вывести в такой же форме, как это делается обычно с различных исходных точек зрения, — мы постараемся наиболее отчет-

---

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* Другим подобным принципом был бы принцип относительности, выраженный впервые в наиболее общем виде Эйнштейном (*Ann. d. Physik*, 17, p. 891, 1905); однако, его всеобщая справедливость пока еще недостаточно установлена.

ливо показать в последнем разделе этой работы; одновременно эта задача представит нам возможность во всей полноте применить изложенные здесь положения к отдельным видам энергии.

---

Заканчивая этим исследованием, которые нас привели к установлению принципа сохранения энергии в его наиболее удобной для применения форме, мы хотим использовать заключительную часть этого раздела для того, чтобы подвергнуть обозрению число и значение доказательств, которые могут быть приведены в пользу правильности принципа. Правда, в последнее время появилось утверждение, согласно которому принцип сохранения энергии вообще и не может быть доказан, да и не нуждается в доказательстве, ибо он справедлив а priori, т. е. представляет собой данную нам от природы необходимую форму нашего восприятия и способности мышления; здесь происходит то же, что и со многими другими истинами, познание которых добыто трудами многих столетий: после таких трудов, когда сила привычки вступает в свои права, эти истины представляются как само собой понятные и врожденные. Поэтому если мы без долгих размышлений отклоняем подобное утверждение, то для оправдания этого мы нуждаемся только в ссылке на историческое развитие принципа. Сравни также относящееся сюда примечание на стр. 101.

Как и при доказательстве любого естественно-научного закона, так и в случае доказательства нашего принципа можно говорить о двух методах: о методе дедуктивном и методе индуктивном. При первом методе закон во всей своей всеобщности получается как логический результат совместного существования ряда других законов, полученных ли из опыта или откуда-либо еще, но вообще признанных правильными. Индуктивный метод, наоборот, заключается в проверке при помощи опыта отдельных следствий, вытекающих из закона, подлежащего доказательству, если этот закон предварительно принимается как правильный и комбинируется с другими достаточно обоснованными законами. Если обнаруживается хотя бы одно следствие, не согласующееся с опытом, то закон категорически отвергается, если же это не случается, то закон попрежнему считается справедливым; по индуктивному пути всегда можно достигнуть



только известной степени вероятности того, что доказуемое истинно; эта степень вероятности возрастает по мере того, как варьируется опыт. Тем не менее индуктивному методу всегда приписывается особо высокая ценность; ибо, поскольку истинность всего нашего познания природы в конечном счете основана на опыте, постольку вера в правильность закона тем больше укореняется в нашем убеждении, чем ближе закон связан с фактами, непосредственно устанавливаемыми на опыте. Поэтому всякий раз, когда дело идет об установлении нового принципа, к нему ищутся подступы со всех возможных сторон через эксперимент и наблюдение. Ни один физик не удовлетворится чистой дедукцией естественно-научного закона, имеющего сколько-нибудь серьезное значение, он будет привлекать на помощь всюду, где это возможно, еще и наиболее высокую инстанцию — опыт.

Если мы с этой точки зрения посмотрим на обсуждаемый принцип, то достаточно одного взгляда на применения, разобранные в предыдущем и в следующем разделах, из которых ни одно не противоречит опыту, чтобы показать, какую огромную мощь представляет собой совокупность индуктивных доказательств, распространяющихся на все явления природы, доказательства, которые определеннейшим образом подтверждают неограниченную правильность принципа. Нужно было бы повторить всю историю развития последнего, если бы мы хотели попытаться дать здесь обзор равнообразных опытных доказательств, которые накопились за все время; почти каждое новое применение приносило и новое доказательство, начиная от теплоты, получающейся от трения, которая не зависит ни от материала трущихся тел, ни от их скорости, температуры и т. д., а определяется единственно и исключительно только затраченной механической работой, — и кончая явлениями гальванической индукции, которая вызывается движением магнита независимо от свойств проводника, в котором она возникает.

И, однако, как ни подавляюще число и значение этих индуктивных доказательств, никто не должен быть таким закоренелым эмпириком, чтобы не чувствовать еще потребности в другом доказательстве, которое, будучи построено на дедуктивных основах, выводило бы принцип во всем его всеобъемлющем значении как единое целое из некоторых еще более общих истин. Ибо, хотя множество проделанных отдельных опытов и вынуждает нас принять с необходимостью

этот закон, все же никто не поручится за то, что однажды не может быть открыт единичный, до сих пор почему-либо не досмотренный класс фактов, который не подчиняется требованию принципа. Вряд ли можно спорить о том, что полная успокаивающая уверенность, которая достигается убеждением в истинности закона, может быть нами получена не одним только методом индукции, а лишь одновременно и тем методом, которым мы схватываем закон с более высокой точки зрения как совершенное единство. И как было бы иначе мыслимо, что в то время когда, кроме мало известных в широких кругах исследований Майера и Кольдинга, существовало только небольшое число опытов Джоуля, когда, стало быть, об индуктивном доказательстве едва ли еще можно было говорить, — что в это время идея о сохранении энергии все же с такой изумительной быстротой пустила корни одновременно во многих местах и побудила с различных сторон к новым исследованиям, — как было бы все это мыслимо, если бы познание того непосредственного единства, которое только через дедукцию и может быть получено, не навязывалось просто и ясно всем умам. Но теперь перед нами встает вопрос, каким образом можно установить принцип посредством дедукции и существует ли вообще дедуктивное доказательство, которое может претендовать на строгое научное значение, как это в наши дни требуется в естествознании. Рассмотрим этот вопрос несколько ближе.

Так как всякая последовательная дедукция предполагает наличие некоторой общепризнанной правильной предпосылки, объем которой должен быть не меньшим, чем объем предложения, которое доказывается, то в нашем случае главная трудность состоит в том, чтобы найти такую предпосылку, которая, с одной стороны, пользовалась бы таким всеобщим признанием, чтобы она могла служить достаточным ручательством правильности нашего принципа, и, которая, с другой стороны, была бы достаточно всеобъемлющей, чтобы включить в себя весь принцип с его крупнейшим полем применения. С первого же взгляда видно, что выбор между положениями, удовлетворяющими обоим требованиям, будет совсем небольшим; тем не менее можно назвать различные положения, претендовавшие в разное время на место предпосылки в дедуктивном выводе принципа.

Самая старая дедукция простирается не ближе, как до

личности самого творца, который в своей вечности и неизменности сообщил эти свои свойства сотворенной им природе и ее силам; откуда следует, что все содержащееся в мире „количество движения“ имеет для всех времен неизменяемую постоянную величину. Так как это соображение, исходящее от Декарта (ср. стр. 19), явно стремится к тому, чтобы обосновать всеобщий закон природы, регулирующий сумму действующих в природе сил, так же, как и количество имеющейся материи, то оно, конечно, должно быть приведено в связь с принципом сохранения энергии; во всяком случае эти идеи могут быть перенесены и на современную форму нашего принципа.

В основном таков же, хотя и более скромный по своей исходной точке зрения, был ход мысли в доказательстве сохранения силы, которое старался привести Кольдинг (стр. 39 и сл.). А именно он уже не апеллирует непосредственно к всевышней инстанции, но усматривает основу неизменности сил природы в том обстоятельстве, что эти силы, поскольку они с таким совершенством управляют природой, сами должны являться сверхчувственными духовными сущностями, и невозможно, чтобы они, будучи таковыми, могли быть подвержены естественной смерти или исчезновению. Все же он считал уместным проверить этот закон также и опытом, и в этом направлении он и ставил свои изыскания.

Так как согласно современным воззрениям всякое доказательство естественно-научного положения, корнящееся в метафизической почве, заранее непригодно, то мы можем об этих и подобных дедукциях только коротко упомянуть.

Большого внимания заслуживают уже представления, которые положил в основу своих рассуждений Майер (см. стр. 31 и сл.). Хотя они ведутся еще на несколько шагов основе, все же способ представления Майера уже не может быть назван чисто метафизическим. Свое главное положение: „*causa aequat effectum*“, „причина равна действию“, — он объясняет тем, что всякая причина в природе переходит в свойственное ей действие и, наоборот, что в действии не содержится ничего, чего бы не было в какой-либо форме в причине. Поэтому все изменения, происходящие в природе, состоят не в создании, а только в превращении сил в определенных постоянных отношениях мер; таким образом равнообразные силы в определенных

отношения эквивалентны друг другу, стало быть, они все могут быть измерены общей мерой, и сумма всех сил, существующих в природе, выраженная в этой общей мере, остается постоянной во времени.

Нужно согласиться, что этот вывод несколько соблазнительен, ибо закон причины и действия составляет ведь исходный постулат всего нашего познания природы. Но с другой стороны, все же надо признать, что очарование, которое производит на нас майеровская дедукция, очень значительно потеряло бы в силе, если бы истинность закона не была уже известна нам из других оснований и если бы благодаря многолетней практике мы не привыкли к тем мыслям, которые он высказывает; на того, кому это дело было бы совершенно новым, вряд ли можно было бы оказать этим рассуждением большое впечатление. Поэтому, если можно признать изложенный ход идеи превосходным объяснением принципа сохранения *a posteriori*, то ему нужно было бы решительно отказать в возведении его в ранг доказательства, обязывающего в физическом смысле. К тому же значение термина „*aequat*“ слишком неопределенно: если бы действительно причина была равна действию, то в природе вообще не происходило бы никакого изменения.

Первой действительно физической дедукцией, посредством которой принцип энергии был доказан в полном объеме, является дедукция, данная Гельмгольцем в его работе о сохранении силы; она основана на механическом миропонимании, а более специально на предположении, что все силы, действующие в природе, могут быть разложены на силы, действующие между точками, для которых действительны ньютоновы аксиомы. Это предположение связано с принятием или того, что все элементарные силы являются центральными, или того, что невозможно построение *regretium mobile*. Самое существенное в изложении этих мыслей мы уже приводили в предыдущем разделе (стр. 43 и сл.). В силу сказанного принцип сохранения энергии сводился бы в основном к механическому закону сохранения живой силы, и мы могли бы представить себе всю энергию мира, состоящей из двух видов: энергии кинетической (живая сила) и потенциальной (сила напряжения).

Если вспомнить, что механическое миропонимание уже издавна, задолго до того, как стал известен принцип энергии, играло значительную роль в натурфилософии, главным образом

потому, что оно превосходно удовлетворяет нашей потребности в причинном объяснении мира, стремящейся к наибольшему единству сил, лежащих в основе явлений; если, дальше, посмотреть, как необычайно наглядно может быть дано с механической точки зрения определение понятия энергии, формулировка и окончательное доказательство принципа, то вполне понятно, что как раз это доказательство получило среди дедуктивных методов преимущество, да и до сих пор наиболее часто употребляется. По примеру Гельмгольца оно было принято и другими физиками (Майер, как известно, не разделял механического мировоззрения); одновременно механическая теория распространилась и получила признание и в Англии благодаря Джоулю, к которому примкнули Ранкин и Томсон.

Несмотря на это, мне кажется, что можно было бы с большим правом считать, что принцип сохранения энергии является опорой механического миропонимания, чем, наоборот, принять последнее за основу для вывода принципа энергии, так как все же этот принцип обоснован более надежно, чем положение, хотя и правдоподобное, что всякое изменение в природе может быть сведено к движению. В бесчисленных решающих случаях правильность принципа сохранения энергии уже доказана, между тем как основания, которые можно привести в пользу механической теории, по крайней мере, поскольку они покоятся на непосредственном опыте, по большей части (но не исключительно, ср. теорию газов) сводятся к закону сохранения энергии, из которого они впрочем ни в коем случае с необходимостью не вытекают (ср. стр. 58). Ибо принцип энергии вполне может существовать без механического миропонимания. Ведь до сих пор напрасно старались свести совокупность электрических и магнитных явлений к простым движениям, а что касается органического мира (на который мы можем и должны распространить доказательство принципа сохранения энергии), то для него нельзя указать и следа такой возможности.

Что же касается взгляда, который и теперь еще часто высказывается, что механическая теория должна быть признана в качестве априорного постулата физического исследования, то мы должны его со всей решительностью отклонить; эта точка зрения не может освободить от обязанности обосновать эту теорию законным путем. Естествознание знает вообще только один постулат: принцип причинности, ибо

последний является условием его существования. Найден ли сам этот принцип только из опыта или же он составляет необходимую форму нашего мышления, — нам незачем здесь исследовать.

Поэтому мне кажется, что в лучшем соответствии с эмпирическим, столь блестяще испытанным, характером нашего современного естествознания будет рассмотрение механического мировоззрения в качестве наиболее возможной и наиболее вероятной цели исследования, чем поспешное предвосхищение еще недостаточно установленного результата с целью сделать его исходным пунктом доказательства как раз такого положения, всеобщая справедливость которого гораздо надежнее каких-либо других законов всего естествознания.

Большое практическое значение механического мировоззрения от такого рассмотрения совершенно не уменьшается; последнее указывает нам направление, в котором должно двигаться исследование, потому что вопрос о допустимости этой теории может решаться только путем опыта. Поэтому следует использовать все доступные только средства, чтобы с крайнею последовательностью провести механическое воззрение во всех областях физики, химии и т. д., и в этом смысле направленное к этому стремление имеет принципиальное значение, тем более, что оно уже привело к блестящим результатам. Но все же имеется большое различие в том, должна ли гипотеза рассматриваться в качестве вероятной, или же она ставится во главу такой дедукции, как та, о которой здесь идет речь.

Благодаря такой осторожности мы одновременно обеспечиваем себя от неприятных разочарований. Ибо если действительно когда-либо будет сделано замечательное открытие, что наши представления о пространстве и времени вообще недостаточны, чтобы описать всю совокупность явлений природы<sup>1</sup>, то мы не будем на этом основании сразу же отбрасывать другие хорошо обоснованные законы, как это происходило уже в подобных случаях, а мы будем в состоянии легко отделить доказанное существенное от недоказанного несущественного.

---

<sup>1</sup> E. Mach, Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Prag 1872, Calve. Впрочем, я не могу согласиться со всеми изложенными здесь взглядами.

Так как на основании сделанных нами выводов мы не можем приписать механическому доказательству принципа сохранения энергии такое значение, которое ему обычно придается<sup>1</sup>, то этим самым мы берем на себя тем большую обязанность найти другое положение, которое лучше способно служить в качестве исходного пункта дедукции, благодаря более прочному обоснованию. И в самом деле, имеется такой закон, который обладает в достаточной мере требуемыми свойствами; это — опытный закон, выражающий невозможность *perpetuum mobile* и его обращения (*Umkehrung*), и притом совершенно независимо от какого-либо частного мировоззрения. В согласии с нашей прежней терминологией (стр. 102) мы можем его сформулировать следующим образом: „Материальная система не может совершить круговой процесс (точно возвращающий систему в ее начальное состояние) таким образом, чтобы работа внешних действий имела положительную, либо отрицательную, отличную от нуля, величину“ (о понятии величины работы внешнего действия, см. стр. 96 и сл.). Или короче: „Положительная работа (*positiver Arbeitswert*) не может ни возникнуть из ничего, ни исчезать в ничто“; обратимость является существенным предположением.

Что касается обоснования этого закона, то нужно прежде всего учесть, что над ним трудились столетия; и все же находились люди, которые не боялись затратить всю жизнь и состояние на то, чтобы путем создания работы из ничего опровергнуть утверждения этого закона. Поэтому если вообще желают придавать значение полученному из опыта непрямому доказательству, то как раз это относится к данному закону, а в таком случае и цена, которой была куплена такая важнейшая для всего человечества истина, не должна считаться слишком дорогой. Во всяком случае факт, что в наши дни мы не преминем напрямик объявить безумцем занимающегося конструкцией *perpetuum mobile*.

Несколько слабее, правда, обстоит дело с доказательством обратного положения, что работа не может уничтожаться. Конечно, едва ли был когда-либо человек, который практически занимался проблемой уничтожения работы, так же как никто не занимался превращением золота

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* В настоящее время, поскольку я могу судить, высокая оценка механического доказательства сильно понизилась.

в свипец. Мы не можем поэтому в полном смысле говорить об опытном доказательстве невозможности решения этой проблемы, как в первом законе, но мы должны ограничиться констатированием факта, что никогда не наблюдалось процесса, в котором не происходит ничего, кроме уничтожения работы. Этим фактом мы должны удовлетворяться вместо доказательства, ибо о выводе обратного закона из прямого не может быть речи потому, что не всякий процесс обратим. Логически никакого противоречия не получилось бы, если принять, что работа, хотя и не возникает из ничего, все же при известных обстоятельствах может превратиться в ничто (взгляд Клапейрона, стр. 27).

Вообще нужно заметить, что и опытное доказательство прямого закона — невозможность получения работы из ничего — выведено только для сравнительно очень ограниченной части всех сил природы; ведь в настоящее время известны и доступны гораздо более многообразные явления, чем в то время, когда стремились к практическому получению *perpetuum mobile*. Насколько правильно опыт, полученный ранее в более узкой области, распространять на все действия в природе, в настоящее время не легко судить, так как благодаря знакомству с принципом сохранения энергии мы слишком уже привыкли к справедливости этой истины, чтобы суметь на время от нее абстрагироваться.

Как бы то ни было, мы ставим во главу последующих выводов положение о невозможности *perpetuum mobile* и обратного ему положения в области всей неорганической и органической природы и будем исследовать совершенно независимо от механического мировоззрения, может ли быть использован этот закон для доказательства принципа сохранения энергии и при каких условиях. Если мы вспомним сначала замечание, сделанное на стр. 101, что все различные формы принципа содержатся в положении: „Энергия материальной системы в определенном состоянии имеет относительно определенного нулевого состояния однозначное значение“, то речь пойдет здесь только о том, чтобы вывести этот закон из невозможности *perpetuum mobile*, а именно, кладя в основу определение понятия энергии, которое мы установили выше (стр. 96). В качестве метода доказательства мы изберем косвенный метод, показывая, что во всяком отдельном случае, в котором получились бы



два различных значения энергии, было бы возможно создание *perpetuum mobile*.

Итак, мы предположим, что материальная система переводится любым путем из данного состояния  $A$  в нулевое состояние  $N$ , и при этом работа внешних действий равна  $a$ ; но пусть возможен и другой путь перехода, для которого работа внешних действий равна  $a'$ , а стало быть отлична от  $a$ . В этом случае всегда может быть создано *perpetuum mobile* (но, разумеется, не таким образом, как это иногда указывают, что систему переводят одним из этих путей в состояние  $N$  и потом другим из этих путей снова возвращают в состояние  $A$ , ибо процесс, о котором идет речь, вовсе не должен быть обратимым). Мы поступим иначе: систему, после того как она тем или другим указанным путем уже достигла состояния  $N$ , мы переведем каким-нибудь любым путем обратно в состояние  $A$ , и этим завершим круговой процесс. Работу внешних действий при возвращении из состояния  $N$  в  $A$  мы обозначим через  $b$ . В таком случае мы получаем два циклических процесса, которые производят соответственно работу  $(a + b)$  и  $(a' + b)$ .

Так как согласно нашему предположению обе эти величины не равны друг другу, то по крайней мере одна из них должна быть отличной от нуля, а тем самым была бы доказана возможность *perpetuum mobile* или обратного ему положения.

В качестве существенного условия пригодности этого доказательства мы должны, правда, признать общую предпосылку, что перевод материальной системы из данного состояния в какое-либо другое каким бы то ни было способом всегда возможен; без этого весь вывод становится иллюзорным. В самом деле, рассмотрим внешние действия, вызывающие превращение алмаза в аморфный уголь; пусть это превращение происходит один раз, например, химическим, а другой раз физическим, например электрическим, путем. Если бы механический эквивалент этих действий оказался неодинаковым, то несмотря на это, никто, конечно, не был бы в состоянии использовать это обстоятельство для создания *perpetuum mobile*, так мы не в состоянии превратить уголь обратно в алмаз, и стало быть завершить круговой процесс<sup>1</sup>. Все же я полагаю,

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* Сравни выше стр. 99.

что вытекающее из этого обстоятельства возражение против общей допустимости данного нами вывода неосновательно. Ибо речь идет не о том, в состоянии ли искусство человека выполнить произвольный перевод системы из одного состояния в другое, а о том, совершается ли фактически этот переход в природе, или может ли он совершаться при соответствующем взаимодействии сил природы. Если бы это заключение не признали, то это привело бы к тому, что положение о невозможности *perpetuum mobile* получается не в силу закона природы, а из-за недостатка умения у людей, что, конечно, противоречит сущности этого положения. На основании всего нашего опыта мы должны считать, что это условие всегда выполнимо, ибо все, что природа непрестанно создает, она производит из простейших элементов; отчасти совершенно неизвестным нам путем, но с одинаковой легкостью составляет она неорганические вещества и сложнейшие организмы и потом снова разлагает их на их составные части. Мы обсуждали уже этот вопрос в том же самом смысле по другому поводу (стр. 101).

Поэтому мы полагаем, что не ошибемся, если (в противоположность ограниченности превращения видов энергии) мы предположим, что материя, сохраняя неизменными химические элементы, способна к неограниченному превращению из всех возможных состояний во всевозможные другие; тем самым обеспечивается вывод закона сохранения энергии со всеми его следствиями из положения о невозможности *perpetuum mobile*. Мы отнюдь не намерены утверждать, что это доказательство является самым лучшим среди дедуктивных методов; вовсе не исключена возможность, что когда естествознание достигнет более высокой ступени развития, в основу дедукции с большим правом будет положено другое опытное положение, например, механическое мировоззрение.

## ТРЕТИЙ РАЗДЕЛ

### РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ЭНЕРГИИ

Прежде чем мы приступим к использованию понятий и положений, развитых в предыдущем разделе, применяя их соответствующим образом к различным видам энергии в отдельности, бросим сначала ориентирующий взгляд на лежащую перед нами область и вместе с этим установим метод, которым мы должны руководствоваться при последующих исследованиях. В то время как выше речь шла исключительно о выяснении принципа, и разобранные отдельные случаи служили только иллюстрацией общих положений, здесь мы должны искать цель нашего вложения в систематической разработке этих положений во всех частях физики, что, конечно, в свою очередь бросит еще более яркий свет на самые принципы. Но что по существу отличает излагаемые здесь применения от принципиальных положений, развитых в предыдущем разделе, так это то обстоятельство, что первые не сохраняют неизменными свое значение, подобно вторым, а могут сами известным образом видоизменяться, вместе с поступательным развитием наших физических представлений; этот пункт важно особо подчеркнуть для того, чтобы полученные ранее результаты, всегда сохраняющие свое значение, не оказались бы вдруг в опасности. Определение понятия энергии и принципа сохранения энергии неизменны для всех времен. Однако формы его применения к конкретным явлениям природы подвергаются изменению и потому именно, что понятия о видах энергии (но не численные их величины) вполне зависят от характера существующего в каждый данный момент мировоззрения. Историческое развитие физики дает не один пример того, как часто изменялись представления о сущности начал, действующих в природе; мы имели случай отметить этот факт в нашем вложении (стр. 125 и сл.).

Трудно сказать, в какой конечной цели стремится эта непрерывная смена в представлениях о сущности сил природы; при современном состоянии развития физики основной момент в этом стремлении заключается в сведении всех явлений природы к механическим изменениям; но одновременно начинает проявляться и другая тенденция, а именно тенденция заменить все непосредственные действия на расстоянии силами, имеющими заметную величину только на бесконечно малых расстояниях. В последующем мы будем неоднократно иметь повод, особенно при обсуждении электрической и магнитной энергии, возвращаться к этим постоянным флуктуациям основных понятий нашего мировоззрения — флуктуациям, которые в конце концов представляются не в виде колебаний в ту и другую сторону, а как постоянный процесс в определенном направлении; ибо с тем фактом, что изменение представления оказывается необходимым, всякий раз связано повышение точности описания явлений природы и тем самым рост наших знаний.

Для настоящей нашей цели мы хотим из всего сказанного установить одно: прежде чем подойти к применению принципа сохранения энергии к определенным явлениям природы, необходимо с самого начала создать себе при помощи опыта известные представления о природе этих явлений и последовательно их придерживаться при последующем рассмотрении. Только таким путем можно вполне освободиться от ошибок, а именно можно избежать опасности либо совсем просмотреть какой-либо вид энергии, либо же, что также может случиться, по ошибке дважды принять его в расчет.

Представление, из которого исходят, может быть проще или сложнее, в зависимости от точности требуемого результата. Если, например, оперируют с капельной жидкостью, то для известной цели достаточно мыслить ее совершенно несжимаемой, и применять к ней положения, вытекающие из принципа сохранения энергии для несжимаемой жидкости. В интересах большей точности все же следует считать, что силы, действующие внутри жидкости, вызваны изменениями плотности. Но и это представление во многих случаях недостаточно, приходится прибавить к указанным силам давления еще другие, а именно силы, возникающие благодаря так называемой вязкости жидкости, которые

мы характеризуем названием „трение“. Этим самым еще не исчерпывается ряд всех степеней точности результата. Если до сих пор принимали жидкость как континуум, то более точное рассмотрение учит, что в мельчайших частицах она обнаруживает дискретные свойства, и для учета последних требуется еще ближе рассмотреть действующие здесь силы, которые выступают в этом случае как молекулярные силы. Каждому такому различному представлению соответствует особая форма видов энергии и, стало быть, различное применение принципа сохранения энергии; при этом тем точнее результат, — правда, за счет простоты расчета, — чем более высокое место в перечисленной последовательности занимает то представление, которое положено в основу.

Для того чтобы характеризовать надлежащим образом точку зрения, из которой хотят исходить при вычислениях, необходимо точно представлять себе, сколько имеется и какого рода независимых переменных, от которых зависят подлежащие исследованию состояния рассматриваемой материальной системы; чем меньше это число, тем проще представление и вычисление. Тогда энергия системы будет выражаться всегда как определенная функция этих независимых переменных, причем совершенно безразлично, соответствует ли эта функция действительно „первичной“ (стр. 112) форме энергии или нет (ср. с этим стр. 115 и сл.).

В остальном при последующих вычислениях мы воспользуемся положениями, выведенными в предыдущем разделе, главные из которых мы здесь еще раз перечислим.

1. Определенное изменение энергии материальной системы, соответствующее определенному изменению ее состояния, равно работе действий, которые должны быть произведены вне системы, чтобы произвести каким-либо путем это изменение состояния (стр. 120). Если, следовательно, не имеют места никакие внешние действия, то энергия системы остается неизменной.

2. Изменение энергии определенного объема обуславливается, с одной стороны, внешними действиями на материю, содержащуюся в объеме, и, с другой стороны, вхождением новой материи в объем (стр. 125).

3. Энергия материальной системы является суммой отдельных паходящихся в системе, независимых друг от друга видов энергии, и каждое внешнее действие изменяет

только тот вид энергии, который как раз ему соответствует<sup>1</sup>. (Принцип суперпозиции, стр. 127.)

### 1. Механическая энергия

Простейшей материальной системой является материальная точка, внутреннее свойство которой определяется только ее неизменной массой. Ее энергией является живая сила

$$\frac{m}{2} \cdot \left\{ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right\}$$

плюс произвольная постоянная, которую мы положим равной нулю, как это делается обычно.

Живая сила, согласно принципу сохранения энергии, остается постоянной до тех пор, пока на точку не производится какое-либо внешнее воздействие. Но если производится внешнее действие, т. е. если на рассматриваемую материальную точку действуют силы, исходящие от других материальных точек, то эти силы за известный промежуток времени вызывают изменение энергии материальной точки, величина которого определяется работой этих действий, т. е. работой, которую за данное время совершают силы над рассматриваемой точкой; и это справедливо всегда, из какого бы источника ни происходили названные силы (стр. 121 и сл.).

Применяя это положение к элементу времени  $dt$ , получим выражение для суммы соответствующей работы всех сил, действующих на точку, в такой форме:

$$X dx + Y dy + Z dz,$$

где  $X, Y, Z$  суть компоненты результирующей силы, взятые по направлениям трех координатных осей. На основании приведенного ранее положения получаем, что прирост энергии за бесконечно малое время  $dt$ , т. е. дифференциал выражения живой силы, равен указанной здесь величине работы. Тем самым, применяя принцип сохранения энергии, мы нашли бы уравнение, которому подчиняется движение точки; все же это уравнение еще недостаточно, чтобы определить зависимость каждой из трех переменных  $x, y, z$  от времени  $t$ .

<sup>1</sup> *Прим. 1908.* Это положение, оказывающее превосходную службу при первой ориентации, все же в общем должно считаться только приближенным, как уже отмечалось выше на стр. 129; ибо, оно применимо тем менее, чем большие требования предъявляются в смысле точности.

Но мы можем получить требуемое число уравнений, применяя положение, воспроизведенное выше (стр. 133) под третьим номером. Примем во внимание, что выражение энергии рассматриваемой точки представляется в виде суммы трех симметрично построенных членов, каждый из которых относится к определенной оси координат и зависит только от соответствующей переменной. Полная энергия составляется, следовательно, из трех независимых друг от друга видов энергий. Но совершенно то же самое свойство мы замечаем и в выражении работы действующих внешних сил. Эта величина также распадается на три слагаемых, каждая из которых соответствует определенной оси координат и имеет значение, независимое от двух других; таким образом каждое отдельное внешнее действие соответствует определенному отдельному виду энергии. Естественно предположить, что не только изменение полной энергии измеряется полной работой внешних сил, но что каждый из названных видов энергии меняется только в зависимости от непосредственно ему соответствующего действия и совершенно не зависит от двух других. Если мы будем считать эту мысль правильной, то приведенное выше уравнение распадается на три отдельных уравнения, каждое из которых относится к определенной оси координат:

$$d \left\{ \frac{m}{2} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \right\} = X dx,$$

$$d \left\{ \frac{m}{2} \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 \right\} = Y dy,$$

$$d \left\{ \frac{m}{2} \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right\} = Z dz,$$

а произведя дифференцирование, получаем уравнения движения Ньютона:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = X,$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = Y,$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = Z,$$

которых достаточно для характеристики всего движения.

Само собой понятно, что этот вывод ни в какой степени не может претендовать на доказательство двух первых ньютоновых аксиом, так как указанный закон суперпозиции

энергий не может быть применен а priori. Напротив, его значение, как уже подробно отмечалось на стр. 130, и как уже подчеркивалось в последнем изложении, основано главным образом на его эвристической ценности. Совершенно так же, как здесь в основе разделения на соответствующие части и энергии и внешних действий лежат три координатных направления, так в другой раз мы будем исходить из других точек зрения (например, из разделения соответственно тепловой или электрической природе), обуславливающих разложение действий на различные отдельные, друг от друга независимые члены, которые затем путем простого сложения складываются в полное действие. Но где это разложение действительно может быть проведено и где оно приводит к правильным результатам, — это может показать только опыт; ибо, например, то, что действия по трем осям координат происходят независимо друг от друга, также является опытным законом, которого мы не можем обойти ни при каких обстоятельствах, ни при каком способе изложения. А уж если с ним согласиться, то вышеприведенный вывод совершенно строго будет вытекать из принципа сохранения энергии.

Мы убедились, что обе первые ньютоновы аксиомы могут быть выведены из положений, вытекающих из принципа сохранения энергии. Теперь возникает вопрос, не будет ли удобным в интересах более рационального понимания механики принять в качестве исходного пункта при изложении последней положения, аналогичные только что изложенным, вместо тех исходных положений, которые приняты в настоящее время. Сейчас механика почти всегда выводится из закона пропорциональности силы и ускорения; все равно, сводится ли при этом понятие силы вслед за Ньютоном и В. Томсоном<sup>1</sup> в конечном счете к понятию давления так, как оно непосредственно воспринимается нами через мускульное ощущение (осязание), или же это понятие силы вслед за Кирхгофом<sup>2</sup> с самого начала, по определению, отождествляется с понятием ускорения, причем в этом случае понятие силы теряет, конечно, в своем значении,

<sup>1</sup> W. Thomson und P. G. Tait, Handbuch der theoretischen Physik. Deutsch von H. Helmholtz u. G. Werthheim, Braunschw. 1871, I, § 207.

<sup>2</sup> G. Kirchhoff, Vorlesungen über mathematische Physik, Mechanik, Leipzig 1877, p. 5, 23.



так как совершенно не обращается внимание на мускульное ощущение. В этом случае работа, энергия и т. д. выводятся из силы. Этому противостоит другое воззрение, впервые развитое Гюйгенсом<sup>1</sup>, которое ставит во главу механики понятие энергии (работа, живая сила), а другим основным понятием, как, например, понятию силы, отводит второстепенное место. Последняя точка зрения сама по себе, очевидно, обладает тем преимуществом, что характерное для нее понятие энергии является определенной величиной для всех различных отделов физики; стало быть, на этом понятии может быть основана не только механика, но и теория теплоты, электричества и т. д., чем несомненно обуславливается более единое и глубокое понимание физических явлений; я полагаю, что рано или поздно это воззрение всюду проложит себе дорогу, коль скоро мы благодаря частой практике больше привыкнем к этому сравнительно еще мало употребляемому понятию; с другой стороны, все же следует принять во внимание, что понятие силы, исключительно на котором со времени Ньютона строится механика, обладает преимуществом, которое недостает понятию энергии; это то обстоятельство, что мы обладаем чувством, мускульным ощущением, посредством которого мы, хотя и не можем точно измерить давление, но все же можем его непосредственно воспринимать, в то время как чувство для восприятия энергии целиком и полностью отсутствует; это обстоятельство было, несомненно, одним из оснований того, почему в ходе исторического развития механики понятие силы могло так оттеснить на задний план понятие работы и добиться решительного перевеса. Сила, по крайней мере в ньютоновском понимании, кажется нам как нечто первичное, как причина, а движение, совершение работы и т. д., как действие, хотя сила и ускорение совпадают во времени; это имеет лишь то основание, что когда мы двигаем тело действием мускулов, физиологический процесс, происходящий в нас, фактически предшествует во времени наступающему движению. Когда же тело приходит в движение независимо от действия наших мускулов, а именно, благодаря притяжению другим телом, то все же всегда

---

<sup>1</sup> E. Mach, Zur Geschichte des Arbeitsbegriffes. Wien. Ber. (2) 68, p. 479, 1873.

(Есть русский перевод; книга дает идеалистическую трактовку истории понятия работы. *Прим. переводчиков*).

можно представить себе, что, устранив притягивающее тело, мы можем вызвать такое же ускорение собственным усилием, а постольку и в этом случае можно говорить в совершенно определенном смысле о силе, вызывающей это движение. То, что мы можем получить количественную меру этой силы только путем наблюдения наступившего движения, основано только на несовершенстве нашего мускульного чувства, и это ничего не изменяет в самом понятии силы.

Так как, согласно сказанному, и в согласии с историческим развитием, мы усматриваем существенное значение понятия силы в его связи с ощущением, обусловливаемым мускульным чувством, то мы и не можем решиться вслед за Кирхгофом и другими, уничтожив эту связь, оставить за понятием силы чисто кинематическое значение. Можно согласиться, что только на понятии ускорения может быть построена большая часть механики, прежде всего вся астрономия и вообще все те процессы движения, которые воспринимаются только глазами. Но физика имеет дело с описанием всех форм явлений, не только тех, которые передаются нам через ощущения движения, но и тех, которые передаются через мускульные, температурные, цветовые и прочие ощущения, и соответственно этому основные фундаментальные физические понятия следует выводить непосредственно из специфических восприятий чувств. Точно измерить, например, температуру при помощи ощущения теплоты мы можем в такой же малой степени, как и измерить силу мускульным ощущением, или цветовые нюансы через ощущение цветов, ибо для этого недостаточна острота чувственных восприятий; для достижения этой цели мы должны найти опытным путем другие явления, которые находятся в необходимой связи с названными ощущениями и дают возможность количественного измерения; это, как правило, суть явления движения: в случае температуры — расширение, в случае силы — ускорение, в случае цвета — длина волны и т. д.; но все же это не дает нам повода к трактовке температуры, силы, цвета и пр. как кинематических понятий. Так же как мы не связываем со словом „синее“ в первую очередь механическое представление об определенном числе колебаний эфира или определенной длине волны, которые, однако, только и дают нам точную физическую меру цвета, — совершенно так же,

если речь идет о „силе притяжения“ магнитом куска железа, мы должны прежде всего думать не о помноженном на массу ускорении, которое магнит сообщает куску железа, а скорее о том, — правда, не поддающемся точным измерениям, — ощущении, которое мы чувствуем в мускулах, если мы вместо магнита сами собственным действием сообщаем железу названное ускорение. Кирхгоф в своем достойном удивлении изложении механики сделал понятие причинной взаимосвязи к тому, что оно действительно означает, а именно к необходимости последовательности во времени. Но вместе с тем, он, к сожалению, полагал, что из основ механики следует удалить также и понятия, обусловленные мускульным ощущением, хотя они помогают нам образовывать физические понятия с таким же правом, с каким позволяют это делать ощущения, правда, сравнительно более острого, зрительного чувства.

Правда, для современного состояния механики по существу безразлично, связать ли с самого начала понятие силы с восприятием мускульного ощущения или ввести эту связь потом (что эта связь вообще должна быть раньше или позже введения, это само собой понятно, принимая во внимание хотя бы теории первых и древнейших машин, приводившихся в движение мускульной силой). Но механика в такой же малой мере, как и любая другая часть физики, представляет собой законченную науку, хотя она и стоит на сравнительно высоком уровне; между тем как однажды наблюдаемые факты остаются и дополняются и пополняются все новыми фактами, взгляды могут меняться часто в неожиданной форме. Единственный твердый и бесспорный исходный пункт — это, как уже признано, явления наших чувственных восприятий, и поэтому будет в высокой мере рациональным, если мы будем всегда пользоваться восприятиями всех наших чувств, а не откажемся наперед от использования одного из них, который оказал (и, вероятно, еще окажет) важнейшие услуги науке для понимания и развития понятия силы (как об этом говорит самое название „сила“).

Возвращаясь к поднятому выше вопросу, — будет ли целесообразней для изложения механики вывести закон пропорциональности силы и ускорения из принципа сохранения энергии, или наоборот, — мы могли бы на основании уже высказанного выше взгляда согласиться с первым;

однако, принимая во внимание только что рассмотренную непосредственность понятия силы, нам кажется необходимым обосновать понятие работы только на понятии силы (совершенно независимо от ускорения), и отсюда, после формулировки этого понятия, перейти к применению закона сохранения энергии, откуда вытекает тогда пропорциональность силы и ускорения. Как это могло бы быть проведено в частности, мы не станем излагать подробнее, тем более, что здесь остается известный простор индивидуальному вкусу. Отметим еще только один пункт, которому мы придаем особое значение, а именно, что изложенное здесь воззрение наиболее тесно примыкает к методу, который с наилучшим успехом уже используется в других частях физики, особенно в теории теплоты. Мы выводим действия теплоты из принципа сохранения энергии, соответственно из закона эквивалентности теплоты и работы, и все же в учении о теплоте понятие количества теплоты не является первоначально данным, так как для его восприятия, как и для восприятия работы, мы не обладаем никаким специфическим чувством; мы приходим к понятию количества теплоты через понятие температуры, которую мы непосредственно воспринимаем при помощи чувства температуры (*Temperatursinn*), подобно тому как понятие силы мы получаем при помощи мускульного ощущения или, как мы прямо можем сказать, ощущения силы. Следовательно, в этом отношении мы достигли уже в теории теплоты более зрелых взглядов, чем в механике: ибо со временем мы должны прийти к тому, что и в механике мы будем понимать энергию как первично существующее, а силу — как проявление этой потенциальной или кинетической энергии, подобно тому, как уже теперь мы рассматриваем температуру как проявление теплоты. Там, где нет никакой энергии, не может быть ни силы, ни температуры, ни какого-либо другого ощущения.

Прежде чем закончить рассмотрение движения отдельной свободной материальной точки, мы приведем еще один закон, весьма плодотворный для дальнейших приложений. Если материальная точка благодаря воздействию как-либо сил переходит из состояния покоя в состояние движения, то в первый момент этого движения работа действующих сил всегда положительна. Ибо, поскольку начало движения всегда связано с приростом энергии точки (ее живой силы), внешние действия, вызывающие этот прирост,

также должны быть положительными. Этот закон следует, конечно, и непосредственно из того обстоятельства, что перемещение точки, произведенное действующими силами, совпадает по направлению с результирующей силой. Если случается, что точка в процессе движения снова возвращается в исходное положение, то работа сил в общем случае не равна нулю, и поэтому точка не приобретает снова своей прежней скорости. Однако это обстоятельство (а именно, что работа сил равна нулю при возвращении точки в первоначальное положение. *Прр.*) имеет место всегда, когда действия вызываются центральными силами, исходящими из некоторых покоящихся масс; тогда существует потенциал  $V$  действующих сил, так что

$$X = -\frac{\partial V}{\partial x}, \quad Y = -\frac{\partial V}{\partial y}, \quad Z = -\frac{\partial V}{\partial z}.$$

В этом случае величина работы, произведенной в любое конечное время, измеряется просто уменьшением этого потенциала, безразлично, какой бы путь ни описала точка. Тогда только что выведенный закон гласит следующее: если покоящаяся точка приходит в движение под действием сил, имеющих потенциал, зависящий только от положения точки, то это происходит всегда так, что потенциал уменьшается.

Переходя, далее, к рассмотрению материальной точки, подвижность которой ограничивается некоторыми внешними, с самого начала заданными условиями (связями), мы можем прежде всего различить два рода сил: 1) силы, которые побуждают точку известным образом двигаться,— мы будем их в последующем называть движущими силами; их величина и направление в общем случае известны непосредственно, и 2) силы, которые вызываются существованием неизменных связей,— мы называем их силами связи (*Zwangskräfte*); эти силы характеризуются только тем, что прямым результатом их действия всегда является сохранение при всех условиях неизменных связей. Оба рода сил совместно определяют движение точки, согласно общим законам движения свободной точки. Неопределенность, которая еще содержится в значениях сил связей, может быть устранена следующим положением, основанным на разложении всей работы на работу отдельных сил: если какое-либо механическое устройство, имеющее целью осуществление и сохра-

нение неизменных связей, не связано ни с затратой, ни с производством энергии, то работа сил связи, действующих на рассматриваемую материальную точку, всегда равна нулю; ибо в этом случае никакая энергия не может быть сообщена точке действием неизменных связей, — иначе эта энергия возникла бы из ничего. Это (т. е. равенство работы сил связи нулю. *Пер.*) имеет место всегда, когда связи не зависят от времени, например, когда точка вынуждена оставаться на неподвижной поверхности или кривой. Следовательно, точка, на которую не действует никакая движущая сила, движется по неподвижной поверхности или кривой с постоянной скоростью.

Предположим теперь, что точка вначале находится в покое, и затем под действием определенных движущих сил приходит в движение; будем считать при этом, что связи удовлетворяют указанному выше условию. Тогда согласно вышеприведенному закону полная работа всех действующих на точку сил должна быть положительной; но так как работа сил связи равна нулю, то отсюда, поскольку работа всех сил является суммой работ отдельных сил, следует положение: „при всяком возникающем движении работа движущих сил сама по себе является положительной“; другими словами: направление результирующей движущих сил составляет острый угол с направлением движения точки. В частном случае, когда движущие силы имеют потенциал, последний в начале движения убывает. Отсюда непосредственно получается принцип возможных перемещений: если при всех перемещениях, которые может совершать точка при наличии неизменных связей, не найдется ни одного такого, для которого работа движущих сил положительна, то вообще не может происходить никакого движения, в этом случае должно иметь место равновесие; ибо если бы это было не так, и точка начинала бы двигаться, то работа движущих сил при возникающих перемещениях была бы или равна нулю или отрицательной, что несовместимо с приведенным выше законом. Если  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  суть опять компоненты результирующей движущих сил, то точка будет, следовательно, в равновесии, если при всех допустимых виртуальных перемещениях  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$  имеет место условие

$$X \delta x + Y \delta y + Z \delta z \leq 0,$$

В обычно встречающемся случае неизменные связи выражаются уравнениями (а не неравенствами) между координатами движущейся точки. Если в этом случае какое-нибудь перемещение  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$  совместимо со связями, то возможно и противоположное перемещение  $-\delta x$ ,  $-\delta y$ ,  $-\delta z$ ; так что требуемое для равновесия условие выполняется только тогда, когда для всех возможных перемещений

$$X\delta x + Y\delta y + Z\delta z = 0.$$

Если движущие силы имеют потенциал, то уравнение гласит:

$$\delta V = 0.$$

Это условие выполняется всегда в том случае, если для соответствующей точки пространства значение потенциала является maximum'ом или minimum'ом; и непосредственно ясно, что в первом случае равновесие неустойчивое, а во втором — устойчивое. Ибо если в первом случае сместить точку на малое расстояние от ее положения равновесия, то она больше не будет в равновесии, а придет в движение, и притом так, что потенциал убывает. Если же в положении равновесия потенциал имеет минимум, то точка должна в это положение вернуться, в противоположном случае это невозможно. Имеются и такие случаи, в которых равновесие для известных перемещений неустойчиво, а для других устойчиво; в таких случаях значение потенциала не имеет ни максимума, ни минимума.

Мы вывели все эти следствия с известной обстоятельностью, которую можно было бы несколько сократить, если использовать некоторые простые положения (например, о том, что сила связи неизменной поверхности или кривой действует всегда перпендикулярно к их направлению); зато тем самым мы получили ту выгоду, что мы можем перенести эти рассуждения в основном без изменения на систему любого числа материальных точек (см. ниже). Из принципа возможных перемещений можно вывести, как известно, не только условия равновесия, но и уравнения движения материальной точки, если в компонентах движущих сил добавить еще величины

$$-m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad -m \frac{d^2y}{dt^2}, \quad -m \frac{d^2z}{dt^2}.$$

Перейдем теперь к рассмотрению системы из многих движущихся точек, а именно прежде всего из двух точек.

чтобы вывести для них принцип действия и противодействия; при этом пусть все действия других масс сначала будут исключены. Если мы обозначим координаты точки через  $x, y, z$ , ее живую силу через  $L$ , компоненты силы, с которой на нее действует другая точка, через  $X, Y, Z$ , причем индекс 1 или 2 будет соответствовать точке, которая подвержена действию, то для каждой отдельной точки прирост ее энергии равен работе силы, действующей на точку, и, следовательно,

$$dL_1 = X_1 dx_1 + Y_1 dy_1 + Z_1 dz_1,$$

$$dL_2 = X_2 dx_2 + Y_2 dy_2 + Z_2 dz_2.$$

Если, с другой стороны, мы соединим обе точки вместе в „основную систему“ (стр. 122), то внешние действия равны нулю, а потому и энергия остается постоянной. Но эта величина в общем случае состоит, конечно, не только из живой силы обеих точек, а сюда добавляется еще один член, зависящий также от положения точек в пространстве и оказывающийся новым видом энергии. Если этот вид энергии — потенциальную энергию — мы обозначим через  $U$ , то имеем

$$L_1 + L_2 + U = \text{const},$$

и, следовательно,

$$dL_1 + dL_2 + dU = 0.$$

Соединяя вместе оба вышеприведенных уравнения, получим

$$X_1 dx_1 + Y_1 dy_1 + Z_1 dz_1 + X_2 dx_2 + Y_2 dy_2 + Z_2 dz_2 = -dU.$$

Вся работа действующих сил составляет, следовательно, полный дифференциал по времени от некоторой функции, зависящей только от мгновенного состояния (от положения и скорости) обеих точек, и это условие позволяет вывести некоторые необходимые свойства сил.

Если бы мы допустили, что  $U$  зависит не только от положения, но и от скоростей обеих точек, то  $\frac{dU}{dt}$  содержало бы в себе так же и ускорение, откуда согласно последнему уравнению следует, что компоненты сил  $X, Y, Z$  во всяком случае должны были бы зависеть от ускорения.



Это предположение, действительно, имеет место в основных законах, установленных В. Вебером<sup>1</sup>, Б. Рیمانом<sup>2</sup> и Р. Клаузиусом<sup>3</sup> для действия двух электрических точек друг на друга. Правда, благодаря этому допущению как представление о способе действия силы, так и самое вычисление становится гораздо более сложным; а так как приятие этих законов никоим образом не является необходимым, наоборот, против каждого из них говорят еще и другие особые основания, то мы и не будем здесь рассматривать далее этот случай.

В таком случае не остается ничего другого, как принять, что  $U$  зависит только от положения обеих действующих точек, а именно от их взаимного расстояния  $r$ , так как это единственная физическая величина, которая полностью определяется положением обеих точек. Следовательно, мы имеем

$$dU = \frac{\partial U}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial U}{\partial y_1} dy_1 + \frac{\partial U}{\partial z_1} dz_1 + \frac{\partial U}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial U}{\partial y_2} dy_2 + \frac{\partial U}{\partial z_2} dz_2,$$

причем

$$U = f(r).$$

Хотя члены, на которые распадается дифференциал  $dU$ , соответствуют отдельным величинам, из которых складывается приведенное выше выражение работы ( $= -dU$ ), но это еще не дает основания полагать два соответствующих члена равными друг другу, стало быть, не дает основания составлять уравнения

$$X_1 = -\frac{\partial U}{\partial x_1} = -\frac{\partial f(r)}{\partial x_1}, \quad Y_1 = -\frac{\partial U}{\partial y_1} = -\frac{\partial f(r)}{\partial y_1}$$

и т. д. Это выполнялось бы только тогда, когда 1) дифференциалы  $dx_1, dy_1, \dots$  были бы совершенно независимы друг от друга, и одновременно 2) величины  $X_1, Y_1, \dots$  были

<sup>1</sup> W. Weber, Elektrodynamische Massbestimmungen, Abh. d. k. sächs. Ges. d. Wiss. X, p. 1, 1871. Ср. также Pogg. Ann. Jubelband, p. 212, 1874.

<sup>2</sup> B. Riemann, Schwere, Elektrizität und Magnetismus, bearbeitet von Hattendorff, Hannover 1876, p. 326.

<sup>3</sup> R. Clausius, Über ein neues Grundgesetz der Elektrodynamik, Pogg. Ann. 156, p. 657, 1875. Crelle J. 82, p. 85, 1876. Die mechanische Behandlung der Elektrizität. Braunschweig 1879, p. 277.

бы независимы от этих дифференциалов (т. е. от скоростей). В самом деле, если одно из этих условий не выполняется, то всегда могут быть найдены отличные от нуля величины, которые могут быть добавлены к данным значениям компонент  $X_1, Y_1, \dots$ , причем значение работы  $X_1 dx_1 + Y_1 dy_1 + \dots$  вследствие этого прибавления не изменится и не изменится, стало быть, и  $dU$ . Эти „добавочные“ силы („Zusatz“ kräfte) обладают, следовательно, тем свойством, что произведенная ими работа равна нулю. Такие силы можно, на самом деле, указать; причем они распадаются соответственно двум приведенным условиям на два отдельных вида. Одни силы, появляющиеся вследствие зависимости координат друг от друга, происходят от наличия неизменных связей между обеими действующими точками; они играют важную роль в механике, благодаря удобству их математической трактовки; мы возвратимся еще к ним позднее несколько более обстоятельно, а здесь мы хотим подчеркнуть одно, а именно, что силы этого рода (которые мы обозначали выше как силы связи) вовсе не имеют в природе первичного существования, а всегда могут быть сведены в козачном счете к таким силам, которые определяются только состоянием точек; ибо всякая неизменная связь может быть представлена в природе при помощи некоторых механических средств, следовательно, при помощи подходящей группировки подходящих тел, а разлагая эти тела на их отдельные точки, мы разлагаем силы связи на их элементы, которые все представляются „движущими“ силами (стр. 152). Всякую точку нужно рассматривать в козачном счете как свободную <sup>1</sup>.

Таким образом остается только рассмотреть еще другой род добавочных сил — сил, зависящих от скоростей обеих свободных точек, таким образом, что их работа, произведенная над обеими точками, всегда равна нулю; мы обозначим их компоненты через  $X'_1, Y'_1, Z'_1, X'_2, Y'_2, Z'_2$ . Несомненно, мы можем принять, что величины этих сил зависят не от абсолютных значений координат и скоростей, а только от относительных их значений, так как первые вообще не

<sup>1</sup> Прим. 1908. Это и до сих пор является моим взглядом. Однако, выше это преподнесено в чересчур аподиктической форме. Гёрц в своих *Prinzipien der Mechanik* (Leipzig, J. A. Barth, 1894) развивал прямо противоположную точку зрения.

имеют никакого физического смысла. Тогда, если работа этих сил

$$X_1' dx_1 + Y_1' dy_1 + Z_1' dz_1 + X_2' dx_2 + Y_2' dy_2 + Z_2' dz_2$$

должна тождественно исчезать, то, как легко показать, мы получим

$$X_1' = -X_2', \quad Y_1' = -Y_2', \quad Z_1' = -Z_2';$$

следовательно, силы, действующие на обе точки, по величине равны, а по направлению, которое может быть любым, противоположны. Если для сокращения положим

$$x_1 - x_2 = x, \quad y_1 - y_2 = y, \quad z_1 - z_2 = z,$$

то должно удовлетворяться еще условие

$$X_1' dx + Y_1' dy + Z_1' dz = 0.$$

Общим решением этого уравнения является

$$\left. \begin{aligned} X_1' &= Q \frac{dz}{dt} - R \frac{dy}{dt}, \\ Y_1' &= R \frac{dx}{dt} - P \frac{dz}{dt}, \\ Z_1' &= P \frac{dy}{dt} - Q \frac{dx}{dt}, \end{aligned} \right\}$$

причем  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  представляют любые функции (относительных) координат и скоростей. На совместимость таких сил с принципом сохранения энергии обратил внимание Липшиц<sup>1</sup>. Детализируем еще более эти идеи, чтобы получить более ясное понятие о сущности этих сил; прежде всего должно выполняться условие, что вращение системы координат вокруг ее начальной точки так же не меняет зависимости компонент сил от координат и их производных, как и параллельное смещение координатных осей. Это условие выполняется, если мы положим

$$P = \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad Q = \frac{\partial \rho}{\partial y}, \quad R = \frac{\partial \rho}{\partial z},$$

где  $\rho$  представляет собой любую функцию от  $r$ . Если взять  $\rho$  обратно пропорциональным расстоянию  $r$ , то определенная

<sup>1</sup> H. v. Helmholtz, Wiss. Abh. 1, p. 70.

таким образом сила переходит в силу, с которой, согласно Амперу, покоящийся элемент тока действует на неподвижный северный полюс магнита, если предположить, что компоненты тока принимаются пропорциональными величинами  $\frac{dx}{dt}$ ,  $\frac{dy}{dt}$ ,  $\frac{dz}{dt}$ .

Следовательно, подобную силу вполне можно себе представить; а так как она действует по менее простому закону, чем центральные силы, то ей можно было бы приписать первичное физическое существование только в том случае, если было бы доказано, что некоторые явления движения, наблюдаемые в природе, не могут происходить без нее; до сих пор это не имеет места.

Упомянутое взаимодействие между элементом тока и магнитным полюсом нельзя здесь привести в качестве доказательства существования таких сил; ибо такое действие не означает ничего больше, как краткое и удобное выражение сил, с которыми действуют друг на друга замкнутые токи и целые (vollständige) магниты; совершенно изолированный элемент тока вообще не имеет физического существования. Введение рассматриваемых сил было бы оправдано только в том случае, если бы во взаимодействии двух или нескольких точек или тел, совершенно изолированных от внешних влияний, можно было бы констатировать явление, которое было бы свойственно таким силам. Такое явление легко было бы обнаружить: хотя искомые силы удовлетворяют закону сохранения движения центра тяжести, ибо они действуют на каждую из обеих точек с равной величиной и в противоположном направлении, но они противоречат закону сохранения площадей, ибо их направления не совпадают с линией, соединяющей точки, а перпендикулярны к ней, и потому дают вращающий момент. Таким образом в то время как живая сила движения остается постоянною, непрерывно меняется сумма моментов количества движения по отношению к неизменной оси. Стало быть, всякое наблюдаемое отклонение от закона площадей движения какой-нибудь системы точек, не подверженной никаким внешним действиям, должно было бы привести к принятию рассматриваемых здесь сил.

Так как направление этих сил не совпадает с направлением линии, связывающей обе точки, между которыми они действуют, то они находятся также в противоречии

с принципом действия и противодействия и, поскольку этот принцип предполагается всегда справедливым, теряют свою основу. Таким способом от них освободился Гельмгольц<sup>1</sup>; однако в целях односторонности трактовки мы установим принцип действия и противодействия не как непосредственно данный, а, наоборот, рассмотрим при каких предположениях он оказывается следствием последовательно нами проведенного принципа энергии. Если мы будем исходить из приведенного выше уравнения сохранения энергии:

$$X_1 dx_1 + Y_1 dy_1 + Z_1 dz_1 + X_2 dx_2 + Y_2 dy_2 + Z_2 dz_2 = -dU,$$

причем

$$U = f(r)$$

и, следовательно,

$$dU = \frac{\partial U}{\partial x_1} d(x_1 - x_2) + \frac{\partial U}{\partial y_1} d(y_1 - y_2) + \frac{\partial U}{\partial z_1} d(z_1 - z_2),$$

то прежде всего, мы можем принять, что компоненты сил зависят только от относительных координат

$$x_1 - x_2, \quad y_1 - y_2, \quad z_1 - z_2,$$

так как их величины не изменяются при параллельном перемещении координатных осей. Тогда мы получаем

$$X_1 + X_2 = 0, \quad Y_1 + Y_2 = 0, \quad Z_1 + Z_2 = 0,$$

и

$$X_1 d(x_1 - x_2) + Y_1 d(y_1 - y_2) + Z_1 d(z_1 - z_2) = -dU.$$

Если мы теперь положим равными друг другу не только оба полных выражения  $dU$ , но и какие-либо два соответствующих члена этого выражения, то в результате получим

$$X_1 = -\frac{\partial U}{\partial x_1} = -\frac{\partial f(r)}{\partial r} \cdot \frac{x_1 - x_2}{r} \text{ и т. д.}^1$$

т. е. силы, исходящие из обеих точек, равны друг другу и противоположны, и их направления совпадают с линией, связывающей точки. Следовательно, принцип действия и противодействия (третья аксиома Ньютона) вытекает из принципа сохранения энергии, если предположить, что ве

<sup>1</sup> Н. v. Helmholtz, Wiss. Abh. I, p. 70.

только вся работа сил, действующих между двумя точками, выражает изменение их потенциальной энергии, но что и каждая отдельная часть работы, относящаяся к каждой из трех координатных осей (сумма этих частей составляет работу), измеряет соответствующий прост энергии по этой осп. И это опять является не чем иным, как применением принципа наложения (суперпозиции) энергии, который имеет то значение, что охватывает ряд крайне разнообразных законов с общей точки зрения и по поводу которого мы можем вновь отослать читателя к замечаниям на стр. 130.

Этим самым мы свели силы, действующие между двумя точками, к центральным силам, которые имеют потенциал  $U$ , зависящий только от расстояния, причем  $U$  выражает одновременно значение потенциальной энергии обеих точек. До сих пор не открыто ни одного явления в природе, которое противоречило бы тому, что все силы в конечном счете могут быть сведены к таким центральным силам. Возражать против этого на том основании, что электродинамические действия зависят от силы тока и даже от производных его по времени нельзя, так же как нельзя это возражение обосновать, например, тем фактом, что давление газа зависит от температуры и, следовательно, от живой силы внутренних движений. Ибо подобно тому, как немного десятков лет назад научились объяснять последнюю силу (т. е. силу давления газа. *Пер.*) законами упругого удара, которые, несомненно, со своей стороны могут быть сведены к действиям центральных сил, так существует и обоснованная надежда разрешить подобным же образом и вопрос об электродинамических явлениях. Нужно только представить себе, что электродинамические силы не непосредственно обусловлены только лишь наличием текущего электричества, а зависят от своеобразного, пока что неизвестного распределения действующих центров, которое само является лишь результатом действия тока.

Перейдем теперь к рассмотрению системы многих точек, действующих друг на друга на конечных расстояниях. Мы можем мысленно разложить рассматриваемые здесь силы на силы, действующие между попарно взятыми определенными точками, и тем самым свести все действия к центральным силам. Что подобное разложение вообще возможно и, в частности, что величина и направление сил, действующих между двумя точками, совершенно не подвергаются

влиянию действий, исходящих из других точек, не является само собой понятным, а представляет опять-таки случай применения принципа суперпозиции действий, что уже не в первый раз служит нам руководством при пользовании принципом сохранения энергии.

Этим объясняется также, почему закон равенства действия и противодействия справедлив и для таких сил, которые проявляются непосредственно не в форме центральных сил, как силы трения, неупругий удар и т. п. Такие силы можно всегда рассматривать, как составленные из некоторого числа центральных сил, и так как последние порознь удовлетворяют названному закону, то ему должна удовлетворять и результирующая сила.

Если мы имеем такую систему свободно движущихся точек, которая не подвергается никаким внешним действиям и энергия которой, следовательно, постоянна, то компоненты результирующей всех сил, действующих на точку  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , могут быть выражены в форме

$$X = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad Y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad Z = -\frac{\partial U}{\partial z}.$$

$U$  является потенциалом действующих сил и образуется путем простого сложения потенциалов всех попарно взятых точек. Для отдельной точки опять справедлив закон, что изменение ее энергии, т. е. ее живой силы, равно работе силы, действующей на точку. Если сложить все получающиеся таким путем уравнения и обозначить через  $L$  сумму всех живых сил, то отсюда получается

$$dL = \sum (X dx + Y dy + Z dz) = -dU$$

или

$$L + U = \text{const.}$$

Следовательно, энергия системы всегда состоит только из двух частей: актуальной, или кинетической, энергии и потенциальной энергии, из которых первая составляется из суммы живых сил, а вторая — из потенциала центральных сил. Если к рассматриваемым силам добавляются еще действия извне, то последнее уравнение видоизменяется так, что изменение энергии, происходящее за некоторое время, т. е. энергия, переносимая извне в систему, равна сумме работ, которые совершаются за то же время над всеми

точками системы внешними силами. Этот закон дает возможность применить уравнение энергии к совершенно произвольному комплексу точек, выделенному из данной системы.

Для системы свободных точек, которую мы до сих пор рассматривали, установление уравнений движения так же просто, как и для одной свободной точки. Дело обстоит несколько иначе, если движения точек ограничиваются неизменными связями, так как в этом случае к движущим силам добавляются еще определенные силы связи, величина и направление которых непосредственно положениями точек не даются. Однако цель здесь достигается путем использования характерного свойства всех сил связи. Какие бы неизменные, не зависящие от времени связи мы ни наблюдали в природе (неизменные поверхности и линии, твердые тела, идеально гибкие и нерастяжимые нити и мембраны, несжимаемые жидкости), — для всех этих связей верно положение, что работа сил связи всегда равна нулю, а именно на том основании, что сохранение этих связей не связано ни с затратой, ни с получением энергии. Ибо так как для поддержания действия названных связей не требуется затраты работы извне, и тела, образующие связь, при любом движении не испытывают какого-либо внутреннего изменения, то от совокупных действий соответствующих сил связи также не получается никакой работы или живой силы; иначе она возникла бы из ничего. Но коль скоро одно из обоих названных обстоятельств отпадает, теряет свою силу и приведенная нами аргументация. Так, например, для поддержания неизменных связей требуется всегда работа внешней силы в том случае, когда связи зависят от времени, следовательно, если, например, точка вынуждена оставаться на поверхности, движущейся определенным заданным способом. В этом случае сила связи поверхности будет выполнять над точкой работу, отличную от нуля, и притом в точности равную работе, которая требуется, чтобы сохранить движение поверхности. С другой стороны, мы должны учесть внутреннее изменение тел, образующих неизменную связь, например, в том случае, когда точка движется по шероховатой поверхности; здесь силой, исходящей из поверхности, тоже совершается работа, но поверхность не остается неизменной, а будет нагреваться, наэлектризовываться и т. д. Если мы такие слу-



чая, требующие особого обсуждения, исключим из рассмотрения, то мы можем установить закон: работа всех сил связи равна нулю. При этом силы связи могут, конечно, производить работу над отдельными точками, как, например, натяжение растяжимой нити, т. е. они могут переносить энергию от одной точки к другой, не изменяя ее полной величины.

Таким образом для системы точек, подчиненной любым неизменным связям и, кроме того, не подверженной действию внешних сил, опять непосредственно следует приведенное выше уравнение сохранения энергии

$$L + U = \text{const}$$

совершенно независимо от неизменных связей.

Если система действием движущих сил выводится из состояния покоя, то, так как  $dL > 0$ , всегда  $dU < 0$ , т. е. тогда движение протекает всегда таким образом, что потенциальная энергия (для тяжелых тел, следовательно, высота центра тяжести) убывает. Отсюда сразу же вытекают условия равновесия системы. Ибо, очевидно, никакое движение не может возникнуть, если для всех возможных перемещений  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$  точек при неизменных связях  $\delta U \geq 0$ , так как в этом случае условие, необходимое для того чтобы движение началось, никоим образом не выполняется. Если неизменные связи таковы, что для всякого перемещения, совместимого со связями, одновременно допустимо и противоположное (что, например, не имеет места, когда нить совершенно нерастяжима, но не несжимаема), то последнее условие может быть выполнено только таким образом, что для всех допустимых перемещений  $\delta U = 0$ , или

$$\sum (X \delta x + Y \delta y + Z \delta z) = 0.$$

Следовательно, равновесие будет иметь место во всех состояниях системы, для которых  $U$  имеет максимум или минимум. Что первый случай соответствует абсолютно неустойчивому, а второй — абсолютно устойчивому равновесию, ясно непосредственно и уже было показано нами для случая одной точки (стр. 154).

Наконец, мы можем по примеру Даламбера свести любое состояние движения к состоянию равновесия, прибавляя

соответственно к компонентам движущих сил  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , действующих на каждую точку, величины

$$-m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad -m \frac{d^2y}{dt^2}, \quad -m \frac{d^2z}{dt^2}.$$

Тогда из закона возможных перемещений мы получим

$$\sum \left\{ \left( X - m \frac{d^2x}{dt^2} \right) \delta x + \left( Y - m \frac{d^2y}{dt^2} \right) \delta y + \left( Z - m \frac{d^2z}{dt^2} \right) \delta z \right\} = 0,$$

и отсюда мы можем вывести уравнения движения для каждой отдельной точки в различных формах по известным методам, развитым преимущественно Лагранжем и Гамильтоном. Так как эти исследования представляют главным образом математический интерес, то, не входя здесь в обсуждение их, мы все же, прежде чем перейти к дальнейшим задачам, добавим одно принципиальное замечание.

Энергия системы точек представляется нам состоящей из двух видов, из которых один вид — потенциал  $U$  движущих сил — зависит только от положения, а другой — сумма живых сил  $L$  — зависит только от скорости точек. В употребленной нами форме даны значения обоих видов энергии через их первичное выражение (стр. 112); они сохраняют поэтому свою силу и значение всюду, какие бы разнообразные неизменные связи ни были взяты. Но часто бывает выгодно при заданных связях применять для определения состояний системы вместо прямоугольных координат другие переменные, именно такие, которые друг от друга не зависят, что при прямоугольных координатах в общем случае не имеет места. Если мы имеем, например,  $n$  точек и, следовательно,  $3n$  координат и  $m$  неизменных связей, то часто удобнее свести движения системы к  $(3n - m)$  независимым друг от друга переменным, тем более, что это по большей части как раз такие независимые переменные, которые оказываются наиболее непосредственно доступными наблюдению. Тогда вследствие этого преобразования выражение видов энергии теряет свою первичную форму и принимает отчасти другие свойства. Если мы назовем независимые переменные, например, через  $p_1, p_2, \dots$  и примем, что значения всех  $p$  определены через значения всех  $x, y, z$ , то все прямоугольные координаты могут быть выражены через  $p$ , а скорости — через  $p$

и  $\frac{dp}{dt}$ . Благодаря этой замене получают значения  $U$  и  $L$ , выраженные через новые переменные. Но в то время как потенциальная энергия и здесь еще оказывается функцией одних только независимых переменных, кинетическая энергия изменяет свой характер. Хотя она остается полной однородной квадратичной функцией от производных этих переменных по времени, однако она содержит в общем случае не только квадраты, но и попарные произведения таких производных; кроме того, коэффициенты этой функции уже не являются постоянными, а зависят от переменных  $p$ . Следовательно, в этой форме кинетическая энергия перестает быть независимой от положения точек системы — обстоятельство, которое имеет фундаментальное значение для приложения механических принципов к теплоте и электричеству, как это, например, показывает выражение кинетической энергии системы гальванических токов, выведенное Максвеллом из общих механических уравнений; оно является полной однородной квадратичной функцией скоростей проводников и сил тока, а ее коэффициенты зависят от положения проводников.

Положения о механической энергии, развитые нами до сих пор, находят непосредственное применение только в том случае, когда число переменных, от которых зависит состояние материальной системы, конечно; но они нуждаются в дополнении, коль скоро это число возрастает до бесконечности, и следовательно, коль скоро рассматриваемые точки относятся, например, к непрерывно протяженному телу, как это в большинстве применений и имеет место. Можно было бы получить выше результаты перенести посредством соответствующего предельного перехода непосредственно на указанный случай; но гораздо проще и для применения принципа энергии более интересно подвергнуть поднятые здесь вопросы особому рассмотрению. Итак, мы займемся теперь непрерывным телом, безразлично, находится ли оно в твердом, жидком или газообразном агрегатном состоянии.

Рассмотрим сначала элемент тела и установим для него уравнение, выражающее принцип сохранения энергии. Изменение энергии элемента, соответствующее определенному изменению его состояния, равно значению механической работы или эквивалентного действия, которые нужно при-

ложить извне, чтобы каким-либо путем произвести это изменение состояния (стр. 144). Чтобы применить это уравнение к изменению, которое испытывает элемент в процессе любого движения тела за время  $dt$ , рассмотрим сначала те внешние действия, которые могут произвести это изменение состояния. Эти действия могут быть разложены на различные виды, влияния которых просто накладываются друг на друга. Прежде всего мы должны учесть работу сил, действующих извне на всю массу элемента, вроде тяжести, величина которой предполагается пропорциональной массе и известной с самого начала. Если мы обозначим через  $d\tau$  объем и через  $\mu$  плотность элемента, то выражение работы этих сил получим в виде

$$(X dx + Y dy + Z dz) \cdot \mu \cdot d\tau, \quad (1)$$

при этом  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  суть компоненты силы, действующей на единицу массы,  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  суть компоненты смещения, которое испытывает в течение времени  $dt$  материальная точка, обладающая в момент времени  $t$  координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Ради лучшего различения обозначений дифференциальных величин, мы возьмем здесь за правило (мы проведем эти обозначения и в последующем), пользоваться значком  $d$  для дифференциала, в котором в качестве независимых переменных предполагается время  $t$  и какие-либо три величины, характеризующие определенную материальную точку, а значок  $\partial$  будет относиться к дифференциалу, взятому по независимым переменным времени  $t$  и трем пространственным координатам (в данном случае  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Стало быть, например, производная  $\frac{d\mu}{dt}$  выражает изменение во времени, которое испытывает плотность в определенной движущейся материальной точке; производная же  $\frac{\partial\mu}{\partial t}$  выражает изменение во времени, которое испытывает плотность в определенном месте пространства. Обе величины связаны уравнением

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{\partial\mu}{\partial t} + \frac{\partial\mu}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\mu}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\mu}{\partial z} \frac{dz}{dt}.$$

Но работа сил, действующих на массу элемента на состоянии, в общем случае недостаточна, чтобы произвести изменение состояния элемента, она, например, никогда не

может вызвать вращение последнего; однако мы всегда можем вызвать изменение, о котором идет речь, — по крайней мере это относится к механическому состоянию, — полагая, что некоторые приложенные силы действуют со всех сторон на поверхность элемента. Величину произведенной ими работы легко подсчитать. Если мы представим себе объем элемента ко времени  $t$  в виде прямоугольного параллелепипеда, ребра которого параллельны координатным осям и имеют длину  $\partial x$ ,  $\partial y$ ,  $\partial z$ , то вся сумма работы, затраченной вне элемента благодаря действию этих сил давления, получается при сложении отдельных работ по шести боковым поверхностям параллелепипеда. При этом работа, произведенная на одной боковой поверхности, будет пропорциональна величине этой поверхности, так что, например, для боковой поверхности, проходящей через точку  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и параллельной плоскости  $YZ$ , получается значение работы

$$(X_x dx + Y_x dy + Z_x dz) \cdot \partial y \partial z.$$

$X_x$ ,  $Y_x$ ,  $Z_x$  обозначают компоненты силы, действующей извне на единицу площади этой поверхности, внутренняя нормаль которой представлена направлением, обозначенным индексом  $x$ . В этом смысле давление  $X_x$  в газе, например, всегда положительно; напротив, в проволоке, натянутой вдоль оси  $x$ , оно отрицательно.

На противоположной боковой поверхности, проходящей через точку  $x + \partial x$ ,  $y$ ,  $z$ , работа, произведенная за то же время, противоположна по знаку предыдущей работе, а по величине она отличается от нее только тем, что  $x$  переходит в  $x + \partial x$ , в то время как  $y$  и  $z$  остаются постоянными; так что мы можем обозначить сумму всей работы на рассматриваемой паре поверхностей в виде

$$-\frac{\partial}{\partial x}(X_x dx + Y_x dy + Z_x dz) \cdot \partial x \partial y \partial z. \quad (2)$$

Присоединим сюда еще работу на двух других парах боковых поверхностей:

$$\begin{aligned} &-\frac{\partial}{\partial y}(X_y dx + Y_y dy + Z_y dz) \cdot \partial x, \\ &-\frac{\partial}{\partial z}(X_z dx + Y_z dy + Z_z dz) \cdot \partial x. \end{aligned} \quad (2)$$

Сумма трех последних выражений вместе с выражением (1) представляет, следовательно, всю механическую работу, которая за время  $dt$  затрачивается вне элемента, и поэтому увеличивает энергию последнего.

Правда, опыт показывает, что вообще эта механическая работа не является единственным действием, которое происходит в окружении элемента; на самом деле добавляются еще и другие действия, которые возникают не за счет только что подсчитанной работы, и, следовательно, не включены в нее подобно, например, теплоте сжатия, а одновременно появляются в окружающей среде наряду с этой работой. Сюда прежде всего относятся явления теплопроводности и излучения, вызванные разностью температур, от которых мы можем здесь совершенно абстрагироваться, так как они происходят рядом и независимо от механических действий; дальше, разностями скоростей обуславливаются процессы трения и удара, благодаря которым энергия переносится не только в форме внешней механической работы, но и непосредственно в виде молекулярной работы и теплоты.

Если мы пока оставим совершенно вне внимания эти явления, и, следовательно, ограничимся последовательным идеальным упругих тел, то полученное выше выражение работы мы во всяком случае должны рассматривать как общую затрату действий, которая имела место вне элемента за время  $dt$ . Она измеряет одновременное изменение энергии элемента, к подсчету которого мы теперь и перейдем. Вся энергия элемента состоит из двух частей: внешней — кинетической, и внутренней — потенциальной энергии. Первая имеет величину

$$\frac{\mu \cdot \dot{v}^2}{2} \left\{ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right\}.$$

Последняя зависит только от внутреннего состояния элемента, которое обуславливается не только положением мельчайших частиц, но и температурой элемента. Но температура идеальных упругих тел, в которых не имеет места теплопроводность, со своей стороны зависит единственно и исключительно от механического изменения (деформации) элемента, так как этим определяется вообще все изменение состояния, включая и внешние действия. Поэтому мы можем рассматривать внутреннюю энергию элемента как

функцию только таких величин, которые определяют его мгновенную деформацию; число их при конечных, а равно и при бесконечно малых изменениях, как известно, всегда равно шести. Ибо всякое изменение элемента может рассматриваться как линейное изменение<sup>1</sup> и, следовательно, задается двенадцатью коэффициентами, но из них шесть соответствуют перемещению и вращению элемента и, следовательно, не оказывают никакого влияния на деформацию (т. е. на растяжение по трем взаимно перпендикулярным направлениям), для определения которой остаются шесть остальных. При этом смещения можно отсчитывать от совершенно произвольно выбранного нулевого состояния, — в случае твердых тел удобнее всего от их естественного состояния, а в случае газов — от любого состояния равномерного давления. Если, кроме того, мы положим, что внутренняя энергия пропорциональна массе, то получим для нее выражение в форме:  $U \cdot \mu \cdot d\tau$ . Само собой понятно, что  $U$  не представляет здесь первичного (стр. 112) выражения внутренней энергии единицы массы, и справедливо только для данного случая; оно относится конечно не к процессам, протекающим при постоянной температуре, а к процессам, которые в учении о теплоте называются адиабатическими. Более близкое определение формы функции  $U$  мы отложим еще немного, чтобы не вводить уже здесь различия между бесконечно малыми и конечными движениями.

Таким образом прирост энергии элемента за время  $dt$  составляет

$$d \left[ \frac{\mu \partial \tau}{2} \left\{ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right\} \right] + d [\mu \partial \tau \cdot U]$$

и, так как изменение во времени  $d(\mu \cdot \partial \tau) = 0$ , то он равен

$$\mu \cdot \partial \tau \left( \frac{d^2x}{dt^2} dx + \frac{d^2y}{dt^2} dy + \frac{d^2z}{dt^2} dz \right) + \mu \partial \tau \cdot dU.$$

Эта величина, приравненная сумме выражений (1) и (2), дает уравнение принципа сохранения энергии для элемента идеально упругого тела.

<sup>1</sup> G. Kirchhoff, *Mechanik*, 1877, p. 107.

Дальнейших заключений из самого принципа сохранения энергии нельзя сделать; тем не менее мы можем при помощи принципа суперпозиции действий, разлагая приведенное уравнение согласно некоторым простым и непосредственно ясным предположениям, получить столько уравнений, сколько это необходимо для определения движения. Прежде всего из формы выражения (2) ясно, что затраты работы, затраченной вне элемента, обуславливается двумя различными обстоятельствами, а именно характером изменения в пространстве 1) компонент давления  $X_x, Y_x, \dots$  2) компонент скорости  $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}$ ; если оба рода величин постоянны во всем пространстве, то вся работа исчезает. Предположим теперь, что каждое из этих обстоятельств особым образом влияет на изменение энергии; пусть изменение давления в пространстве влияет исключительно лишь на величину кинетической энергии, а изменение скорости исключительно на величину потенциальной энергии; следовательно, изменение живой силы может произойти только тогда, когда давление в пространстве распределено неравномерно, а деформация может наступить только тогда, когда скорость изменяется от места к месту, — выводы, справедливость которых бросается в глаза. Точно так же ясно, что работа производимая силами, действующими на расстоянии на всю массу элемента, меняет только кинетическую энергию.

Если мы разложим теперь уравнение энергии на части, соответственно обоим различным видам энергии, то опуская фактор  $\delta$ : мы получим, во-первых, выражение для кинетической энергии:

$$\begin{aligned} & \mu \left( \frac{d^2x}{dt^2} dx + \frac{d^2y}{dt^2} dy + \frac{d^2z}{dt^2} dz \right) = \\ & = (X dx + Y dy + Z dz) \cdot \mu - \left( \frac{\partial X_x}{\partial x} dx + \frac{\partial Y_x}{\partial x} dy + \frac{\partial Z_x}{\partial x} dz \right) - \\ & - \left( \frac{\partial X_y}{\partial y} dx + \frac{\partial Y_y}{\partial y} dy + \frac{\partial Z_y}{\partial y} dz \right) - \\ & - \left( \frac{\partial X_z}{\partial z} dx + \frac{\partial Y_z}{\partial z} dy + \frac{\partial Z_z}{\partial z} dz \right), \end{aligned} \quad (3)$$

а отсюда, разлагая дальше по трем осям координат и приравнявая друг другу коэффициенты при  $dx, dy, dz$  на обеих



сторонах уравнения, получим известные уравнения Пуассона:

$$\left. \begin{aligned} \mu \frac{d^2x}{dt^2} &= \mu X - \frac{\partial X_x}{\partial x} - \frac{\partial X_y}{\partial y} - \frac{\partial X_z}{\partial z}, \\ \mu \frac{d^2y}{dt^2} &= \mu Y - \frac{\partial Y_x}{\partial x} - \frac{\partial Y_y}{\partial y} - \frac{\partial Y_z}{\partial z}, \\ \mu \frac{d^2z}{dt^2} &= \mu Z - \frac{\partial Z_x}{\partial x} - \frac{\partial Z_y}{\partial y} - \frac{\partial Z_z}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С другой стороны, для внутренней энергии остается уравнение

$$\left. \begin{aligned} \mu \cdot dU &= - \left( X_x \cdot \frac{\partial dx}{\partial x} + Y_x \cdot \frac{\partial dy}{\partial x} + Z_x \cdot \frac{\partial dz}{\partial x} \right) - \\ &- \left( X_y \cdot \frac{\partial dx}{\partial y} + Y_y \cdot \frac{\partial dy}{\partial y} + Z_y \cdot \frac{\partial dz}{\partial y} \right) - \\ &- \left( X_z \cdot \frac{\partial dx}{\partial z} + Y_z \cdot \frac{\partial dy}{\partial z} + Z_z \cdot \frac{\partial dz}{\partial z} \right). \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

Внутренняя энергия единицы массы  $U$  является согласно предыдущим выводам функцией шести величин, определяющих деформацию элемента, в частности,  $U$  не зависит от вращения, которому элемент подвергается как целое. Но, как известно, выражения

$$\frac{\partial dz}{\partial y} - \frac{\partial dy}{\partial z}, \quad \frac{\partial dx}{\partial z} - \frac{\partial dz}{\partial x}, \quad \frac{\partial dy}{\partial x} - \frac{\partial dx}{\partial y}$$

представляют собой удвоенные компоненты бесконечно малого вращения, испытываемого элементом за время  $dt$ ; следовательно,  $dU$  может зависеть не от этих разностей, а только от соответствующих сумм, откуда сразу следует

$$Z_y = Y_z, \quad X_z = Z_x, \quad Y_x = X_y$$

и

$$\left. \begin{aligned} -\mu \cdot dU &= X_x \cdot \frac{\partial dx}{\partial x} + Y_y \cdot \frac{\partial dy}{\partial y} + Z_z \cdot \frac{\partial dz}{\partial z} + \\ &+ Z_y \cdot \left( \frac{\partial dz}{\partial y} + \frac{\partial dy}{\partial z} \right) + X_z \cdot \left( \frac{\partial dx}{\partial z} + \frac{\partial dz}{\partial x} \right) + \\ &+ Y_x \cdot \left( \frac{\partial dy}{\partial x} + \frac{\partial dx}{\partial y} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Конечно, эти рассуждения имеют одинаковое значение как для бесконечно малого элемента, так и для любой конечной части тела, так как прирост энергии всегда равен затраченной извне работе. К такому же результату

приходят непосредственно путем интегрирования уравнения энергии для элемента массы, распространенного на конечную массу. Если все тело предоставляется самому себе, то его полная энергия остается постоянной; если оно переходит в этом случае из состояния покоя в состояние движения, причем кинетическая энергия, стало быть, возрастает, то вследствие этого потенциальная энергия уменьшается, откуда (как и на стр. 154) следует положение, что минимум функции  $U$  соответствует устойчивому состоянию равновесия.

Общее конечное выражение  $U$  известно только для идеального газа и несжимаемой жидкости, поэтому мы ограничимся рассмотрением прежде всего очень малых движений, как они могут происходить в твердых телах, жидкостях и газах. В твердых телах это ограничение и без того дается необходимостью соблюдения пределов упругости.

Ради удобства введем новые обозначения переменных. Назовем через  $x, y, z$  координаты материальной точки в том ее состоянии, от которого отсчитываются смещения, а через  $u, v, w$  — сами эти малые смещения. Тогда через  $x, y, z$  будет определяться некоторая материальная точка; ко времени  $t$  она займет положение  $x + u, y + v, z + w$ . Следовательно, всюду в предыдущих уравнениях мы должны вместо  $x, y, z$  подставить  $x + u, y + v, z + w$ . Если  $u, v, w$  в конечных интервалах переменных имеют не очень много максимумов или минимумов, то и производные этих величин по месту и времени очень малы и ими можно пренебречь по сравнению с производными от  $x, y, z$ , если тело имеет конечное протяжение. Тогда из (5) мы получим, поскольку перемена порядка дифференцирования допустима:

$$-\mu \cdot dU = X_x \cdot d \frac{\partial u}{\partial x} + Y_y \cdot d \frac{\partial v}{\partial y} + Z_z \cdot d \frac{\partial w}{\partial z} + \\ + Z_y \cdot d \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + X_z \cdot d \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + Y_x \cdot d \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Ради сокращения положим

$$\frac{\partial u}{\partial x} = x_x, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = y_y, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = z_z, \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = z_y = y_z, \quad \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = z_x = x_z, \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = y_x = x_y.$$

Эти шесть величин определяют независимо друг от друга деформацию элемента, а следовательно, и значение функции  $U$ . Сравнивая обе стороны уравнения, получим

$$\begin{aligned} X_x &= -\mu \frac{\partial U}{\partial x_x}, & Y_y &= -\mu \frac{\partial U}{\partial y_y}, & Z_z &= -\mu \frac{\partial U}{\partial z_z}, \\ Z_y &= -\mu \frac{\partial U}{\partial z_y}, & X_z &= -\mu \frac{\partial U}{\partial x_z}, & Y_x &= -\mu \frac{\partial U}{\partial y_x}. \end{aligned}$$

Рассмотрим еще выражение для  $U$ . Поскольку переменные, от которых оно зависит, малы, оно может быть разложено по их степеням. Если мы ограничимся квадратными членами, то компоненты давления будут линейными функциями переменных. Имеет ли функция  $U$  однородную форму или нет, это зависит от выбора нулевого состояния ( $x_x = 0 = x_y = \dots$ ). Прежде всего  $U$  содержит произвольную аддитивную постоянную, которую мы положим равной нулю, так что для нулевого состояния  $U = 0$ . Если мы сделаем еще предположение, что нулевое состояние представляет состояние равновесия, в котором при равномерной плотности  $\mu_0$  всюду имеется равномерное давление  $p_0$  (например, атмосферное давление), действующее нормально к каждому элементу поверхности, то для этого состояния

$$X_x = Y_y = Z_z = p_0, \quad Z_y = X_z = Y_x = 0.$$

В этом случае линейная часть  $U$  сводится к выражению

$$-\frac{p_0}{\mu_0} (x_x + y_y + z_z).$$

Для твердых тел и капельных жидкостей  $p_0$  может быть также принято равным нулю.

Квадратичная часть  $U$  содержит в общем случае 21 постоянный коэффициент; число коэффициентов, однако, уменьшается при существовании симметрии в структуре тел, и для изотропного твердого тела сводится известным способом к двум, а для жидких и газообразных тел даже к одному. Если  $U$  известно, то из этого непосредственно получаются значения компонент давления, а тем самым и уравнения движения тела в целом. Фактор  $\mu$ , стоящий в выражениях компонент давления перед производной от  $U$  и в общепринятом изложении теории упругости обычно отсутствующий, при рассматриваемых здесь малых движениях может считаться постоянным, равным  $\mu_0$ , при движе-

ниях же конечных [уравнение (5)] нужно принять во внимание его изменения.

Особую важность имеют эти уравнения для вывода законов движения периодических колебаний проходящих или стоячих волн в упругих средах. Энергия каждого такого колебания состоит из двух частей — кинетической и потенциальной энергии, — сумма которых остается постоянной, поскольку нет никаких внешних действий. То обстоятельство, что две различных волны взаимно ослабляются и даже могут уничтожаться соответствующей интерференцией, не стоит ни в каком противоречии с принципом сохранения энергии. Если представить себе для примера два пучка плоских волн с одинаковым периодом колебания, одинаково направленных и с равными амплитудами, с разностью хода в полволны, то хотя результирующая волна уничтожается, все же нужно принять во внимание, что это явление интерференции представляет не самостоятельный процесс, а только одну сторону более всеобъемлющего процесса природы. Волны, исходящие из двух различных источников (звуковых источников), никогда не могут всюду встречаться в одинаковой фазе, а всегда будут в одних местах усиливаться, если они в других местах ослабляются. Понятие плоских волн является, вообще говоря, только абстракцией; если, например, обе взятые плоские волны являются частью двух шаровых волн, исходящих из бесконечно удаленных центров, то хотя разность их хода в конечном пространстве может быть постоянной, но зато в соответствующих бесконечно удаленных местах будет другое отношение, так что в целом никакая энергия не теряется, как это следует из наших уравнений.

Чтобы измерить энергию звукового источника, данных нашего специфического органа чувств недостаточно; последний, самое большее, в состоянии судить с большей или меньшей точностью о равенстве или различии энергии волн одного периода колебаний. Абсолютное измерение энергии волн возможно только путем превращения этой энергии в другую форму работы, или же путем получения ее из другой формы, в которой она доступна более точному методу измерения; сюда относится прежде всего превращение теплоты благодаря абсорбции.

Обратимся вновь к рассмотрению конечных движений (в жидких и газообразных средах), а следовательно, к урав-

непиям (4) и (5) и воспользуемся принятыми там обозначениями. Характерным свойством жидких и газообразных тел является то, что для них

$$\left. \begin{aligned} X_y = Y_z = Z_x = 0, \\ X_x = Y_y = Z_z = p, \end{aligned} \right\}$$

причем  $p$  является определенной функцией  $\mu$ , зависящей от природы среды.

Тем самым из уравнений (4) получаются общие гидродинамические уравнения движения:

$$\begin{aligned} \mu \frac{d^2 x}{dt^2} &= \mu X - \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \mu \frac{d^2 y}{dt^2} &= \mu Y - \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \mu \frac{d^2 z}{dt^2} &= \mu Z - \frac{\partial p}{\partial z}, \end{aligned}$$

при пользовании которыми можно брать по выбору либо дифференциальный знак  $\partial$  (эйлерова форма), либо знак  $d$  (лагранжева форма).

Дальше, для определения внутренней энергии  $U$  единицы массы получают из уравнений (5):

$$-\mu dU = p \cdot \left( \frac{\partial dx}{\partial x} + \frac{\partial dy}{\partial y} + \frac{\partial dz}{\partial z} \right).$$

Как показывает простое соображение кинематического порядка,

$$d\mu + \mu \left( \frac{\partial dx}{\partial x} + \frac{\partial dy}{\partial y} + \frac{\partial dz}{\partial z} \right) = 0.$$

Следовательно,

$$dU = \frac{p}{\mu^2} \cdot d\mu,$$

$$U = \int \frac{p}{\mu^2} d\mu = -\frac{p}{\mu} + \int \frac{dp}{\mu}$$

или, если положить

$$P = \int \frac{dp}{\mu},$$

$$U = P - \frac{p}{\mu}. \quad (6)$$

Аддитивная константа в  $P$  и  $U$  остается произвольной. Отсюда можно подсчитать внутреннюю энергию единицы массы, коль скоро известно  $p$  как функция от  $\mu$ .

Для идеального газа, например (теплопроводность исключается)

$$p = C \cdot \mu^k;$$

здесь  $C$  постоянно, а  $k$  представляет отношение обеих удельных теплоемкостей. Отсюда следует

$$P = \frac{Ck}{k-1} \cdot \mu^{k-1}, \quad U = \frac{C}{k-1} \cdot \mu^{k-1}.$$

Это значение внутренней энергии — такое же, как и выведенное из температуры (ср. выше стр. 115).

Для несжимаемой жидкости  $\mu = \text{const}$  (стало быть, существует неизменная связь в смысле, указанном на стр. 163), следовательно,  $P = \frac{p}{\mu}$  и  $U = 0$ . На самом деле в несжимаемой жидкости внутреннее состояние остается постоянным, следовательно, и работа не может быть произведена через изменение последнего.

В применении к конечной части массы жидкости мы получаем совершенно тот же закон, а именно, что в каком-либо состоянии вся внешняя и внутренняя энергия жидкости равна всей сумме работ, затраченных в окружающей среде, начиная с определенного момента времени, чтобы образовать это состояние; эта работа совершается, во-первых, силами, действующими на массу на расстоянии, и, во-вторых, силами давления, действующими на поверхностях.

В случае стационарного движения состояние в определенной точке пространства  $x, y, z$  не зависит от времени, так что все производные, взятые по  $dt$ , исчезают. В этом случае уравнение энергии, относящееся к отдельному элементу, допускает общую интеграцию по времени, которая дает

$$\frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right\} + U = \text{const} - V - \frac{p}{\mu},$$

т. е. вся внутренняя и внешняя энергия единицы массы равна уменьшению потенциальной функции объемных сил  $V$  (которая предполагается существующей) и давления,

разделенного на плотность. Несколько проще выглядит уравнение, если принять во внимание уравнение (6):

$$\frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right\} + P + V = \text{const.}$$

Заключая этим рассмотрение движения идеально упругих тел, мы среди более сложных явлений, которые могут быть объяснены только путем отклонения от простых предположений, сделанных на стр. 171 и следующих и трактовка которых по нашему методу становится еще более трудной, выделим по крайней мере одно, а именно явление трения при движении несжимаемой жидкости. Внутреннее трение в жидкости может быть рассмотрено с той же точки зрения, что и явления трения и неупругого удара в твердых телах.

Оба процесса обуславливаются появлением силы, зависящей только от относительного движения соприкасающихся масс и действие которой направлено всегда к выравниванию скоростей. При этом всегда теряется живая сила молярного движения, которая переходит либо в молекулярное движение (теплоту), либо в молекулярную работу. Этого представления достаточно, чтобы с помощью нашего принципа уже избранным выше путем вывести уравнения движения вязкой жидкости.

Прежде всего вычислим слова выражение работы, которая должна быть затрачена и которая фактически затрачивается вне элемента жидкости за время  $dt$ , чтобы произвести совершающееся за то же время изменение состояния элемента. Сюда относится прежде всего работа сил, действующих на расстоянии на массу элемента (тяжесть), выражение которой дано нами выше в уравнении (1):

$$(X dx + Y dy + Z dz) \cdot \mu dt. \quad (7)$$

Кроме того, нам остается еще рассмотреть действия, которые передаются через поверхность элемента в окружающую среду посредством давления жидкости в связи с своеобразными силами трения. Эти действия, вообще говоря, двойкой природы, аналогично трению и удару твердых тел. Во-первых, благодаря им на пограничных частях возникает сила, которая стремится изменить скорости (молярное действие); во-вторых, ими вызывается изменение внутренней энергии в окружающей среде (молекулярное действие),

которое в общем случае может быть связано с известной деформацией; в нашем же случае, поскольку жидкость считается несжимаемой, оно оказывается исключительно изменением температуры. Поэтому для внешних действий мы должны, во-первых, взять механическую работу, которая имеет точно такую же форму, как и общее выражение (2):

$$\left. \begin{aligned} & - \frac{\partial}{\partial x} (X_x dx + Y_x dy + Z_x dz) \cdot \partial\tau, \\ & - \frac{\partial}{\partial y} (X_y dx + Y_y dy + Z_y dz) \cdot \partial\tau, \\ & - \frac{\partial}{\partial z} (X_z dx + Y_z dy + Z_z dz) \cdot \partial\tau. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Что касается второй части внешних действий, образования теплоты, которая возникает вне элемента благодаря работе сил трения, действующих на поверхности, то эта величина во всяком случае пропорциональна величине боковых поверхностей элемента; однако, легко понять, что она по сравнению с остальными рассматриваемыми действиями бесконечно мала и именно на том основании, что теплота, возникающая в пограничном слое, во всяком случае исчезает по сравнению с теплотой, произведенной внутри элемента. В этом заключается здесь существенное отличие от явлений, сопровождающих трение твердых тел, так как в последних молекулярная работа совершается только лишь в одной плоскости трения, вследствие чего она является величиной того же порядка, как и молекулярная работа, переносимая трением.

Мы нашли бы, таким образом, для внешних действий выражение точно такой же формы, как и в случае движения упругих тел. Но иначе дело обстоит с энергией элемента: она состоит, во-первых, из живой силы, прирост которой за элемент времени дается выражением

$$\left( \frac{d^2x}{dt^2} dx + \frac{d^2y}{dt^2} dy + \frac{d^2z}{dt^2} dz \right) \cdot \mu \partial\tau, \quad (9)$$

и, кроме того, поскольку жидкость несжимаема, еще и из теплоты, произведенной внутренним трением. Нагревание, происходящее за время  $dt$ , вообще говоря, зависит от скорости элемента, однако, не от самих компонент скорости  $\frac{dx}{dt}$ ,  $\frac{dy}{dt}$ ,  $\frac{dz}{dt}$  (короче:  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), так как при равно-



мерной скорости вообще нет никакого трения, а от их пространственных изменений, следовательно, от девяти производных от величин  $u$ ,  $v$ ,  $w$  по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Но так как величины

$$\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

обозначают только вращение элемента в целом, а вовсе не деформацию, то и нагревание зависит только от шести величин

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Если они достаточно малы, то при разложении выражения нагревания по степеням переменных мы можем ограничиться членами второй степени. Абсолютный член равен нулю; ибо если переменные равны нулю, то трение, а тем самым и нагревание исчезает; дальше, так как последнее является существенно положительным, то отпадают и линейные члены. В остальном же форма выражения, т. е. величины коэффициентов, должны быть независимыми от выбора системы координат. Это условие, совершенно так же как и при определении внутренней энергии элемента изотропного упругого твердого тела (стр. 174), приводит к выражению, зависящему только от двух коэффициентов. Если, наконец, к этому прибавляется еще условие несжимаемости

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

то величина вызванного трением нагревания элемента жидкости за время  $dt$  сводится к механически измеренному значению

$$2k \cdot \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\} \cdot dt \cdot d\tau. \quad (10)$$

Это единственное выражение, удовлетворяющее поставленным условиям; оно содержит только единственный неопре-

деленный коэффициент  $k$ , коэффициент трения жидкости; он является положительным.

Отсюда мы получаем уравнение принципа сохранения энергии, если сумму выражений (9) и (10), — прирост энергии элемента — положим равной сумме выражений (7) и (8) — величине затраченных извне действий. Дальше, разложением этого уравнения на два уравнения, из которых одно относится к внешней энергии (живая сила), а другое — к внутренней (теплота), получим прежде всего опять общее уравнение движения (4), и, кроме того, уравнение, соответствующее уравнению (4а):

$$2k \cdot \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\} =$$

$$= - \left( X_x \frac{\partial u}{\partial x} + Y_x \frac{\partial v}{\partial x} + Z_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \left( X_y \frac{\partial u}{\partial y} + Y_y \frac{\partial v}{\partial y} + Z_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) +$$

$$+ Z_y \frac{\partial w}{\partial y} - \left( X_z \frac{\partial u}{\partial z} + Y_z \frac{\partial v}{\partial z} + Z_z \frac{\partial w}{\partial z} \right).$$

Для идеальной жидкости мы имеем бы

$$k = 0, \quad X_x = Y_y = Z_z = p, \quad X_y = Y_x = \dots = 0,$$

благодаря чему, вследствие условия несжимаемости, уравнение будет в самом деле удовлетворено. Если же  $k$  отлично от нуля, то к значениям компонент давления добавляются еще члены, которые, очевидно, определяются из уравнения следующим наиболее простым способом:

$$X_x = p - 2k \frac{\partial u}{\partial x}, \quad Y_y = p - 2k \frac{\partial v}{\partial y}, \quad Z_z = p - 2k \frac{\partial w}{\partial z},$$

$$Y_x = Z_y = -k \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad Z_x = X_z = -k \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right),$$

$$X_y = Y_x = -k \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right),$$

откуда по известному методу<sup>1</sup> получаются значения сил давления, действующих в несжимаемой вязкой жидкости. Тем самым все движение определено.

В наших выводах о механической энергии мы старались показать, что законы механики, включая и пьютоновы ак-

<sup>1</sup> G. Kirchhoff, *Mechanik*, 1877, p. 370.

сиомы, вполне могут быть выведены из принципа сохранения энергии, хотя и не путем строгой дедукции, — ибо механика так же, как и всякая другая часть физики, не может быть построена чисто дедуктивным путем, — а путем многократного использования известных индуктивных заключений, которые все в основном базируются на одной и той же мысли. Именно, когда мы устанавливали для точки или элемента массы уравнение, измеряющее изменение его энергии посредством эквивалента внешних действий, то мы разлагали это уравнение на два или несколько отдельных уравнений, чем каждый раз выражался закон, что полная энергия распадается на сумму отдельных видов энергии, которые изменяются независимо друг от друга, каждое в меру внешних действий, непосредственно соответствующих их своеобразию. Так, кинетическая энергия точки распадается на три отдельных вида, соответствующих трем измерениям пространства. Они никогда не могут превращаться непосредственно друг в друга, а каждый вид изменяется независимо от других благодаря лишь непосредственно ему соответствующей внешней работе. Совершенно так же обстоит дело с разложением энергии на внешнюю (молярную энергию) и внутреннюю (молекулярную энергию). Но каким образом всякий раз произвести разделение энергии, — этому в каждом отдельном случае должен научить опыт. Этот принцип суперпозиции играет во всей физике, как мы уже неоднократно подчеркивали, чрезвычайно важную роль; без него все явления смешались бы друг с другом, и совершенно невозможно было бы установить зависимость отдельных явлений друг от друга; ибо если каждое действие нарушается другим, то естественно прекращается возможность познать причинную связь. Мы никогда не минуем этого принципа, подчеркиваем ли мы его отчетливо или же используем молчаливо; он содержится в законе инерции совершенно так же, как и в законе параллелограмма сил или в законе действия и противодействия.

Но что является существенным преимуществом избранного здесь метода, так это, с одной стороны, наглядность, с которой выступает связь между выведенными положениями и вид их зависимости от принципа сохранения энергии: какие из них следует рассматривать как следствия самого принципа, и какие — в качестве установленных особым независимым от этого принципа опытом; с другой сто-

роны, очень важно то обстоятельство, что благодаря избранному методу все части физики могут рассматриваться с совершенно одинаковой и единой точки зрения. Энергия является понятием, которое находит свою меру и свое значение в каждом явлении природы, а принцип суперпозиции также управляет всеми действиями природы; поэтому мы можем быть уверены, что если когда-либо будет открыто еще неизвестное начало, то принцип наложения действий, хотя и не мог бы служить для вывода законов действия новой силы из принципа сохранения энергии, но все же опосредствовал бы постановке таких вопросов, разрешение которых при помощи опыта дало бы единственное средство вскрыть законы мира явлений.

## 2. Тепловая и химическая энергия

Наиболее непосредственное и огромное влияние открытие принципа энергии имело на состояние учения о теплоте, поэтому даже в наши дни кое-кто склонен рассматривать эту часть физики, как настоящее поле приложения принципа, хотя для этого нет никаких оснований, кроме упомянутых исторических фактов. Можно сказать, что тем развитием и успехами, которые достигла в новейшее время теория теплоты, она обязана вовсе не главным образом принципу энергии, хотя первый толчок к преобразованию и исходил от него; совершенно в такой же мере и, может быть, еще в большей она обязана применению совершенно независимого от него принципа Карно, который Клаузиус ввел в теорию теплоты в качестве второго основного начала, и, кроме того, обоснованному Джоулем, Крэнигом и Клаузиусом механическому представлению о теплоте, также совершенно независимому от принципа энергии. Согласно последнему предположению, до сих пор хорошо оправдывающемуся, тепловая энергия сводится к механической, только что нами рассмотренной, и поэтому теория теплоты составляет часть механики. Наша задача здесь должна заключаться в том, чтобы развить следствия принципа энергии, используя лишь непосредственные опытные факты, совершенно независимо от механического взгляда на теплоту и, следовательно, от всякой гипотезы о молекулярной структуре тел, а равным образом независимо и от принципа Карно. Даже при этих ограничивающих предположе-

ниях поле приложения принципа представляется еще достаточно широким.

В последующем мы снова воспользуемся законом, что прирост энергии материальной системы равен соответствующей вне системы затраченной работе или ее эквиваленту. Внешние действия могут состоять как в механических, так и в тепловых изменениях; в последнем случае мы прежде всего должны установить путем специального рассмотрения механический эквивалент такого изменения. На стр. 97 и следующих показано, что работа какого-либо изменения равна механической работе, которая либо вызывает это изменение, либо же производится им, безразлично каким бы путем это ни произошло. Правда, мы не можем теплоту превратить в работу без других побочных изменений (куда относится также увеличение объема), но работа, наоборот, полностью превращается в теплоту, и опыт показал, что нагревание всегда может производиться путем затраты работы, величина которой находится в постоянном отношении к количеству произведенной теплоты независимо от вещества, температуры и т. д.; следовательно, всякое количество теплоты (точнее, всякое нагревание) эквивалентно определенному количеству работы. Этот факт может быть установлен только путем опыта, и только на основе этого специального опыта становится возможным применение принципа сохранения энергии к тепловым процессам. Эквивалентность теплоты и работы ни в коем случае не может быть выведена из принципа сохранения энергии; последний оставляет место еще и для совершенно других представлений, как, например, представлений Карно, согласно которым механическая работа эквивалентна не количеству теплоты, а произведению из количества теплоты и температуры (ср. стр. 24 и сл.). Число, дающее отношение количества теплоты к эквивалентной ему работе, как известно, было установлено Джоулем (стр. 60); в метрической системе и будучи отнесено к одному градусу ртутного термометра Цельсия оно равно 423,55; чтобы получить отсюда механический эквивалент теплоты в абсолютной CGS системе мер, нужно это число умножить прежде всего на 1,007, чтобы привести к газовому термометру, затем на 100, чтобы привести к сантиметрам, наконец, на  $981$  — ускорение силы тяжести. Тогда получается число  $4,19 \cdot 10^7$ , которое до сих пор может считаться наиболее верным зна-

чением механического эквивалента теплоты в системе CGS. Из многочисленных измерений этой константы, произведенных самыми разнообразными способами, упомянем еще, кроме уже названных в первом разделе (стр. 87 и сл.), измерения Роуленда (Rowland), Гриффитса (Griffiths), а также Каллендара (Callendar) и Бэрнса (Barnes)<sup>1</sup>.

Если в качестве единицы теплоты устанавливается то количество теплоты, которое эквивалентно единице работы, то механический эквивалент равен единице, и выражения соответственно упрощаются; эту систему мер мы используем в последующем.

После того как мы оказались в состоянии измерить работу внешних действий, соответствующую определенному изменению состояния рассматриваемой материальной системы, мы можем подсчитать обусловленное этим изменение энергии системы. Однако и здесь, опять так же как это было выше при исследовании упругих сил, возможно на основании принципа суперпозиции разложение уравнения энергии на два отдельных уравнения и тем самым упрощение задачи. Во-первых, энергия системы распадается на две части: молярную энергию (живая сила движения масс, потенциал тяжести и т. д.) и молекулярную энергию (теплота, химическая энергия); с другой стороны, всегда можно и внешние действия разложить на две части, одна из которых охватывает все те действия, которые влияют на молярную энергию, а другая — те действия, которые изменяют молекулярную энергию. Полагая теперь изменения обоих видов энергии в отдельности равными соответствующим им действиям, получают два уравнения, из которых только одно представляет здесь специальный интерес, так как другое относится к механике и, стало быть, к предыдущему отделу. Что это разделение, как правило, может быть выполнено с большей или меньшей легкостью, ясно из того, что молярная энергия известна уже с самого начала; нужно только представить себе, что весь процесс разлагается на части соответственно молярному и молекулярному движениям. Так, теплота, подводимая извне путем теплопроводности или излучения, действует непосредственно только на молекулярную энергию, в то время как механи-

---

<sup>1</sup> Ср. таблицу Шееля в физико-химических таблицах Ландольта-Бернштейна,

ческие внешние действия, как давление, удар, трение, вообще говоря, вызывают как молярные, так и молекулярные изменения<sup>1</sup>.

Мы поэтому наперед упростим задачу и рассмотрим исключительно такие состояния конечной или бесконечно малой системы тел, в которых молярная энергия вовсе не привносится во внимание. Тогда, если мы обозначим молекулярную энергию через  $U$ , теплоту, исчезающую в окружающей среде в течение любого конечного или бесконечно малого изменения состояния и переходящую путем проводимости или излучения в систему, обозначим через  $Q$ , наконец, механическую работу, затраченную при этом в среде, через  $A$ , то работа затраченных внешних действий будет  $Q + A$ , следовательно,

$$U' - U = Q + A, \quad (1)$$

где  $U$  и  $U'$  обозначают значения энергии системы в начальном и конечном состояниях рассматриваемого процесса. Способ перехода безразличен. Если взглянуть в механическую природу теплоты глубже, то можно разделить  $U$  на актуальную энергию (свободная теплота) и потенциальную энергию (внутренняя работа, химическая энергия); но так как ни один из обоих этих видов энергии не связан с особыми внешними действиями, то в последующем мы совершенно не будем пользоваться этим разделением.

Соответственно природе изменения состояния можно из вышеприведенного уравнения вывести различные положения о тепловом или химическом поведении системы. Если мы сначала предположим, что состояние тела определяется одной переменной, то  $U$  во всяком случае может быть выражено как функция этой одной переменной. В общем случае выбор независимых переменных будет произвольным; поэтому  $U$  может выступать в различных формах; однако все они представляют одну и ту же величину. Если мы имеем, например, жидкость или газ, бесконечно мало нагреваемый при постоянном объеме посредством притока теплоты извне, то  $Q = c_v \cdot dT$ ,  $A = 0$ , причем  $c_v$  обозначает теплоемкость при постоянном объеме,  $T$  — абсолютную темпе-

<sup>1</sup> Прим. 1908. Однако, нужно напомнить о намеченных выше на стр. 129 границах делимости молярной и молекулярной энергий.

ратуру, измеренную газовым термометром. (Правда, точное определение температуры возможно только с помощью принципа Карно, но в достаточно больших гравницах оно, как показывает опыт, совпадает с определением, полученным на основе явления расширения воздуха.) Из уравнения (1) следует

$$dU = c_v \cdot dT.$$

Если мы, сохраняя принятые условия, перейдем теперь к конечному процессу, то мы можем рассматривать  $T$ , как единственную независимую переменную; следовательно, для энергии системы получаем

$$U = \int c_v \cdot dT,$$

причем  $c_v$  зависит, конечно, только от  $T$ . Но совершенно так же мы можем ввести в качестве независимой переменной и другую величину, определенную через  $T$  и  $v$ , например, давление  $p$ , и выразить через нее как  $T$ , так и  $U$ ; ибо так как  $v$  постоянно, то значение  $p$  определяет все состояние. Если мы предположим теперь более общий случай, когда с изменением состояния изменяется и объем  $v$ , однако, так, что между объемом и температурой существует определенное соотношение  $f(v, T) = 0$ , (как, например, при адиабатическом изменении состояния), причем  $f$  означает какую-либо функцию двух переменных, то опять-таки состояние зависит только от одной переменной: либо от  $T$ , либо от  $v$ , либо от  $p$ , так как из трех величин одна определяется двумя другими. Благодаря этому энергия  $U$  может быть по желанию представлена как функция  $T$ ,  $v$  или  $p$ , и поскольку ограничиваются введенным условием, — совершенно безразлично, какую из этих трех различных форм рассматривают как первичное выражение энергии и владут в основу рассмотрения.

Но как только мы переходим к процессу, течение которого определяется двумя независимыми переменными, то произвол в представлении  $U$  уменьшается на одну степень. Если тело изменяет свою температуру на  $dT$  и одновременно независимо от этого изменяет объем на  $dv$ , чем определяется и изменение давления на  $dp$ , то во всяком случае и его энергия изменяется на определенную величину  $dU$ . Этим самым дается тогда, как всегда, и механический эквивалент



соответствующих внешних действий — суммы затраченной работы и подведенной теплоты: при этом одна из этих двух величин, например, внешняя работа, в общем случае еще произвольна, другая же величина будет этим определена. Предположим, что внешняя работа заключается в преодолении давления  $p$ ; тогда она равна

$$A = -p \cdot dv,$$

следовательно, согласно (1)

$$dU = Q - p \cdot dv.$$

Подведенная теплота может быть выражена через удельные теплоемкости: через теплоемкость при постоянном объеме  $c_v$  и через теплоемкость при постоянном давлении  $c_p$ ; при этом предполагается, что тело благодаря подводу теплоты вначале совершает переход при постоянном объеме от давления  $p$  к давлению  $p + dp$  и затем переходит при постоянном давлении  $p + dp$  от объема  $v$  к объему  $v + dv$ . Используя теперь ради удобства в качестве переменных  $v$  и  $p$ , мы получим при помощи несложного вычисления следующее выражение для всей подведенной ивие теплоты:

$$Q = c_v \cdot \frac{\partial T}{\partial p} \cdot dp + c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial v} \cdot dv,$$

и, стало быть, для изменения энергии:

$$dU = c_v \cdot \frac{\partial T}{\partial p} \cdot dp + \left( c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial v} - p \right) \cdot dv, \quad (2)$$

откуда сразу же следует

$$\frac{\partial}{\partial v} \left( c_v \cdot \frac{\partial T}{\partial p} \right) = \frac{\partial}{\partial p} \left( c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial v} - p \right).$$

Если в частном случае  $c_v$  и  $c_p$  постоянны, как в идеальных газах, то из этого уравнения получается

$$(c_p - c_v) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial p \cdot \partial v} = 1.$$

В самом деле тогда

$$T = \frac{p \cdot v}{c_p - c_v}.$$

Дальше, из (2) тогда получается

$$U = \frac{c_v}{c_p - c_v} \cdot p v$$

или

$$U = c_v \cdot T.$$

Каждая из обеих этих форм энергии равноправна до тех пор, пока верно соотношение, выражающее объединенный закон Мариотта и Гей-Люссака (Бойля и Чарльза). Тогда внутреннюю энергию газа вполне можно по желанию представить либо как упругость, — благодаря чему стремление газа к расширению принимает тот же характер, как и стремление покоящейся системы отталкивающих друг друга точек, — либо так же, как живую силу, причем сила давления образуется в этом случае благодаря ударам свободно летящих во все стороны молекул. Но если закон Гей-Люссака-Мариотта понимать не как заранее существующее тождество, — а как это имеет место в механической теории теплоты, — в качестве особого свойства установившегося стационарного состояния, поскольку давление  $p$  вообще определено только тогда, когда скорости молекул элемента газа определенным образом выровнялись по величине и направлению, тогда первичная единственно верная форма энергии не может уже зависеть от давления, и тогда ее необходимо свести к выражению  $c_v T$ , которого можно придерживаться при соответствующем механическом определении температуры при всех обстоятельствах.

Совершенно то же самое справедливо для энергии любого тела, состояние которого зависит от двух переменных. Так как уравнение состояния всегда дает соотношение между давлением, объемом и температурой, то  $U$  всегда может быть выражено через любые две из этих трех величин. Но при механической толковании в качестве первичной всегда выступает та форма, которая относится к независимым переменным  $v$  и  $T$ , ибо давление представляет собой понятие, выведенное из этих обеих величин только при особых обстоятельствах.

Внутреннее состояние находящегося в упругом равновесии каким-либо образом деформированного однородного изотропного тела зависит от семи переменных, а именно от шести величин деформации (стр. 170), и от температуры.

В силу этого и внутренняя энергия тела представляется как функция этих семи величин, и только при особых условиях (например, если, как принято было на стр. 170, деформация происходит, когда приток теплоты невозможен) число переменных может быть уменьшено. Применение принципа сохранения энергии и здесь происходит согласно уравнению (1). Внешняя работа  $A$  может быть легко вычислена с помощью формул теории упругости, между тем как подведенная извне теплота  $Q$  не может быть непосредственно выражена через известные, зависящие от природы тела, константы так как знания теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме для этого недостаточно. Вообще, чем сложнее свойства тела, подлежащего исследованию, тем от большего числа переменных зависит значение энергии и тем менее произвольным будет первичное выражение, которое вообще может быть установлено для энергии тела.

Особого внимания заслуживает еще известный и до сих пор еще не рассмотренный вид молекулярной энергии тела, который в противоположность до сих пор рассмотренным видам обозначается как поверхностная энергия<sup>1</sup>. Опыт показывает, что энергия тела, вообще говоря, зависит не только от его внутреннего состояния, но еще, кроме того, и от формы его поверхности, так что к рассмотренному до сих пор выражению энергии надо добавить еще один член, зависящий от свойств поверхности и от природы смежных тел. Правда, этот вид энергии по своему существу вовсе не отличается от обсуждавшихся до сих пор видов; нельзя думать, что при соприкосновении двух тел внутреннее состояние тела является одним и тем же во всех местах, вплоть до поверхности, а затем в соседней среде происходит внезапный скачок; наоборот, всегда имеют дело с некоторым пограничным слоем, очень незначительной, но конечной величины, в котором действуют силы, зависящие одновременно от свойств обеих сред; внутреннюю энергию этого слоя как раз обычно и принимают за поверхностную энергию. Этим разъяснением одновременно решается и вопрос, можно ли вообще причислить величину поверхностной энергии к энергии тела, так как она зависит не только от состояния самого тела, но и от состояния окружающей

---

<sup>1</sup> Cp. J. Cl. Maxwell, Theory of heat. Нем. перевод F. Neesen, Braunschw. 1878, p. 318.

ее среды. Если пограничный слой причисляют именно к рассматриваемой системе, то поверхностная энергия включается в выражение энергии системы, в других же случаях она исключается отсюда, и тогда все поверхностные изменения принимаются в расчет в качестве внешних действий.

Поверхностная энергия играет важнейшую роль в телах, поверхность которых легко изменяется, следовательно, в жидкостях. Энергия, отнесенная к отдельному элементу поверхности, будет, конечно, пропорциональна величине этого элемента; поэтому энергия конечной части поверхности в том случае, если во всех ее точках состояние пограничного слоя одинаково, равна величине этой части поверхности, помноженной на константу, зависящую от свойств обеих граничащих друг с другом сред, их температуры и т. д. Из этого положения легко получаются условия капиллярного равновесия. Если благодаря деятельности сил, действующих на поверхности, возникает движение, то поверхностная энергия превращается в живую силу молярного движения, и при этом поверхностная энергия всегда должна уменьшаться, потому что живая сила необходимо возрастает от нуля. Если, следовательно, в некотором состоянии покоя поверхностная энергия является минимумом, то не может наступить никакого движения, ибо поверхностная энергия уже не может уменьшаться, т. е. в этом случае господствует устойчивое равновесие. Таким же путем решаются и задачи, в которых принимают во внимание помимо поверхностных сил еще и тяжесть.

Перейдем теперь дальше к рассмотрению процессов, состоящих не только из физических изменений участвующих тел, но также и из химических действий; сюда относятся как химические соединения в тесном смысле слова, следовательно, реакции в неизменных весовых отношениях, так и химические смеси, куда причисляются и процессы абсорбции, растворения и т. д. В каждом таком случае применение принципа энергии производится согласно уравнению (1); прирост энергии всей изменяющейся системы, происходящий благодаря данному процессу, равен сумме подводенной извне теплоты и затраченной извне работы. В очень многих случаях величина последней исчезающе мала сравнительно с остальными принимаемыми здесь в расчет видами энергии, она исчезает совсем, если действие протекает при постоянном общем объеме, но часто ею можно пренебречь

и при других реакциях, например, при реакциях, происходящих при постоянном давлении (атмосферное давление), а именно в случае твердых и жидких тел, которые, как правило, настолько мало изменяют свой объем, что произведенная извне работа отпадает. Даже когда речь идет о таком расширении газов, какое бывает при явлениях сгорания или взрыва, внешняя работа составляет часто настолько незначительную часть остальных участвующих в обмене количеств энергии, что этой работой и при более значительных изменениях объема можно пренебречь. Если ее опустить, то уравнение сводится к

$$U' - U = Q.$$

Следовательно, одна лишь теплота, подведенная извне, равна приросту энергии, поэтому ее величина зависит только от начального и конечного состояний системы, но не от характера перехода. Этим самым выражается давно известный закон (стр. 30), что теплота, произведенная рядом химических реакций, не зависит от порядка, в котором происходят отдельные реакции. Конечно, это положение верно только тогда, когда либо совершенно отвлекаются от внешней работы, как это имело место здесь, либо же когда специально заботятся о том, чтобы ее величина не зависела от последовательности изменений состояния, как это бывает при реакциях, протекающих при постоянном давлении.

Так как теплота  $Q$  может непосредственно наблюдаться<sup>1</sup>, то становится возможным измерение изменения энергии при помощи установленного уравнения. Выдающимся по своей важности является случай, когда система по окончании реакции принимает опять начальную температуру и начальное давление. Тогда очень часто  $Q$  является отрицательным (экзотермическая реакция), т. е. система передает теплоту вовне, и в этом смысле величина  $Q$  обозначается как теплота реакции, тепловой эффект, теплота соединения и т. д. — понятие, которое, как известно, нужно отделять от понятия химического сродства (Affinität).

При образовании величины  $U$  энергии химически сложного тела в каком-нибудь состоянии нужно еще принять во внимание особое обстоятельство. Повятно, что эта вели-

<sup>1</sup> Имеется в виду возможность непосредственного излучения подводимой теплоты. *Пер.*

чина всегда должна относиться к тому же самому нулевому состоянию (стр. 104), которое хотя первоначально и может быть выбрано произвольным, но потом, при переходе к другим химически отличным состояниям, должно быть сохранено. Так как энергия, соответствующая любому состоянию, всегда определяется работой внешних действий, которые появляются при переходе в нулевое состояние, то лучше всего выбрать нулевое состояние так, чтобы переход к нему был как можно легче осуществим. Поэтому поскольку речь идет только о физических изменениях тела, то в качестве нулевого состояния тела нужно брать наиболее удобное состояние того же самого тела; тогда переход в нулевое состояние является лишь чисто физическим процессом. Но если рассматриваются и химические изменения, то, вообще говоря, этот переход должен быть связан с химическими действиями. Если, положим, дело идет о полном или частичном разложении некоторого количества воды, то для отыскания значения энергии лучше всего взять в качестве нулевого состояния соответствующие количества кислорода и водорода, совершенно отделенные друг от друга, скажем, при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  и давлении в 1 атмосферу. Тогда легко определить энергию в каждом состоянии системы при любом произшедшем разложении; ибо для какого-либо разделенного количества кислорода или водорода она дается физическим переходом к  $0^{\circ}\text{C}$  и к 1 атмосфере давления, между тем как для некоторого количества воды надо еще добавить и химическое разложение на оба элемента. (Что вместо этого для определения энергии может быть использован и обратный процесс — образование воды, — выведено выше, на стр. 104.)

Отсюда ясно, что поскольку дело идет об изменениях в химических соединениях тел, то к физической энергии тела прибавляется еще одна аддитивная константа — химическая энергия, которая всегда равна и противоположна количеству теплоты образования тела из его составных частей. При переходе в нулевое состояние (разложение тела) химическая энергия появляется тогда в качестве положительной или отрицательной теплоты. Это справедливо также и для растворов, смесей и т. д.; так, энергию какого-нибудь раствора соли надо положить равной отрицательной теплоте растворения соли. Эта величина достаточна, если ограничиваются рассмотрением изменения процентного содержания

раствора; но если рассматривать также и процессы в которых соль или растворитель сами разлагаются, то в выражении энергии прибавляется еще один член, равный количеству теплоты, освобождающейся при разложении соответствующего вещества на его дальнейшие составные части.

При применении принципа сохранения энергии к химическим процессам, конечно, так же, как и в других случаях, вовсе не необходимо объединять все тела, участвующие в реакции, в одну систему (основную систему, стр. 122), наоборот, можно совершенно произвольно выделить определенный конечный или бесконечно малый материальный комплекс и исследовать изменение его энергии. Оно, как всегда, равно механическому эквиваленту внешних действий, затрачиваемых при данном изменении состояния. В остальном для практического определения химической энергии с успехом пользуются положениями, подробно разобранными в предыдущем разделе (стр. 103 и сл.).

### 3. Электрическая и магнитная энергия

Из всех выводов, которые принцип сохранения энергии позволяет сделать о законах действия различных существующих в природе сил, особо выдающийся интерес имеют те выводы, которые относятся к электричеству и магнетизму; ибо ни в какой другой области физики не выявляется так чисто и непосредственно плодотворность этого принципа. Что касается механики, то она уже задолго до открытия общего принципа сохранения энергии достигла высокой степени своего развития, и, следовательно, (для применения принципа) в учении о явлениях движения не остается ничего другого, как задеть числом доказать его согласие с законами, уже достаточно твердо установленными другими путями, и таким образом проверить один известный закон другим известным же. Иначе обстоит дело уже в учении о теплоте: здесь вновь открытый принцип властно вторгся в эту область, содействуя развитию представлений о природе тепловых процессов; однако и в этой области исследования он недолго оставался единственным признаком и надежным руководителем. С тех пор как обнаружилась высокая плодотворность механического понимания теплоты, при рассмотрении тепловых явлений гораздо более склонны, как правило, исходить из

представления о чисто механических процессах, чем возвращаться к общему, независимому от этих представлений, принципу сохранения энергии; ибо непосредственно ясно, что если исходить только из этого принципа, то это далеко не удовлетворяет той требующейся для достижения ясных воззрений специализации идей, которая как раз и делает механическое представление таким полноценным.

Совсем иначе обстоит дело в области электричества и магнетизма. Встречающееся здесь многообразие явлений до сих пор еще никак не удалось охватить единым пониманием, т. е. свести к исчерпывающей аналогии с явлениями, которые известны нам с других сторон и с которыми мы свыклись, например, не удалось свести их к аналогии с явлениями механической природы, и пожалуй сомнительно, будет ли это когда-либо достигнуто; во всяком случае, беря на себя задачу отыскать законы электричества, мы видим, что не обладаем заранее никаким другим доступным вспомогательным средством исследования, кроме как единственно и исключительно принципом сохранения энергии. Следовательно, здесь наиболее ясно выявляется значение принципа: освобожденный от всяких побочных представлений, он образует единственный надежный исходный пункт исследования, указывая руководящий ход идей, который является существенной предпосылкой для рационального использования результатов эксперимента и наблюдения.

Правда, здесь нужно сейчас же добавить, что применяя принцип к отдельным определенным процессам, мы часто в интересах наиболее удобного и ясного способа выражения неизбежно вынуждены пользоваться терминологией, напоминающей специальные представления о способе действия электричества; например, мы говорим об электричестве, как если бы оно было особым веществом, которое движется, является источником сил и т. д. Но эти выражения ни в коем случае не заключают какого-либо суждения о природе электрических действий, наоборот, последнее остается совершенно открытым; мы можем пока оставить совершенно не разрешенным даже такой теперь уже достаточно близкий к окончательному разрешению вопрос, действуют ли электричество и магнетизм непосредственно на расстоянии или, наоборот, их действия передаются через соответствующие изменения промежуточной среды, хотя мы, чтобы последовательно рассмотреть вопрос, неоднократно будем



вынуждены класть в основу обозначений тот или другой способ представлений.

Все электрические и магнитные действия могут быть разделены на две большие группы, сообразно тому, вызывают ли они движение самой весомой материи (проводников тока, намагниченных тел и т. д.), или же они вызывают изменения внутреннего электрического или магнитного состояния тел. Мы обозначим оба эти вида действий так, как их обычно называют, именно как пондеромоторные (механические) и как индукционные (электродвижущие, магнитодвижущие) действия; при всяком применении принципа мы будем учитывать оба вида.

Займемся прежде всего процессами, которые вызываются действиями некоторых количеств электричества, покоящихся в телах. Предположим, что некоторое число материальных точек, каждая из которых заряжена определенным количеством электричества, находится в изолирующей среде (воздух); тогда действия зарядов будут только пондеромоторными, и материальные точки под влиянием последних начнут двигаться, причем мы просто примем, что среда не оказывает никакого заметного сопротивления движению. Правда, ради полноты мы должны принять здесь еще другое предположение, сохраняющееся и впоследствии, а именно, что относительные скорости движущихся тел всегда исчезающе малы сравнительно с так называемой критической скоростью (300 000 км/сек); это предположение необходимо, потому что иначе к электростатическим действиям добавляются известные электродинамические действия, которые мы учтем только позднее. В этом случае наиболее удобное представление всего хода движения сводится к тому, что заряды действуют друг на друга на расстоянии, одноименные отталкиваются, разноименные притягиваются, по общему гравитационному закону Ньютона.

Если никакие внешние действия на систему не оказываются, то энергия системы остается постоянной; но эта энергия состоит из двух частей: из живой силы движущихся точек и потенциала действующих сил (стр. 162). Этот потенциал

$$P = \sum \frac{e \cdot e'}{r},$$

где  $e$  и  $e'$  (с соответствующим значком) означают электри-

ческие заряды двух точек (каждая комбинация берется один раз),  $r$  — их взаимное расстояние (всегда положительное), рассматривается в этом случае как электростатическая энергия  $U$ . Ее изменение за некоторое время равно и противоположно работе, произведенной за это же время электропндеромоторными силами.

Из выражения для  $P$  легко видеть, что электрический потенциал многих систем равен сумме потенциалов систем на самих себя, увеличенной на сумму потенциалов попарно взятых систем друг на друга.

Так как  $P$ , как энергия, обладает размерностью работы, то вышеприведенным уравнением определяется одновременно электростатическая мера электричества; тем самым решается и вопрос, который подчас слышится из уст школьника: какой же будет механический эквивалент электричества, точнее, электрического потенциала? Механический эквивалент равен единице и притом как в электростатической, так и в магнитной мере, хотя для последней предыдущее уравнение не верно.

Если выделить из всего количества точек ограниченное число их и рассматривать их как основную систему (стр. 122), то энергия этой системы изменяется при возникающем движении на величину произведенных внешних действий. Последними является здесь, очевидно, работа пндеромоторных сил, которая совершается точками, расположенными извне, над точками системы.

Несколько иначе протекает процесс, если носителем электричества являются не отдельные точки, а протяженные проводники, ибо в этом случае к пндеромоторным действиям добавляются еще индукционные. Мы можем принять, что смещение зарядов, необходимое для установления равновесия внутри проводника, протекает с бесконечно большой скоростью по сравнению с движением проводников; тогда каждому расположению системы проводников соответствует определенное расположение электричества в проводниках, которое дается условием, что значение электрической потенциальной функции

$$\varphi = \sum \frac{e}{r}$$

для всех точек одного и того же проводника постоянно, а в окружающем изоляторе (воздух) повсюду имеет место

условие:  $\Delta\varphi = 0$ . Этим, а так же заданными величинами зарядов проводников определяется функция  $\varphi$ , а электрическая плотность (плотность электричества) на поверхности проводника имеет значение:  $-\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial n}$ , где  $n$  означает нормаль, направленную внутрь изолятора.

Предположим, что проводники движутся под действием сил, исходящих из их зарядов, и рассмотрим изменение, которое претерпевает за элемент времени потенциал всей системы на самое себя:

$$P = \sum \frac{ee'}{r}$$

или так же

$$P = \frac{1}{2} \cdot \sum e \cdot \varphi.$$

С этой целью мы разложим все бесконечно малое изменение, испытываемое системой, на две части: 1) проводники изменяют свое положение в пространстве, в то время как заряды в них покоятся, 2) сами проводники покоятся, а заряды в них принимают новое положение равновесия, обусловленное изменившимся расположением. Благодаря каждому из обоих этих процессов изменяется  $P$ , а именно легко видеть, что первое изменение является как и в предыдущем случае ни чем иным, как отрицательной работой пондеромоторных сил, между тем как второе изменение по сравнению с первым бесконечно мало. Ибо новое распределение электричества отличается от первоначального тем, что к каждой первоначально имевшейся электрической частице  $e$  добавляется бесконечно малая (положительная или отрицательная) частичка  $\delta e$ , а обусловленное этим изменение всего электрического потенциала, согласно изложенному на стр. 196, равно потенциалу всех вновь добавленных зарядов  $\delta e$  на весь первоначально имевшийся заряд  $e$ . (Потенциал вновь добавленных зарядов на самих себя является малой величиной высшего порядка малости.) Следовательно, искомое изменение потенциала составляет  $\sum (\varphi \delta e)$ , а эта сумма для каждого отдельного проводника равна нулю, так как  $\varphi$  имеет в нем всюду одно и то же значение, а общий заряд его  $\sum e$  остается неизменным.

Стало быть, изменение со временем потенциала  $\delta P$  полностью дается отрицательной ponderomotorной работой, т. е. уменьшением живой силы движущихся проводников; следовательно, сумма потенциала и живой силы является постоянной. Так как, с другой стороны, общая энергия системы остается постоянной, то отсюда следует, что к кинетической энергии добавляется еще электростатическая  $U$ , которая и в этом случае опять измеряется положительным электрическим потенциалом  $P$ . Поэтому рассматриваемые здесь действия, вызываемые процессом движения, состоят только во взаимном превращении электростатической и кинетической энергии. Работа индукционных действий, совершающихся в проводниках, не является конечной величиной; поэтому эти действия не приводят к образованию теплоты, ибо хотя, вообще говоря, через сечение проводника и протекает за конечное время конечное количество электричества, по все же произведенная при этом работа тока бесконечно мала, потому что здесь нет конечного падения потенциала.

Тепловое действие происходит только тогда, когда два проводника настолько сближаются, что их заряды могут взаимно выравниваться. В этом случае наступает быстрое уменьшение электростатической энергии, но она превращается не в живую силу движения проводников, а в молекулярную энергию.

Если за счет электростатической энергии образуется теплота (как при разряде электрических батарей), то тем самым количество теплоты разряда непосредственно дается в механической мере. Правда, превращение электричества в теплоту следует не мгновенно, а как правило, совершаются более или менее сложные электродинамические процессы (колебательный разряд); тем не менее в конечном состоянии все виды энергии опять сводятся к тепловой и электростатической энергии.

Перейдем теперь к тому случаю, когда кроме проводников в системе имеются еще и диэлектрики. Ради простоты предположим в последующем, что диэлектрики, как и проводники, сначала неподвижны, и примем, что только последние заряжены некоторыми заданными количествами электричества; оба вида тел могут свободно двигаться в совершенно изолирующей неполярizable среде. Строение диэлектрика мы определяем по Фарадею так, что

в абсолютно изолирующей среде помещено очень большое число очень малых заряженных телец, в которых под влиянием электрических сил распределение электричества индуцируется непосредственно так же, как и в конечных проводниках. Математически это предположение ведет к теории диэлектрической поляризации, обоснованной Пуассоном, согласно которой диэлектрический момент в какой-нибудь точке диэлектрика, отнесенный к единице объема, одинаков по направлению и пропорционален по величине электрической силе, действующей в этой точке, и, кроме того, пропорционален постоянной, зависящей от свойств диэлектрика. Компоненты этого момента удовлетворяют, следовательно, уравнениям

$$\lambda = -k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \mu = -k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \nu = -k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (1)$$

Чем большие значения принимает положительная константа  $k$ , тем более приближается поведение диэлектрика к поведению проводника. Для  $k$ , равного нулю, поляризация исчезает совершенно.

Так как благодаря положенному выше в основу представлению диэлектрическая поляризация полностью сводится к явлениям, которые происходят в идеальных проводниках, то для применения принципа сохранения энергии мы можем непосредственно перенести на этот случай результаты, полученные на стр. 198. Величина электростатической энергии  $U$  дается, следовательно, и здесь электрическим потенциалом всей системы на самое себя, т. е. выражением

$$P = \frac{1}{2} \sum e \cdot \varphi.$$

Так как в каждом малом проводящем тельце, из которых состоит диэлектрик,  $\varphi$  обладает постоянным значением, и, кроме того, соответствующая ему совокупная величина заряда равна нулю, то эта сумма исчезает для всех количеств электричества  $e$ , находящихся в диэлектриках и должна быть распространена только на те проводники, которые обладают конечными зарядами. Наличие диэлектрика влияет на величину электростатической энергии лишь постольку, поскольку благодаря этому модифицируется потенциальная функция  $\varphi$ .

То характерное, что есть в способе действия диэлектрика, становится гораздо нагляднее и вычисление делается более доступным благодаря известному положению, что все физические действия зарядов, находящихся в диэлектрике, могут быть полностью замещены действиями простого электрического слоя, расположенного на поверхности диэлектрика и имеющего в любой ее точке плотность

$$-\left(\lambda \cos (nx) + \mu \cos (ny) + \nu \cos (nz)\right) = k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n},$$

где  $n$  означает направление нормали, восстановленной внутрь диэлектрика. Общая масса этого слоя равна нулю.

Но если, следовательно, потенциальная функция  $\varphi$  с ее производными сохраняет то же самое значение во всех точках пространства внутри и вне диэлектрика, когда распределение электричества в диэлектрике замещается указанным воображаемым поверхностным слоем, то нужно, однако, иметь в виду, что это не имеет места для значения потенциала всех находящихся в системе зарядов на самих себя. Ибо общее выражение этого потенциала

$$P = \frac{1}{2} \sum e \cdot \varphi$$

дает здесь значение, отличающееся от приведенного выше, как это сразу становится ясно, если рассмотреть ту часть суммы, которая происходит от зарядов  $e$  воображаемого поверхностного слоя. Именно, так как на поверхности диэлектрика потенциальная функция  $\varphi$  не всюду постоянна, то соответствующая сумма, вообще говоря, будет принимать значения, отличные от нуля, в то время как в вышерассмотренном случае сумма, относящаяся к зарядам  $e$  диэлектрика, была равна нулю. С другой же стороны, для зарядов  $e$ , содержащихся в проводниках, мы получаем те же самые числа, как и выше; поэтому результирующее значение потенциала  $P$  будет здесь во всяком случае другим по сравнению с рассмотренным до сих пор случаем. Из сказанного вытекает, что коль скоро распределение зарядов в диэлектриках замещается физически ему эквивалентным поверхностным слоем, то необходимо отличать потенциал  $P$  и энергию  $U$ ; ибо последняя величина соответственно своему физическому значению в обоих случаях остается конечно одной и той же.

Это различие получается и непосредственно, если мы воспользуемся высказанным уже ранее соображением,

чтобы вывести энергию из потенциала. Если мы рассмотрим бесконечно малое изменение  $\delta P$ , испытываемое за элемент, времени потенциалом  $P$  при движении проводников и диэлектриков, то мы можем представить его разложенным на две части: 1) изменение потенциала в результате пространственных смещений проводников и диэлектриков, в то время как заряды в них находятся в покое; 2) изменение потенциала в результате нового распределения зарядов в телах, в то время как сами тела фиксированы в пространстве. Первое изменение представляет отрицательную работу подеромоторных сил, следовательно, равно уменьшению живой силы  $L$ ; второе же равно потенциалу всех вновь добавленных зарядов  $\delta e$  на первоначально имевшиеся заряды  $e$  (стр. 198), следовательно, равно сумме  $\sum \varphi \delta e$ ; стало быть, имеем

$$\delta P = -\delta L + \sum (\varphi \delta e),$$

или, так как общая энергия  $L + U = \text{const}$ , то

$$\delta P = \delta U + \sum (\varphi \delta e).$$

Второй член с правой стороны уравнения теперь ни в коем случае не равен нулю, если электрическое состояние диэлектриков замещается соответствующим поверхностным слоем, ибо  $\varphi$  на поверхности диэлектрика непостоянно; но этот член можно с помощью соотношений, установленных для равновесия зарядов, представить в виде полного дифференциала определенной функции состояния; используя уравнения (1) и преобразовав выражение в пространственный интеграл, получим путем интегрирования по времени

$$P = U - \int \frac{d\tau}{2k} \cdot (\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2), \quad (2)$$

причем интеграл должен быть распространен на элементы объема  $d\tau$  всех диэлектриков. Конечно, разность между величинами  $P$  и  $U$  является той же самой, как и уже установленная выше. Для  $k = \infty$  (диэлектрик абсолютно поляризуем) энергия и потенциал переходят друг в друга, так же, как и для  $k = 0$  (диэлектрик абсолютно неполяризуем), ибо в этом случае  $\lambda, \mu, \nu$  будут равны нулю.

Таким же образом может быть рассмотрен и случай, когда диэлектрики заранее заряжены определенным коли-

чеством электричества, которое подводится к ним извне, безразлично — к поверхности или внутрь диэлектрика. Здесь принцип наложения действий просто ведет к цели. Если, далее, диэлектрики представляют собой не идеально твердые тела, а жидкие или твердые деформируемые тела, которые могут непрерывно залолзать пространство, находящееся между проводниками, то с одинаковым успехом можно провести те же рассуждения; причем нужно еще принять во внимание, что диэлектрическая константа  $k$  в общем случае меняется вместе с изменением состояния деформации диэлектрического вещества<sup>1</sup>.

Предыдущие соображения, относящиеся к электростатике, мы можем охватить следующим положением: во всех случаях, когда под взаимным воздействием двинутся электрически заряженные проводники и диэлектрики, то поскольку для распределения зарядов имеют место уравнения, установленные выше (стр. 200), электрическая энергия всегда превращается только в живую силу молярного движения; а именно, величина электрической энергии  $U$  дается величиной потенциала  $P$  всех зарядов, находящихся в системе, на самих себя, с видоизменением для случая, данного уравнением (2), когда распределение зарядов в диэлектрике замещается соответствующим поверхностным слоем. Этот закоп имеет исключение только тогда, когда два проводника приближаются друг к другу настолько, что происходит выравнивание их зарядов (разряд); в этом случае возникает молекулярная энергия.

Понятно, что посредством уравнений связи, которые могут иметь место в случае электрического равновесия, выражение электрической энергии может быть получено в очень многообразных формах, различающихся, однако, только в отношении математического удобства, а с физической точки зрения совершенно равноценных, поскольку сохраняют силу эти уравнения связи. Поэтому для применения принципа сохранения энергии совершенно безразлично, составляют ли выражение энергии, исходя из предположения непосредственного дальнего действия и соответственно этому попарно комбинируя электрические частицы, удаленные

---

<sup>1</sup> H. v. Helmholtz, Über die auf das Innere magnetisch oder dielektrisch polarisierter Körper wirkenden Kräfte. Wied. Ann. 13, p. 385, 1861. Wiss. Abh. I, p. 798.



друг от друга на конечное расстояние, или же выражение энергии образуют, предполагая чисто молекулярные действия и соответственно суммируя по всем элементам пространства, находящимся в состоянии электрического напряжения; численное значение энергии в обоих случаях одно и то же. Решение в пользу какой-либо одной из названных теорий может получиться только из наблюдения явлений, при которых приняты выше условия для электрического равновесия не существуют; к этому вопросу мы вернемся позднее.

Обратимся теперь к более детальному исследованию случая, который мы выше должны были исключить из рассмотрения, а именно к контакту нескольких проводников. Представим себе сначала два твердых металлических проводника, соприкасающиеся по любой поверхности, находящиеся в изолирующей неполяризуемой среде, которая содержит еще и другие наэлектризованные проводники, и заряженные определенным количеством электричества. Как показывает опыт, электричество на обоих проводниках распределяется так, что их потенциальная функция  $\varphi$  испытывает на пограничной поверхности проводников скачок, зависящий только от молекулярного состояния внутри проводников, согласно предыдущему, потенциальная функция постоянна. Из этого с необходимостью вытекает, что на пограничной поверхности находится двойной электрический слой, состоящий из двух простых очень близко друг к другу лежащих электрических слоев противоположной и равной плотности, так как в значениях производных от  $\varphi$  никакой прерывности нет (все они равны нулю). Если обозначить произведение плотности положительного слоя на расстояние между слоями (момент двойного слоя) через  $\omega$ , то при переходе через двойной слой в положительном направлении, т. е. от отрицательного к положительному слою,  $\varphi$  возрастает на  $4\pi \cdot \omega = \varphi_0$  (электрическое напряжение). Этим самым дается средство измерить  $\omega$  электростатическим путем, между тем как величины обоих факторов, из которых образуется  $\omega$ , могут быть оценены только приблизительно. Гельмгольц показал, что образование такого двойного слоя может быть сведено к воздействию на заряды особых сил притяжения весомых молекул вещества, из которых состоит проводник; тогда

электрическое напряжение представляется как работа, производимая этими силами, когда единица положительного электричества проходит сквозь слой в вышеуказанном направлении. Если присоединить еще условия, которым должны удовлетворять потенциальная функция  $\varphi$  и ее производные внутри проводника, во внешнем пространстве и на границах, а равно и те условия, которые даются количеством зарядов пары проводников и остальных проводников, то для каждого расположения системы проводников в пространстве возможно только единственное значение  $\varphi$  и тем самым только единственное распределение зарядов.

Построим вновь выражение электростатической энергии  $U$  системы и, следовательно, потенциал всех зарядов на самих себя  $P = \frac{1}{2} \sum e \cdot \varphi$  и исследуем изменение, которое испытывает эта величина за элемент времени, когда оба неизменно связанных проводника движутся под влиянием электрических сил одновременно с другими проводниками, находящимися в электрическом поле. Это изменение  $\delta P$  и здесь опять может быть мыслимо как последовательно произведенное: 1) смещением проводников, в то время как заряды в них покоятся (отрицательная поперомоторная работа, или уменьшение живой силы; —  $\delta L$ ); 2) изменением распределения электричества в покоящихся проводниках, причем можно представлять себе, что к каждой электрической частице  $e$  системы добавляются положительное или отрицательное  $\delta e$ . Тогда соответствующее изменение всего потенциала равно потенциалу зарядов  $\delta e$  на первоначально имевшиеся заряды  $e$  (стр. 198), следовательно, равно  $\sum (\varphi \delta e)$ . Для изолированного проводника эта сумма равна нулю, так как  $\varphi$  в нем постоянна, для пары же неизменно связанных проводников, как легко видеть, она равна  $\varphi_0 \cdot \delta E$ , где  $\delta E$  означает все количество положительного электричества, переходящее в рассматриваемое время от одного металла к другому; при этом ради простоты мы считаем подвижными только положительные заряды. Следовательно, получаем

$$\delta U = \delta P = -\delta L + \varphi_0 \cdot \delta E$$

или

$$\delta U + \delta L - \varphi_0 \cdot \delta E = 0.$$

Отсюда явствует важный результат, а именно, что в рас-

смаатриваемом случае сумма живой силы  $L$  и электростатической энергии  $U$  ни в коем случае не постоянна; напротив того, обе величины могут даже одновременно или возрастать или уменьшаться. Поэтому и сумма их представляет собой не полную энергию системы, а здесь должен играть роль еще третий вид энергии, изменение которого непосредственно компенсирует изменения обоих первых видов. Величина ее непосредственно известна, она является произведением электрического напряжения металла на количество положительного электричества, переходящего от отрицательного металла к положительному; но в какой физической форме следует представить себе этот вид энергии, — никакого окончательного решения до сих пор не дано.

Здесь мы рассмотрим главным образом две точки зрения, которые дальше следует разобрать. Согласно одной точке зрения, кроме обычной электростатической энергии, происходящей от взаимодействия зарядов друг с другом, имеется еще особый вид энергии потенциального характера, которая имеет своим источником действия, оказываемые весомыми молекулами на заряды, поэтому ее можно было бы обозначать как „электромолекулярную“ энергию. Согласно этому взгляду, каждая электрическая частица  $e$  всегда обладает особой электромолекулярной энергией; ее величина равна произведению количества электричества  $e$  на постоянную  $u$ , зависящую от молекулярных свойств (вещества, температуры) проводника, в котором в данное время частица находится, но не от его электрического состояния. Ясно, что это предположение непосредственно достигает своей цели; ибо поскольку количество электричества  $\delta E$  движется между молекулами одного и того же проводника, его электромолекулярная энергия  $u \cdot \delta E$  — величина совершенно определенная, остается постоянной; но поскольку оно переходит в другой проводник, то величина его изменяется на  $(u' - u) \cdot \delta E$ . Следовательно, чтобы получить изменение энергии, требуемое принципом сохранения энергии, нужно только положить разность  $u' - u$  равной и противоположной известному электрическому напряжению  $\varphi_0$ ; аддитивная константа в значении  $u$  остается произвольной. Тогда принцип удовлетворяется тем, что сумма живых сил, электростатической энергии и электромолекулярной энергии во всей рассматриваемой системе является величиной, не зависящей от времени.

Так как изложенная гипотеза принимает величину электрического напряжения  $\varphi_0$  двух проводников, как разность двух величин  $u$  и  $u'$ , зависящих только от природы проводников, то, очевидно, она одновременно имеет и то преимущество, что из нее с необходимостью получается закон вольтова напряжения; но на том же основании она отказывается служить для объяснения в случае проводников второго класса.

В противоположность этой гипотезе существует другое воззрение, исходящее из того, что такого особого вида энергии, как вышеописанная молекулярная энергия, вовсе не существует, но что установленный выше дефицит энергии покрывается соответствующим изменением обычной молекулярной (тепловой, химической) энергии. Отсюда сумма живой силы, электростатической энергии и молекулярной энергии должна была бы быть неизменной, и таким образом в исследованном выше процессе движения в связи с доказанным изменением известных видов энергии должна быть обнаружена молекулярная (здесь тепловая) энергия, по величине равная  $-\varphi_0 \cdot \delta E$ . В более общей формулировке это требование гласит так: всякий раз, когда некоторое количество положительного электричества проходит в положительном направлении сквозь электрический двойной слой, молекулярная энергия уменьшается на величину, равную произведению количества электричества и разности потенциалов, обусловленной двойным слоем. Однако переход зарядов из одного проводника в другой сам по себе, т. е. без совершения работы силами электрического происхождения, не привел бы к какому-либо изменению энергии.

Экспериментальная проверка этого положения действительно приводит к явлениям, которые можно считать его подтверждением; для проводников первого класса существуют открытые Пельтье (Peltier) тепловые действия в месте спая двух металлов, правда, непосредственно воспринимаемые только тогда, когда через поверхность соприкосновения проходят значительные количества электричества в виде дующегося некоторое время тока. Действительно, произведенная или поглощенная теплота пропорциональна по величине и знаку протекающему количеству электричества; однако вычисленная отсюда величина электрического напряжения вовсе не совпадает с числами, которые

дают вольтовы напряжения, измеренные непосредственно электростатическим путем; последние, вообще говоря, гораздо больше. Однако здесь еще можно выйти из положения, допустив, что при так называемом вольтовом напряжении мы имеем дело вовсе не с действительной контактной разностью потенциалов обоих металлов, но что присутствие минимальных количеств газа или пара значительно изменяют свойства поверхности, а тем самым и величину напряжения, как это может быть доказано и фактически<sup>1</sup>.

Чтобы идти дальше вполне уверенно, лучше всего по крайней мере временно объединить обе эти гипотезы, разделив рассматриваемую величину энергии —  $\varphi_0 \cdot \delta E$  неопределенными частями на электромолекулярную и на обычную молекулярную энергию; тогда будущему опыту остается еще установить, совсем ли исчезает одна из этих частей, вернее установить, в каком отношении оба вида энергии находятся в указанной величине. Таким образом согласно этому толкованию теплота, проявляющаяся при прохождении количества электричества  $\delta E$  от одного металла к другому, вообще составляет величину

$$-\varphi_0 \delta E - (u' - u) \delta E.$$

Согласно сказанному, применение принципа сохранения энергии к случаю, являющемуся исходной точкой нашего рассмотрения, представляется следующим образом: если несколько электростатически заряженных металлических проводников одинаковой температуры, отчасти изолированных, отчасти в любом количестве электрически соединенных друг с другом (обобщение на несколько проводников получается непосредственно), движутся в электрическом поле, то обмен происходит не только между живой силой движения и электростатической энергией, но, кроме того, в местах контактов проводников появляются тепловые действия, а именно в соответствии с только что установленным правилом. (При этом выделенную теплоту можно сразу же отвести в окружающую среду и, таким образом, сохранить неизменной температуру, а тем самым и электри-

<sup>1</sup> По этому поводу ср. J. Cl. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, Oxford 1873, I, § 249, R. Clausius, Die mechanische Behandlung der Elektrizität, Braunschweig 1878, p. 172 и сл.

ческое напряжение в месте контакта.) По сравнению с этой теплотой Пельтье джоулева теплота, возникающая в проводнике благодаря протекающему электричеству (см. выше стр. 199), исчезающе мала. При этом замечательно, что это превращение живой силы и электричества в теплоту является обратным процессом; из этого получаются интересные заключения для принципа Карно-Клаузиуса, но они не входят в рамки нашего настоящего исследования.

Если в системе соприкасающихся проводников первого и второго класса невозможно удовлетворение всех условий, необходимых для равновесия, как это, вообще говоря, имеет место тогда, когда несколько связанных между собой проводников соединены путем соприкосновения первого с последним в одну замкнутую цепь, — то получается поток электричества, который продолжается до тех пор, пока благодаря химическим, тепловым или также механическим изменениям не создается возможность для удовлетворения всех условий равновесия. Мы займемся сначала только случаем, когда ток стал постоянным, т. е. когда все величины, относящиеся к электрическому состоянию системы, как сила тока, электростатические заряды проводника, потенциальная функция и т. д. в данном месте независимы от времени. Тогда во всяком случае и электрические виды энергии (электростатическая, электродинамическая энергии) являются постоянными и поэтому могут совсем не приниматься во внимание; при этом в цепи могут протекать любые тепловые и химические процессы.

Сначала мы применим принцип сохранения энергии, рассматривая совокупность проводников, составляющих гальваническую цепь, в качестве единой системы; так как она совершенно не подчиняется никаким внешним действиям, то ее полная энергия постоянна и тем самым сумма тепловой и химической энергии, согласно выше сказанному, сама по себе остается неизменной. Отсюда следует известный закон: тепловые действия, произведенные постоянным гальваническим током, эквивалентны химическим действиям.

Если благодаря этому закону мы узнаем соотношение величин тех действий, которые производятся током во всей цепи, то это еще не дает нам никаких знаний об изменениях, происходящих в отдельных частях цепи; по все же мы могли бы узнать и это, если мы приложим принцип сохранения энергии не ко всей системе провод-

ников, а только к какой-нибудь ее части, рассматриваемой в качестве основной системы. Возьмем сначала уже рассмотренный нами случай: место соприкосновения двух проводников. Выделим из всей системы проводников часть ее таким образом: место соприкосновения проводников мысленно ограничим какими-нибудь поверхностями раздела, притом в такой близости к месту контакта, чтобы в основном можно было рассматривать только процессы, протекающие в самом пограничном слое. Ограниченный таким образом материальный комплекс, состоящий из двух тонких металлических пластинок, рассматривается в качестве основной системы: он будет испытывать благодаря проходящему току некоторые воздействия извне, которые изменяют его энергию, а именно механическая работа внешних действий, как всегда, дает прирост энергии. Правда, эта величина не известна нам непосредственно, но мы могли бы ее вычислить обратным способом, так как при помощи изложенных раньше исследований мы в состоянии установить изменение энергии рассматриваемой системы. Электрическая энергия основной системы остается по предположению неизменной, химическая — тоже, а тепловая, согласно основному закону, изложенному на стр. 208, изменяется за единицу времени на  $-\varphi_0 \cdot i - (u' - u) \cdot i$ , где  $i$  означает силу тока,  $\varphi_0$  — разность потенциалов проводников, — положительную, если  $\varphi$  возрастает в направлении тока, — наконец,  $u$  и  $u'$  означают константы, определенные на стр. 206, причем ток идет от  $u$  к  $u'$ . А так как изменение энергии известно, то отсюда следует, что величина механического эквивалента произведенных извне действий выражается равным образом через  $-\varphi_0 \cdot i - (u' - u) \cdot i$ .

Перейдем теперь к другой основной системе, в качестве которой выберем совокупность проводников, остающуюся от всего замкнутого круга, когда из него исключают только что рассмотренную часть, состоящую из пластинок. В этой новой системе прирост молекулярной (тепловой и химической) энергии, а стало быть, и работа внешних действий за единицу времени равна  $+\varphi_0 \cdot i + (u' - u) \cdot i$ , ибо во всей замкнутой цепи молекулярная энергия остается неизменной. Здесь ток течет, естественно, от  $u'$  к  $u$ .

Отсюда мы видим, что работа внешних действий зависит только, во-первых, от силы тока и затем от разности значений потенциальной функции  $\varphi$  и разности молекулярной

энергии  $u$  на обеих границах системы. Поэтому мы можем высказать следующий закон: „В ограниченной металлическими пластинками, а в остальном произвольно выделенной части системы проводников, по которой протекает постоянный ток и в которой происходят любые молекулярные изменения, молекулярная (тепловая и химическая) энергия увеличивается в единицу времени на величину, которая дается произведением из силы тока на разность значений потенциальной функции  $\varphi$  плюс разность электромолекулярной энергии  $u$  в местах втекания и вытекания тока“. Если металл, по которому ток втекает, идентичен с металлом, по которому он вытекает, то член, происходящий от электромолекулярной энергии, исчезает. Это имеет место совершенно независимо от того, делает ли и какие именно делает скачки потенциальная функция внутри системы.

Этот закон, который может быть точно так же легко выражен для любых разветвлений тока и для пространственно изменяющейся плотности тока в объемных проводниках, делает возможным ряд важных применений.

Рассмотрим, например, действия, совершающиеся внутри металлического проводника, имея в виду только бесконечно малую часть бесконечно тонкой нити тока сечением  $q$  и длиной  $dn$ . Если обозначить через  $j$  плотность тока, то сила тока, протекающего через часть проводника, составляет  $j \cdot q$ , а уменьшение потенциальной функции  $-\frac{\partial \varphi}{\partial n} dn$ , следовательно, изменение молекулярной энергии (здесь образование теплоты):  $-j \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cdot q \cdot dn$ . А так как согласно исследованиям Джоуля выделяемая теплота выражается через  $j^2 w \cdot q \cdot dn$ , откуда определяется  $w$  — удельное сопротивление проводника, то из сравнения обоих выражений следует

$$jw = -\frac{\partial \varphi}{\partial n},$$

т. е. закон Ома для проводников первого класса. Если внутри проводника существует разность температур, то тем самым вообще вызывается и электрическое напряжение; в этом случае, следовательно, изменяется и падение потенциала, а стало быть, и выделяемая в проводнике теплота (эффект Томсона).

Явления Пельтье были рассмотрены уже выше; поэтому



обратимся теперь еще к процессам в проводниках второго класса. Если между двумя электродами одного и того же металла идет постоянный ток через электролит, в котором он вызывает какие-либо произвольные действия, то согласно положенному закону прирост молекулярной энергии внутри и на поверхности электролита равен произведению из силы тока на разность потенциалов положительного и отрицательного электродов, независимо от того совершаются ли внутри электролита местные химические реакции или нет. Но если, таким образом, легко найти изменение всей молекулярной энергии электролита, то значительно труднее отделить друг от друга действия, происходящие на обеих электродных поверхностях. Для этой цели надо рассмотреть основную систему, ограниченную с одной стороны металлическим проводником, а с другой стороны электролитом; но для мест входа и выхода тока через проводник второго класса наш закон непосредственно не имеет места, ибо внешние действия, передающиеся в систему через электролит, обуславливаются не только протекающим электричеством, но и протекающим веществом. Благодаря передвижению ионов на систему оказывается действие особого рода, ибо ионы во всяком случае несут с собой молекулярную энергию; следовательно, в этом случае необходимо применять основное положение, приведенное на стр. 144.

Применение принципа сохранения энергии к явлениям, происходящим внутри электролита, опять-таки просто, так как вследствие неизменности химического состава можно принять, что в объеме, расположенном целиком внутри электролита, энергия, введенная ионами через одну сторону, такова же, как выходящая с другой. Таким образом мы можем внешними действиями этого рода совершенно препречь и тогда мы снова получаем, как и выше, Джоулеву теплоту, как она экспериментально и обнаруживается в связи с законом Ома.

Благодаря этому результату легко теперь вычислить действия на пограничной поверхности электролита отдельно от действий, происходящих внутри его. Положим, что ток  $i$  протекает через электролит между двумя электродами одного и того же металла, на которых потенциальная функция имеет значения  $\varphi$  и  $\varphi'$ . Далее, пусть изменение потенциала от электрода до смежного слоя неразлагающейся жидкости равно  $\epsilon$  и соответственно  $\epsilon'$ , которое мы будем считать

положительным, если потенциальная функция возрастает в направлении тока. Тогда согласно предыдущему изменение полной молекулярной энергии за единицу времени внутри и на поверхности электролита представляется величиной  $(\varphi - \varphi') \cdot i$ . С другой стороны, молекулярная энергия, выделяемая внутри электролита (джоулева теплота), дается, как и в случае проводников первого класса, непосредственно произведением из силы тока на уменьшение потенциальной функции, следовательно, величиной

$$i \cdot (\varphi + \varepsilon) - [\varphi - \varepsilon'];$$

таким образом, вычитая последнюю величину из первой, получаем в остатке для молекулярной энергии, возникающей на обеих пограничных поверхностях электролита, величину  $-i \cdot (\varepsilon + \varepsilon')$ , т. е. произведение из силы тока на алгебраическую сумму электродвижущих напряжений, действующих на обоих электродах, конечно, включая возможную поляризацию. Если температура на обоих электродах остается постоянной, то молекулярное действие сводится к образованию химической энергии, и можно электродвижущую силу  $(\varepsilon + \varepsilon')$ , действующую на обоих электродных поверхностях, прямо приравнять химической энергии, выделяемой единицей тока, т. е. тепловому эффекту, который сопровождал бы ход такого же химического процесса, если бы он протекал обычным путем, без возбуждения электричества. Но в общем случае на электродных поверхностях происходят и тепловые действия (непосредственные или вторичные), и поэтому необходимо, конечно, этот результат видоизменить. Раздельное вычисление тепловых и химических действий представляет задачу, для решения которой одного принципа сохранения энергии недостаточно.

Отсюда мы видим, что закон, по которому молекулярная энергия, производимая в месте соприкосновения двух металлических проводников, связывается с силой тока, находит свое применение к электролитам лишь постольку, поскольку молекулярная энергия, развиваемая на обеих электродных поверхностях в месте, определяется силой тока. Это происходит потому, что в электролитах, благодаря движению ионов от одного электрода к другому, переносится известное количество энергии, которое заранее не может быть установлено. Следовательно, в отношении процессов, разыгрывающихся на отдельных электродах, невозможно вывести

никакого общего правила из принципа сохранения энергии, — исследования этих процессов еще в полном ходу. Во всяком случае эти процессы согласно сделанным нами выводам теснейшим образом связаны с перемещением ионов, так как вопрос о количестве энергии, которая ими подводится к электродам (и соответственно отводится от них) играет при этом решающую роль; разрешение этого вопроса должно иметь существенное значение для суждения об этих сложных процессах. Правда, в этом случае остается еще произвести указанное выше разделение химических действий от тепловых, которое в последнее время успешно обосновывается на принципе Карпо-Клаузиуса.

Но вернемся назад к общему случаю, когда постоянный ток проходит через любую систему проводников между двумя любыми металлическими электродами с потенциальными функциями  $\varphi$  и  $\varphi'$ ; тогда согласно предыдущему увеличение молекулярной энергии в единицу времени будет равно  $(\varphi - \varphi') \cdot i + (u - u') \cdot i$ .

Но, с другой стороны, мы можем ту же самую величину выразить через действия, протекающие внутри и на пограничной поверхности отдельных проводников. Именно, если мы обозначим через  $W$  сумму совокупных сопротивлений проводников первого и второго класса (включая возможные переходные либо же вторичные сопротивления), то Джоулева теплота выразится величиной  $i^2 \cdot W$ . Если, далее,  $\epsilon$  есть сумма всех действующих в системе электродвижущих сил (включая возможные напряжения, обусловленные различием температуры или различием структуры, или же поляризацией внутри проводника), то согласно предыдущему сумма всех обусловленных этим молекулярных действий равна  $i \cdot \epsilon + (u - u') \cdot i$ . Тем самым для полного изменения молекулярной энергии, происходящего в системе в единицу времени, мы получаем выражение

$$i^2 \cdot W = i \cdot \epsilon + (u - u') \cdot i, \quad (3)$$

которое, будучи отождествлено с предыдущим, дает уравнение

$$i \cdot W = \epsilon + \varphi - \varphi'$$

в согласии с законом Ома. Если начало и конец системы проводников совпадает, так что проводники образуют зам-

кнутую цепь, то  $\varphi = \varphi'$ , и мы получаем формулу Ома в применении ко всей цепи.

Изложенные рассуждения легко распространить на разветвляющиеся токи, так же как и на взаимное соприкосновение проводников второго класса; поэтому мы бросим еще лишь короткий взгляд на процессы в нецелостных токах. Если в системе проводников каким-либо образом возбужден электрический ток, и затем она предоставлена самой себе, то вообще в ней возникает более или менее быстро переменный ток. Но для очень небольшого времени мы можем рассматривать его с точки зрения только что исследованного постоянного тока. Однако при этом надо принять во внимание, что здесь изменяется не только молекулярная энергия, но и электрическая (электростатическая и электродинамическая), благодаря чему процесс становится несколько более сложным, так как в этом случае сказывается влияние емкости и самоиндукции (ср. выше стр. 73).

Взаимодействие магнитных или намагниченных тел может быть в основном выведено из тех же предположений, как и взаимодействие электростатически заряженных проводников и диэлектриков; поэтому при рассмотрении этих явлений мы можем сослаться на результаты уже там (стр. 199—203) полученные. В основу рассмотрения мы снова положим систему магнитных или намагниченных тел, которые движутся в несопротивляющейся неполяризуемой среде под действием их взаимных поперемоторных и магнитодвижущих сил. При этом мы должны сохранить в силе условие, установленное раньше (стр. 196) для электростатических действий, а именно, что относительные скорости не переступают известной верхней границы, так как иначе в движущихся телах будут возбуждены известные электрические силы, которые могут видоизменить их взаимодействие.

Действия каждого магнита могут быть заменены действиями простого магнитного слоя, определенным образом распределенного на его поверхности (вообще еще связанного с определенным распределением магнитных масс внутри его). К этому воображаемому магнитному заряду относятся следующие определения.

Магнитный потенциал системы самой на себя составляет в легко понятном обозначении  $P = \sum \frac{m \cdot m'}{r}$ , или также

$P = \frac{1}{2} \sum m \cdot \varphi$ , где магнитная потенциальная функция  $\varphi = \sum \frac{m}{r}$ . Выражение для  $P$ , имеющее размерность работы, дает одновременно и единицу количества магнетизма в магнитной мере.

Если речь идет только о постоянных магнитах, то во впамяти принимаются только пондеромоторные действия, и магнитная энергия  $U$  выражается через потенциал  $P$ ; если же в магнитном поле находятся и намагничиваемые парамагнитные или диамагнитные вещества, то изменение временного магнетизма обуславливает такое изменение потенциала всех магнитных и намагниченных тел, который не увеличивает пондеромоторного действия. Если мы сделаем предположение, что магнитное равновесие для каждого распределения системы устанавливается мгновенно по уравнению Пуассона (стр. 200), а это можно считать, как правило, верным для слабо намагничивающих, то обмен энергии происходит, как и в предыдущем случае, только между живой силой молярного движения и магнитной энергией  $U$ ; однако здесь  $U$  измеряется уже не потенциалом  $P$ , а выражением

$$U = P + \int \frac{d\tau}{2k} (\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2),$$

которое может быть получено из таких же соображений как и выражение на стр. 202.

Таким же способом определяется величина магнитной энергии  $U$  для случая, когда тело одновременно обладает постоянным или временным магнетизмом, только величины  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  относятся в этом случае не ко всему магнитному моменту объема  $d\tau$ , а лишь к индуцированному (временному) моменту. Если последний отпадает, то  $U$  вновь сводится к  $P$ .

Отсюда видно, что пока задерживающая (коэрцитивная) сила действует лишь в том направлении, чтобы сохранить постоянный магнетизм, а в остальном справедливы индукционные условия Пуассона, всякая потеря магнитной энергии полностью возмещается полученной живой силой, подобно тому, как это имеет место и при движении точек, подчиненных неизменным, независимым от времени связям. Это верно еще и тогда, когда вместо пуассоновых уравнений намагничивания принимаются какие-либо другие, если

только временный магнетизм является определенной функцией намагничивающей силы. Следовательно, если система из одного расположения переходит в определенное другое, безразлично каким путем, то (так как магнитная энергия испытывает благодаря этому определенное изменение) и приrost живой силы, а стало быть, и пондеромоторная работа будет вполне определена, в то время как пидущия в намагничивающемся веществе может происходить очень различными способами и различными путями.

Но коль скоро задерживающая (коэрцитивная) сила проявляется в замедлении восстановления внутреннего магнитного равновесия, то вообще возникает потеря магнитной энергии, которая не покрывается приростом живой силы, так что принцип сохранения энергии требует здесь появления третьего вида энергии (теплоты), подобно тому как это бывает при трении движущихся тел. Так же и в случае изменения магнетизма с теми е р а т у р о й могут быть выведены важные следствия из принципа сохранения энергии; однако, так как они становятся существенно плодотворными только благодаря привлечению второго пачала теории теплоты, то мы не будем входить в это ближе.

До сих пор мы рассматривали электрические и магнитные явления, как две совершенно отделенные друг от друга области, имея в виду лишь взаимодействие зарядов между собой и магнитов между собой; благодаря этому и было возможно употреблять одновременно электростатическую и магнитную систему мер. Но положение меняется, если мы перейдем к рассмотрению э л е к т р о м а г н и т н ы х действий, так как благодаря им между обеими указанными областями до известной степени перекидывается мост, позволяющий перенести по желанию либо электростатическую систему мер в область магнетизма, либо же, наоборот, магнитную систему мер в область электричества. Этот переход совершается посредством одного закона (Ампера), который следует рассматривать, как основной закон всех электромагнитных явлений, а именно, что „линейный электрический ток силы  $i$  совершает вовне точно такие же (пондеромоторные, электродвижущие, магнитодвижущие) действия, как и ограниченный кривой тока и расположенный определенным образом магнитный двойной слой, обладающий моментом  $\omega$ , где  $\omega = i^a$ “.

Тем самым размерность момента двойного магнитного слоя (магнитная поверхностная плотность, умноженная на

длину) приравливается размерности силы тока (количеству электричества, деленному на время), и поэтому это уравнение можно использовать для того, чтобы измерять по желанию либо магнетизм через электричество, либо электричество через магнетизм; но во всяком случае нужно держаться какой-либо одной из обеих этих систем мер. Мы будем в последующем придерживаться магнитной системы мер.

Представим себе теперь случай, что в бесконечно протяженном поле свободно движется, взаимодействуя друг с другом, сколь угодно много постоянных магнитов и линейных замкнутых неразветвленных проводников тока, в которых действуют постоянные гальванические элементы, причем мы отвлекаемся от влияний тяжести. В поле могут находиться и электростатически заряженные тела (проводники и диэлектрики), равно как и проводники тока, и без того содержащие свободные покоящиеся заряды. Однако мы в последующем оставим совершенно вне внимания силы, исходящие из покоящихся зарядов, а также силы, действующие на них, предполагая, что их действия просто накладываются на взаимодействия между токами и магнитами.

Правда, это предположение не абсолютно верно, так как в высшей степени вероятно, что между электростатически заряженными (покоящимися) телами и движущимися магнитами или изменяющимися токами существуют известные подеромоторные действия<sup>1</sup>, подобно тому, как это имеет место между покоящимися магнитами и движущимися статическими (т. е. покоящимися в проводниках) зарядами<sup>2</sup>.

Но эти действия сами по себе очень слабы, и следствия, которые связаны с ними, а также непосредственно с вопросом о скорости передачи электромагнитных действий, мы можем обойти, предполагая, что скорость изменений электромагнитного поля, вызванных движениями магнитов и проводников или же колебаниями сил токов, настолько мала, что она несравнима со скоростью передачи этих действий. Это условие очень часто выполняется. При этом предположении указанные действия совершенно исчезают и теория электромагнитных

<sup>1</sup> H. Hertz, Über die Beziehungen zwischen den Maxwell'schen elektrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegnerischen Elektrodynamik, Wied. Ann. 23, p. 84, 1884.

<sup>2</sup> H. v. Helmholtz, Bericht betr. Versuche über die elektromagnetische Wirkung elektrischer Konvektion, ausgeführt von H. A. Rowland, Pogg. Ann. 158, p. 487, 1876; Wiss. Abh., I, p. 791.

и электродинамических действий, основанная Ампером и Ф. Нейманом, образует законченное, совершенное и свободное от возражений целое.

Ход процесса, совершающегося в заданной системе, полностью определен, если для какого-либо момента времени известно состояние системы, следовательно, если известны значения положений, скоростей, температур, сил токов и т. д. (стр. 109); все эти величины, в том числе и последние, должны быть заданы отдельно и независимо друг от друга; тогда отсюда определяются изменения во времени, а тем самым и весь процесс, совершающийся в конечное время. Так как полная энергия системы остается постоянной, то ее изменение за время  $dt$  равно нулю.

Составим выражение последней. Из различных видов энергии мы должны различать живую силу проводников и магнитов, молекулярную энергию проводников, наконец, электродинамическую и магнитную энергию, обусловленную наличием токов и магнитов.

Прирост живой силы дается работой совокупных ponderomotorных сил, исходящих от токов и магнитов. При этом ток  $i$ , согласно закону Ампера, действует на магнит, подобно двойному магнитному слою с моментом  $i$ , а следовательно, согласно механическому принципу действия и противодействия, так же и обратно магнит действует на ток с соответствующей ponderomotorной силой и, наконец, так как все действия магнита могут быть замещены действиями тока, один ток действует на другой подобным же образом. Но ponderomotorная работа двух магнитов измеряется уменьшением магнитного потенциала, если магниты считаются постоянными; поэтому по аналогии с магнитным потенциалом  $U$  (потенциал магнитов друг на друга) мы составим электромагнитный потенциал  $V$  (потенциал магнитов на токи  $i$ , если последние представляются замещенными двойными магнитными слоями  $i$ ) и электродинамический потенциал  $W$  (потенциал токов  $i$  друг на друга, при таком же предположении; здесь нужно включить и потенциал тока самого на себя, так как проводник может оказывать ponderomotorное действие и на свои собственные части). Тогда

$$U = i_1 v_1 + i_2 v_2 + \dots,$$

причем величины  $v$  зависят от положений соответствующих



проводников и всех магнитов. Силы токов  $i$  мы берем всегда положительными. Далее,

$$W = i_1 i_2 \cdot w_{12} + i_1 i_3 \cdot w_{13} + \dots + \frac{i_1^2}{2} \cdot w_{11} + \frac{i_2^2}{2} \cdot w_{22} + \dots,$$

причем величины  $w$  зависят только от положений проводников. При помощи понятных обозначений их легко привести к следующей форме:

$$w_{12} = - \iint ds_1 ds_2 \cdot \frac{\cos(ds_1, ds_2)}{r},$$

$$w_{11} = - \iint ds_1 ds_1' \cdot \frac{\cos(ds_1, ds_1')}{r}.$$

При этом элементы дуги  $ds$  следует считать положительными в направлении, в котором через них протекает ток; в интеграле проводника самого на себя каждый элемент дуги встречается как  $ds$  и как  $ds'$ , ибо фактор  $1/2$  предполагается уже в выражении  $W$ .

Искомая работа пондеромоторных сил, следовательно, общий прирост живой силы проводников и магнитов получается таким образом в виде

$$\begin{aligned} & -dU - (i_1 dw_1 + i_2 dw_2 + \dots) - \\ & - (i_1 i_2 dw_{12} + i_1 i_3 dw_{13} \dots + \frac{i_1^2}{2} dw_{11} + \frac{i_2^2}{2} dw_{22} + \dots). \end{aligned} \quad (4)$$

В интересах дальнейшего применения к пондеромоторной работе в системах с телесными проводниками и со скользящими контактами важно уже здесь отметить, что это выражение представляет не полное уменьшение всего потенциала  $U + V + W$  за единицу времени, а только такое частичное уменьшение, которое возникает благодаря движению тел, если все силы токов и магниты рассматриваются как постоянные.

Вторым видом энергии, который надо учесть, является молекулярная (тепловая или химическая) энергия проводников. Если  $w$  обозначает сопротивление,  $E$  — гальваническую электродвижущую силу некоторой цепи проводников (положительную, если она действует по направлению  $i$ ), то молекулярная энергия, произведенная в ней в течение времени  $dt$ , есть  $(i^2 \cdot w - i \cdot E) \cdot dt$  (см. стр. 214). Для предоставленного самому себе постоянного тока она равна нулю. Если мы назовем  $i \cdot w - E = c$  электродвижущей силой, идущей

равной в цепи проводников, благодаря чему закон Ома становится применимым и к индуцированным токам, то согласно этому прирост молекулярной энергии во всех проводниках представляется через

$$(i_1 e_1 + i_2 e_2 + \dots) \cdot dt. \quad (5)$$

Наконец, необходимо рассмотреть еще прирост того вида энергии, который обуславливается наличием токов и магнитов. Если мы положим ее равной  $Q$ , то для соответствующего прироста энергии получим

$$dQ. \quad (6)$$

Согласно принципу сохранения энергии сумма выражений (4), (5) и (6) равна нулю, что мы выразим символическим уравнением

$$(4) + (5) + (6) = 0.$$

Это уравнение может быть использовано двояким образом: либо из него можно, если известно  $Q$ , вычислить значение индуцированных электродвижущих сил  $e$  (и притом каждую в отдельности), либо же, если дается  $e$ , можно найти значение  $Q$ ; по одновременно обе величины принципа сохранения не позволяет вывести (ср. стр. 54). Мы здесь изберем последний путь, применяя закон индукции, установленный независимо от нашего принципа Ф. Нейманом<sup>1</sup>. Впрочем значения  $e$  и без того не являются совершенно произвольными; так, например, уже с самого начала видно, каким образом они зависят от времени, так как дифференциал  $dt$  входит явно только в (5).

Согласно Ф. Нейману, электродвижущая сила, индуцированная в замкнутом проводнике в положительном направлении, равна производной по времени от потенциала всех магнитов и токов на воображаемый проводник, по которому течет в положительном направлении единичный ток, умноженный на абсолютную положительную константу  $\epsilon$ , которую мы здесь можем оставить неопределенной; т. е. например,

$$e_1 = \epsilon \cdot \frac{d}{dt} (v_1 + i_1 v_{11} + i_2 v_{12} + i_3 v_{13} + \dots).$$

<sup>1</sup> F. Neumann, Über ein allgemeines Prinzip der mathematischen Theorie induzierter elektrischer Ströme, Abh. d., kgl. Akad. d. Wiss. Berlin 1847, G. Reimer 1848.

Здесь при  $w_{11}$  (коэффициент самоиндукции) множитель  $1/2$  опущен, ибо в этом выражении каждая комбинация двух элементов проводника должна встречаться дважды: один раз, когда по проводнику течет ток  $i_1$ , а другой раз, когда по нему течет единичный ток.

Подставляя эти значения  $\epsilon$  в выражение (5), получим из закона сохранения энергии

$$dQ = dU + (i_1 dv_1 + i_2 dv_2 + \dots) + (i_1 i_2 dw_{12} + i_1 i_3 dw_{13} + \dots + \frac{i_1^2}{2} dw_{11} + \frac{i_2^2}{2} dw_{22} + \dots) - \epsilon i_1 d(v_1 + i_1 w_{11} + i_2 w_{12} + \dots) - \epsilon i_2 d(v_2 + i_1 w_{12} + i_2 w_{22} + \dots).$$

Так как  $dQ$  — полный дифференциал, то (ср. стр. 53)

$$\epsilon = 1$$

и

$$Q = U - (i_1 i_2 w_{12} + i_1 i_3 w_{13} + \dots + \frac{i_1^2}{2} w_{11} + \frac{i_2^2}{2} w_{22} + \dots)$$

или, принимая во внимание значение  $W$ ,

$$Q = U - W.$$

Соответственно этому энергия, обусловленная наличием магнитов и токов, состоит из двух видов: магнитной энергии, измеряемой, как и раньше, положительным магнитным потенциалом  $U$ , и электродинамической (электрокинетической) энергии, измеряемой отрицательным электродинамическим потенциалом  $W$ , электромагнитный же потенциал  $V$  никакой доли в энергию не вносит. Об этом обстоятельстве мы еще скажем ниже подробнее. Сначала мы применим выведенные уравнения к некоторым простым случаям.

Если в поле нет никаких магнитов и наличие только одна цепь тока, то энергия  $Q$  сводится к  $-\frac{i_1^2}{2} w_{11}$  и уравнение сохранения суммы трех видов энергии гласит:

$$\left[ -\frac{i_1^2}{2} dw_{11} \right] + [i_1 e_1 dt] - d \left[ \frac{i_1^2}{2} \cdot w_{11} \right] = 0.$$

Для неподвижного твердого проводника коэффициент самоиндукции  $w_{11}$  неизменен, следовательно, ponderomotorная работа равна нулю и самоиндукция  $e_1 = w_{11} \cdot \frac{di_1}{dt}$ . Так как коэффициент самоиндукции  $w_{11}$  существенно отрицателен

по своему определению, то  $e$  обладает противоположным знаком по сравнению с  $\frac{di_1}{dt}$ . Отсюда по закону Ома (стр. 221) вычисляется сила тока  $i_1$ , если она произвольно задана для какого-либо определенного времени. Здесь мы имеем, следовательно, только превращения различных видов энергии внутри цепи тока, в то время как общая энергия проводника остается постоянной.

Для одного проводника и одного магнита добавляется еще живая сила, произведенная пондеромоторными действиями. Тогда мы получаем соответствующее уравнение

$$\left[ -i_1 dv_1 - \frac{i_1^2}{2} dw_{11} \right] + [i_1 e_1 dt] - d \left[ \frac{i_1^2}{2} \cdot w_{11} \right] = 0,$$

причем

$$e_1 = \frac{d(v_1 + i_1 w_{11})}{dt}.$$

Если отвлечься от самоиндукции тока, следовательно, положить  $w_{11} = 0$ , то нельзя  $i_1$  выбрать в начале движения произвольно, а сила тока задается тогда непосредственно, потому что член с  $\frac{di_1}{dt}$  из уравнения выпадает; поэтому формула Ома устанавливает связь между „величинами, определяющими состояние“ (стр. 110).

Если мы рассмотрим отдельно энергию проводника, взятого в качестве основной системы (живая сила, молекулярная энергия, электростатическая энергия), то она испытывает изменение только благодаря внешним воздействиям. Последние заключаются, во-первых, в пондеромоторной работе, которую магнит производит над проводником и благодаря которой увеличивается живая сила проводника, во-вторых, в индукционном действии магнита на проводник, работа которого  $i_1 \cdot \frac{dv_1}{dt} \cdot dt$  затрачивается на увеличение молекулярной энергии проводника, как это можно видеть непосредственно из предыдущего уравнения. Если же мы, наоборот, выберем магнит в качестве основной системы, то его энергия состоит только из живой силы его движения, и единственным действием, которое на него оказывает ток, является пондеромоторная работа, благодаря которой изменяется его живая сила. Следовательно, взаимодействия между магнитами и токами не вполне взаимны, к чему мы вскоре вернемся.

Если представить себе магнит замещенным вторым током, то пондеромоторные и индукционные действия производятся соответствующим образом на обе стороны. В этом случае энергия каждого отдельного проводника за время  $dt$  увеличивается: 1) благодаря пондеромоторной работе, совершаемой над ним извне, которая переходит в живую силу, и 2) благодаря внешней работе индукции (произведение электродвижущей силы, индуцированной извне, на соответствующую силу тока, помноженное на  $dt$ ), которая переходит в молекулярную энергию. Остальные изменения живой силы и молекулярной энергии вызываются собственной электрокинетической энергией проводящей цепи. Замечательно здесь то обстоятельство, что в силу особой формы, в которой выступает электрокинетическая энергия, полная энергия обоих проводников является не просто суммой энергий отдельных проводников, между тем как в случае одного проводника и одного магнита это положение справедливо.

Вернемся назад к общему случаю какого угодно числа постоянных магнитов и токов и рассмотрим несколько ближе выражение, которым дается энергия  $Q = U - W$ . Оно не содержит в себе члена, который бы аналогично живой силе движущихся весомых масс позволял бы заключать об инертности движущихся зарядов<sup>1</sup>, не содержит также такого члена, который бы указывал на непосредственное взаимодействие между электричеством и весомой материей<sup>2</sup>; это выражение состоит только из магнитного и электродинамического потенциалов. На первый взгляд могло бы показаться нелепым, что магнитный потенциал  $U$  входит в выражение энергии с положительным знаком, электромагнитный  $V$  вовсе не входит, электродинамический же потенциал  $W$  входит с отрицательным знаком. В самом деле, поскольку электромагнитные и электродинамические действия мы выводили непосредственно из чисто магнитных, то скорее можно ожидать, что три названных потенциала следует рассматривать как совершенно однородные и равноправные; и действительно, поскольку магнит и ток прямо-таки отождествляются, то неизбежно заключение, что и магнитный

<sup>1</sup> H. R. Hertz, Versuche zur Feststellung einer oberen Grenze für die kinetische Energie der elektrischen Strömung, Wied. Ann. 10, p. 414, 1880; Wied. Ann., 14, p. 581, 1881.

<sup>2</sup> Сравни R. Coileу, Nachweis der Existenz der Maxwell'schen elektrom. Kraft  $Y_{me}$ , Wied. Ann. 17, p. 55, 1882.

потенциал в выражении энергии играет ту же роль, как и электромагнитный и электродинамический. Тем не менее здесь дело обстоит иначе. Мы вывели электромагнитные и электродинамические действия из магнитных только на основе общего доказанного опытом закона (стр. 217), что ток производит точно такие же (подеромоторные и индукционные) действия, как и двойной магнитный слой с соответствующими свойствами. Но из этого еще не следует, что ток и магнит вообще ведут себя тождественно; ибо иначе они должны были бы *caeteris paribus* (в последнем счете) те же самые действия и испытывать. Но равенство также и пассивных действий может быть выведено из механического принципа действия и противодействия только относительно подеромоторных сил (стр. 219); для индукционных же действий это равенство ни в коем случае не имеет места. А именно, в то время, как внешние электродвижущие силы вызывают в токе известные изменения энергии, внутреннее состояние расположенного на том же месте соответствующего постоянного магнита (который всегда можно рассматривать как непроводник электричества), согласно установленному нами уравнению сохранения энергии, останется совершенно неизменным.

Это обстоятельство хорошо иллюстрируется следующим примером. Представим себе постоянный магнит в виде равномерно намагниченного двойного слоя, и неизменно связанный с ним линейный постоянный ток, например гидроэлектрический, который обтекает пограничную линию магнитной поверхности таким образом, что действия, исходящие из магнита, как раз уничтожаются; эта система, движется она или нет, не создает никаких сил в окружающей среде, ни подеромоторных, ни индуцирующих. Таким образом, если вблизи как-либо движется другой постоянный магнит или ток, то он будет вести себя так, как если бы он находился в пространстве совершенно оди; его скорость остается неизменной и т. д. Но не так обстоит дело с нашей комбинированной системой магнита и тока. В то время как в магните ничто не изменяется, в токе благодаря движению внешнего магнита вызываются индукционные действия, а следовательно, производится молекулярная энергия. Но, очевидно, эта энергия возникает здесь не за счет живой силы индуцирующего магнита, а за счет магнитной энергии  $U$ , которая обусловлена наличием

сбоях магнитов. Если ток прерывается (для чего не требуется никакой затраты работы), то эта энергия идет на пондеромоторные действия.

Подобным образом дело обстоит, если на место внешних магнитов помещается ток, только в этом случае дело идет не о магнитной, а об электрокинетической энергии — отрицательно взятом электродинамическом потенциале  $W$ . Отсюда видно, насколько необходимо проводить разделение между постоянными магнитами и эквивалентными им токами.

Вышеизложенное применение принципа сохранения энергии к взаимодействию магнитов и токов основывается исключительно на опытных фактах, и, в частности, — чему мы придавали особое значение, — оно независимо от какого-либо специального представления о природе магнетизма. Но если мы с самого начала примкнем к очень правдоподобному предположению Ампера, что магниты являются ничем иным, как системой соответственно ориентированных молекулярных токов, то применение принципа сохранения энергии существенно видоизменяется. Все магнитные и электромагнитные действия переходят тогда в электродинамические и должны рассматриваться как таковые. Существует только электродинамический потенциал, величина которого равна  $U + V + W$  и соответственно только электрокинетическая энергия, равная и противоположная потенциалу. Далее, внутренняя энергия постоянного магнита уже не является постоянной (и этому выводу не может помешать никакая гипотеза о природе молекулярных токов), а изменяется конечным образом при конечном изменении магнитного поля, в котором он находится. Как, в частности, следует представлять себе это изменение — это вопрос, который не относится сюда, где мы имеем дело лишь с непосредственными результатами опыта; он может получить разрешение лишь в связи с более общими проблемами, которые будут в дальнейшем вкратце затронуты.

Как в случае взаимодействия линейных неразветвляющихся токов и постоянных магнитов, так и в более общем случае телесно протяженных замкнутых проводников и любых намагничивающихся тел — законы Ампера и Ф. Неймана могут быть с одинаково удовлетворительным успехом положены в основу применения принципа сохранения энергии; только в этом случае, также как и при чисто магнитных действиях (стр. 216), нужно различать магнитную энергию

$U$  и магнитный потенциал  $P$ ; в остальном изложенные законы сохраняют свою формулировку полностью.

Особого замечания требуют еще действия, обусловленные различием в протяженных проводниках скользящих контактов (Gleitstellen), уже потому, что они играют интересную роль в историческом развитии теории действия тока. Выше (стр. 220) мы уже обратили особое внимание на то, что подеромоторная работа, произведенная при каком-либо изменении электромагнитного поля токами и магнитами, измеряется не фактически полным уменьшением во времени всего магнитного, электромагнитного и электродинамического потенциалов  $U + V + W$ , а лишь той частью уменьшения этой величины, которая обусловлена движениями тел, причем интенсивности токов и магнитов мыслятся неизменными. Но если в поле движутся протяженные проводники, которые могут подвергаться механическим деформациям или которые снабжены скользящими контактами, то неизменность силы тока надо, конечно, понимать так, что в каждой весомой частице сила тока остается одной и той же; поэтому при деформации или при скользящем контакте пути тока могут при движении изгибаться или расширяться, но не должны обрываться. В каждом данном случае можно считать полное изменение потенциала во времени состоящим из двух друг за другом следующих частных изменений, которые соответствуют двум следующим процессам: 1) весомые части проводника переходят в свое новое положение, между тем как пути тока в них остаются неизменными; 2) проводники находятся в покое, а пути тока и сила тока принимают обусловленные новым расположением величины и направления. При вычислении подеромоторной работы имеет значение лишь первое частичное изменение. Применение этого правила всегда приводит к правильным результатам; ибо все возражения, которые были выдвинуты против этого положения (впервые в настоящей обобщенной форме высказанного Гельмгольцем<sup>1</sup>) покоятся на неверном смешении описанного частичного изменения потенциала с его полным изменением (которое для некоторых электродинамических вращений равно нулю).

Представим себе, например, простой случай, а именно, что линейный проводник  $L$  скользит одним своим концом

<sup>1</sup> Н. в. Helmholtz, Wiss. Abh. I, p. 692.



вдоль поверхности проводящего тела  $K$  (например, ртути). Ток, который течет от  $L$  к  $K$ , распространяется при выходе из  $L$  во все стороны через  $K$ . Пондеромоторную работу, произведенную при указанном движении, можно найти, рассматривая бесконечно малое смещение проводника вдоль проводящей поверхности, например, от точки поверхности  $A$  к соседней точке  $B$  и вычисляя то (частичное) изменение полного потенциала тока на самого себя, которое получается, если считать силу тока во всех частях проводника постоянной. При этом нужно себе представить, что при данном перемещении ток втекает от  $L$  через  $B$  в  $K$  не непосредственно, а от  $L$  через  $B$  сначала линейно к  $A$ , а затем уже — таким же образом как и раньше — через  $K$ . При этом мы должны еще особо отметить, что в выражении потенциала, как и вообще в выражениях собственных потенциалов (потенциал тока на самого себя), каждая комбинация двух элементов тока появляется лишь один раз. (Ср. общее выражение пондеромоторной работы на стр. 220).

Точно так же, хотя и несколько более сложно, применяется к данному случаю принцип индукции Ф. Неймана. При вычислении изменения во времени потенциала всех токов и магнитов на проводник, по которому течет единичный ток, необходимо строго различать между изменениями токов и магнитов, которые вызывают индукционное действие, и изменениями проводника, в котором индуцируется электродвижущая сила. В первых необходимо всегда учитывать действительное полное изменение интенсивностей токов (независимо от того, имеются ли скользящие контакты или нет) и магнитов; напротив, в последнем необходимо считать единичный ток текущим неизменно так, как мы это изложили выше, т. е. так, что нити тока сохраняют свои положения в весомах частей проводника и при возникающих деформациях и не прерываются также в скользящих контактах.

Таким образом, чтобы найти, например, самоиндукцию рассмотренного прежде тока, протекающего через линейный проводник  $L$  в объемный проводник  $K$ , вдоль поверхности которого скользит  $L$ , нужно сначала составить выражение потенциала (в момент времени  $t$ ) тока  $L—A—K$  силы  $i$  на предполагаемый единичный ток, протекающий по тому же самому проводнику  $L—A—K$  (причем, следовательно, каждая комбинация двух элементов проводников встреча-

ется дважды). Затем это выражение можно вычесть из выражения потенциала (для момента времени  $t + dt$ ) измененного тока, протекающего по проводнику  $L$  уже с новой силой  $i + \frac{di}{dt} dt$  и переходящего через новую точку соприкосновения  $B$  непосредственно в проводник  $K$ , на воображаемый проводник  $L - B - A - K$ , по которому течет единичный ток (причем виты тока расположены в  $K$  совершенно так же, как и в момент времени  $t$ ). Если разделить найденную разность на  $dt$ , то получится индуцированная электродвижущая сила. Лишь при учете указанного правила индукционный принцип Неймана всегда приводит к правильному результату и в случае объемных проводников.

При равномерном электродинамическом вращении сила тока  $i$  и электрокинетическая энергия постоянны; в самом деле, легко найти, что подеромоторная работа равна работе электродвижущих действий, т. е. что работа, необходимая для поддержания вращения (преодоление сопротивления трения), получается за счет молекулярной энергии проводника. Точно так же и все магнитоэлектрические явления, включая и явления так называемой униполярной индукции, находят свое непосредственное объяснение указанным образом. Правда, при этом вопрос о подеромоторных или электродвижущих силах, действующих в отдельных частях проводника, остается еще совершенно открытым<sup>1</sup>.

Таким образом теория Ампера и Неймана о взаимодействии замкнутых токов и магнитов выступает в качестве совершенной системы, внутренне связанной принципом сохранения энергии, — системы, которая создает твердый, обоснованный результатами многочисленных экспериментов, базис для дальнейших исследований. Будут ли при этом считать, что действия отдельных элементов тока следуют закону Ампера или элементарному закону Грассмана<sup>2</sup>, или же потенциальному закону Гельмгольца, — это остается предоставить вкусу каждого.

<sup>1</sup> Ср. E. Riecke, Zur Theorie der unipolaren Induktion und die Plückerschen Versuche, Gött. Nachr., 1876, p. 332 (Wied. Ann. I, p. 110, 1877); Wied. Ann. 11, p. 413, 1880. Далее F. Koch, Untersuchungen über magnetoelektrische Rotationserscheinungen, Wied. Ann. 19, p. 143, 1883.

<sup>2</sup> H. Grassmann, Neue Theorie der Elektrodynamik. Pogg. Ann. 64, p. 1, 1845.

Внутренний пробел<sup>1</sup> показывает эта теория только тогда, когда отпадает предположение, сделанное нами в самом начале (стр. 218), а именно когда отпадает предположение о том, что быстрота изменения электромагнитного поля не сравнима с критической скоростью. В этом случае начинают играть роль известные явления, которые следует понимать как проявление того обстоятельства, что электромагнитные действия для своей передачи требуют времени.

Замечательно, что все до сих пор установленные теории о сущности электричества, как бы существенно ни различались они и по происхождению и по ходу идей (даже те, которые исходят из предположения о непосредственном дальнем действии), в своем дальнейшем развитии приходят к этому же пункту. Уже Гаусс рассматривал выведение сил, вызываемых движением электричества, из действия, распространяющегося не мгновенно, а с конечной скоростью, как „завершающий камень“ (Schlußstein) электродинамики, а неудачу своих усилий, направленных к этому, считал прямым основанием того, что установленный им основной закон электричества еще не созрел для опубликования<sup>2</sup>. Риман придерживался аналогичных же взглядов<sup>3</sup>, а К. Нейману удалось указанным путем свести веберовский основной закон к допущению, что обычный электростатический потенциал равномерно распространяется во все стороны с определенной скоростью и что это распространение является единственной причиной того, что электрические силы оказываются зависимыми и от скоростей и от ускорений действующих частиц электричества<sup>4</sup>.

Но совместимо ли вообще такое представление с принятием непосредственного дальнего действия и не ведет ли неизбежно предположение о конечной скорости распространения электрических действий к принятию вместе с Фара-

<sup>1</sup> H. Hertz, Über die Beziehungen zwischen den Maxwell'schen elektrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegenwärtigen Elektrodynamik, Wied. Ann. 23, p. 84, 1884.

<sup>2</sup> C. F. Gauss, Brief an W. Weber, Werke, V, p. 627. Сравни R. Clausius, Über die von Gauss angeregte neue Auffassung der elektrodynamischen Erscheinungen, Pogg. Ann. 135, p. 606, 1868.

<sup>3</sup> B. Riemann, Ein Beitrag zur Elektrodynamik, Pogg. Ann. 131, p. 237, 1867.

<sup>4</sup> C. Neumann, Die Prinzipien der Elektrodynamik, Gött. Nachr. 1868, p. 223. Далее, Math. Ann. I, p. 317, 1868; VIII, p. 555, 1875.

деем, Максвеллом и многими другими физиками изменения промежуточной среды, сопровождающего и являющегося посредником для этого распространения. Ибо состояние электрической системы может ведь явно зависеть не от времени, а лишь от физических изменений, которые испытывают материальные части системы (включая и эфир) в данный момент времени. Основной закон Клаузиуса, выведенный без всякого учета существующей промежуточной среды<sup>1</sup>, тоже не может обойтись без содействия таковой, так как действительно „абсолютная“ скорость физически совсем не определима.

А если существенное значение промежуточной среды для возникновения электромагнитных действий уже признается, то это уже недалеко от мысли о полном отказе от чистого дальнего действия и о перенесении на промежуточную среду роли исчерпывающего посредника в этих действиях, или, другими словами, по выражению К. Неймана, о сведении всех „телескопических“ действий в „микроскопическим“.

Перед этим принципиальным вопросом должны отступить, по моему мнению, все другие, как, например, вопрос о том, нужно ли различать два вида электричества, существуют ли незамкнутые токи, и если да, то как в этом случае можно вывести взаимодействие двух элементов тока из взаимодействия замкнутых токов, как, далее, нужно мыслить молекулярные токи в магнитах, наконец, каков основной закон электрических действий и т. д. Ибо в зависимости от разрешения основного вопроса ряд представлений, а тем самым и ход размышлений, будет направляться совершенно отличными путями; а ведь это, возможно, означает настоящий переворот во всех наших, перешедших от Ньютона и ставших привычными, взглядах на существо сил, действующих в природе. Ибо хотя мы по примеру Ньютона и рассматриваем в качестве данного только явление, а вопрос о процессах, которые могут где-нибудь еще разыгрываться, но которые пока скрыты от восприятия, оставляем совершенно незатронутыми, но наше теперешнее мировоззрение в общем и целом проникнуто и управляется представле-

---

<sup>1</sup> R. Clausius, Über eine neues Grundgesetz der Elektrodynamik, Pogg. Ann. 156, p. 657, 1875. Crelle J. 82, p. 85, 1876. Die mechanische Behandlung d. Elektrizität, Braunschweig 1879, p. 277.

нием о непосредственном действии на расстоянии, как в космическом, так и в молекулярном мире; т. е. мы убеждены, что между звездами, между атомами ничего более не происходит, что стояло бы в необходимо обусловленной связи с движениями этих тел, — воззрение, имеющее хорошее основание в том, что мы, в самом деле, не имеем никакого восприятия от подобных процессов при движении звезд, а для атомов это воззрение покоится только на заключении по аналогии.

И все же, если окончательно удастся свести совокупность электрических явлений к силам, действующим только на бесконечно малых расстояниях, — а для этого сейчас имеется более высокая степень вероятности, — то едва ли можно сомневаться в том, что мы должны будем привыкнуть к тому, чтобы действия тяготения, которые следуют гораздо более простым законам, а вследствие этого так же и химические явления, рассматривать с той же точки зрения; потому что упрощение, которое вносится новым воззрением во все наши представления о природе, не легко переоценить, как мы это стараемся впоследствии ближе доказать. Неудобство, заключающееся в этой задаче, — а именно отказ от комплекса идей, укоренившихся в течение долгого времени, — ничего не может изменить; ибо так же, как нужна была трудная работа многих столетий, чтобы сделать представление о непосредственном дальном действии живучей привычкой, так же удастся эту привычку отбросить, если когда-либо действительно будет установлено, что это представление отслужило свою службу.

Не предпрешая поспешно окончательного выявления этой фундаментальной проблемы, мы в заключение нашего исследования отметим еще наиболее существенные следствия для применения принципа сохранения энергии, которые вытекают из последовательного проведения новой теории. За неимением короткого подходящего названия для этой теории я позволю себе в последующем обозначать ее как теорию бесконечно малых (*Infinitesimaltheorie*).

Прежде всего важно отметить, что обе противостоящие друг другу теории никак нельзя рассматривать как координированные; наоборот, теория дальнего действия является более общей, совершенно так же, как конечная величина содержит в себе бесконечно малую как частный случай. Ибо по теории бесконечно малых силы, действующие на

части тела, зависят только от его собственного состояния, по другой же теории они зависят, кроме того, еще от окружающих тел, заполняющих всю вселенную. Это обстоятельство является так же основанием того, почему мы в нашем предыдущем изложении и способе выражений больше придерживались более общего представления о прямом дальнем действии. Таким образом, если теория бесконечно малых подтвердится, то этим одновременно будет доказан новый общий закон природы, а именно закон, что все изменения, происходящие в каком-нибудь материальном элементе и около него полностью определяются мгновенными процессами внутри и на границе элемента. Разумеется, что этот закон глубоко проникает в сущность и способ действия всех сил природы.

Благодаря этому и понятие энергии получает существенно более простой смысл, так как по образу действий энергия еще теснее примыкает к материи. Количество материи в мире не может ни уменьшаться, ни увеличиваться; вместе с тем, — что говорит еще больше, — материя не может исчезнуть в одном месте так, чтобы одновременно снова возникнуть в другом месте, удаленном от первого на конечное расстояние, — она может лишь непрерывно менять свое место с течением времени. Количество материи, находящейся в некотором замкнутом объеме, может измениться только благодаря тому, что материя входит или выходит через пограничную поверхность объема, и величина изменения измеряется непосредственно количеством материи, проходящей через эту поверхность.

С энергией дело обстоит иначе, пока теория дальнего действия будет сохранять свою силу. Хотя сумма энергии и остается в природе неизменной, все же энергия может внезапно перейти от одного тела к другому, удаленному на конечное расстояние, планета может перенести свою живую силу непосредственно на другую, магнит благодаря энергии своего движения мгновенно производит теплоту в индуцированном проводнике и т. д. По теории же бесконечно малых энергия, как и материя, может менять свое место с течением времени только непрерывно. Энергия, находящаяся в некотором замкнутом объеме, может увеличиваться или уменьшаться только благодаря таким внешним действиям, которые осуществляются физическими процессами в пограничной поверхности объема; таким образом

здесь так же может идти речь о прохождении энергии через эту поверхность. В этом случае энергия материальной системы всегда может быть разложена на элементы, каждый из которых соответствует определенному материальному элементу и в нем находит свое местонахождение (между тем как, например, потенциальная энергия двух тел, действующих друг на друга на расстоянии, всегда выступает как неделимое целое). Если поэтому несколько материальных систем соединяются в единую, то энергия общей системы равна сумме энергий отдельных систем — закон, который характерен для теории бесконечно малых (ср. стр. 121).

Если теория бесконечно малых дает такое грандиозное упрощение мировоззрения, то тем важнее для физического исследования обстоятельно проверить правильность этой теории, детально исследуя ее следствия; ибо только таким путем можно либо подтвердить ее, либо опровергнуть. Притом, очевидно, чрезвычайно важно совершенно отделить сущность этой теории от всех гипотез, которые создаются для наглядности, но которые с самой теорией ничего общего не имеют. Трудности, которые могут вырасти при этом для нашей способности представления, не имеют значения; например, то, что эфир ведет себя не так, как известные нам твердые, жидкие или газообразные тела, — это является обстоятельством, которое теории бесконечно малых не составляет ни малейших затруднений. Со временем мы сможем привыкнуть к специфическим способам действий эфира так же, как мы привыкли к тем свойствам, которые показывают нам любые другие тела, и тогда они скоро станут в ряд тех явлений, с которыми мы знакомы на основании многочисленных опытов.

Правда, нельзя отрицать, что принятие особой среды, столь существенно отличающейся от всех известных сред, не помогает нашему стремлению к возможно более простому описанию природы; однако упрощение, которое дает единое проведение теории бесконечно малых во всех областях природы, нужно оценить бесконечно выше, чем невыгоду, происходящую из-за введения нового тела, какое и без того необходимо в теории света, и уже там, благодаря своей высокой степени упругости и минимальной плотности, занимает в ряду твердых тел совершенно исключительное положение. Во всяком случае окончательное разрешение этой проблемы может быть названо одним из наи-

более ценных достижений, перспектива которого на ближайшее время стоит перед естественно-научным исследованием.

Наконец, я хотел бы указать здесь еще на одну замечательную аналогию. Раньше думали, что все события в природе как духовные, так и физические, находят свое основание и свое достаточное объяснение не только в одновременно действующих обстоятельствах, но что вообще как прошедшее, так и будущее (телеология) непосредственно участвуют в определении хода вещей и таким образом влияют на закон причинности.

Современное естествознание — и в этом заключается его мощный скачок вперед по сравнению с античным — разрушило эту веру; оно принимает, что состояние в настоящий момент, т. е. то, что происходит во всем мире в данное мгновение, составляет причину, которая в конечном счете полностью определяет то, что наступит в следующий момент, и что в текущей цепи изменений каждый член отдельно обуславливается во всем его объеме непосредственно предшествующим. Другими словами, по отношению к действиям во времени теория бесконечно малых добилась решительного признания. Следующим десятилетиям предстоит привести то же самое для пространственных действий, показав, что мгновенного непосредственного воздействия из пространственной дали так же не существует, как и из временной дали, что все пространственные действия, так же как и временные, в конечном счете оказываются составленными из действий, распространяющихся от элемента к элементу. В этом случае каждое явление находит свое полное объяснение в обстоятельствах, непосредственно смежных в пространстве и во времени, и все конечные процессы составляются из действий бесконечно малых. Мне кажется совершенно равноценным присоединить этот второй шаг к первому, которому мы в такой огромной мере обязаны успехом современного естествознания, и имеются основания ожидать, что и он окажется столь же важным для дальнейшего развития естествознания.



Редакция Р. Я. Штейнмана

Оформление Е. Г. Шпак

Корректурa И. П. Загрядскова

---

Сдано в производство 21/II 1938 г.

Подписано в печать 8/Х 1938 г.

Формат  $82 \times 110^{1/2}$

Печ. л. 18

Бум. л.  $4^{1/2}$

Уч.-авт. л. 13,99

Печ. зн. в 1 бум. л. 99.000

Изд. № 99

Учетный № 4575

Тираж 5000

Уполном. Главлита № Б 4648)

Бумага Камской ф-ки

Заказ № 253

---

2-я тип. ГОНТИ им. Евг. Соколовой. Ленинград, пр. Красных Командиров, 29

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
30	2 св.	средства	сродства
124	15 св.	другой совокупностью,	, другой совокупностью
196	1 св.	значком	знаком
219	2 св.	U	V

Зак. 253. М. Планк. 10/XII—1938 г.