

# КЛАССИКИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Под общей редакцией А. Д. Архангельского, В. А. Костицына,  
Н. К. Кольцова, П. П. Лазарева, Л. А. Тарасевича

КНИГА V

ГЕЛЬМГОЛЬЦ

## О СОХРАНЕНИИ СИЛЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Г. ГЕЛЬМГОЛЬЦ

~~140~~  
~~261~~

В М. ГИИ  
ОПРЕДЕЛ. № 1  
1938 г.

1938 г. № 1  
5.001  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

## О СОХРАНЕНИИ СИЛЫ

1938  
ПРОВЕРЕНО

(ФИЗИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

сп. № 22

ПРОВЕРКА  
VII ГИИ 1949

РЕГ. ЗКЗ. № 1  
ПРОВЕРЕНО  
1938 г. № 28291

ПЕРЕВОД  
И  
ПРИМЕЧАНИЯ

АКАДЕМИКА П. П. ЛАЗАРЕВА

531  
Г. 322

Сверено  
1931 г.

СВЕРЕНО

ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
ИМ. В. С. С. Х.  
Изм. № 69/78

МОСКВА  
1922

РЕГ. ЭКЗ. № 3  
ПРОВЕРЕНО  
1938 г. №

1938 г. №

1938 г. №

11408544  
11408544

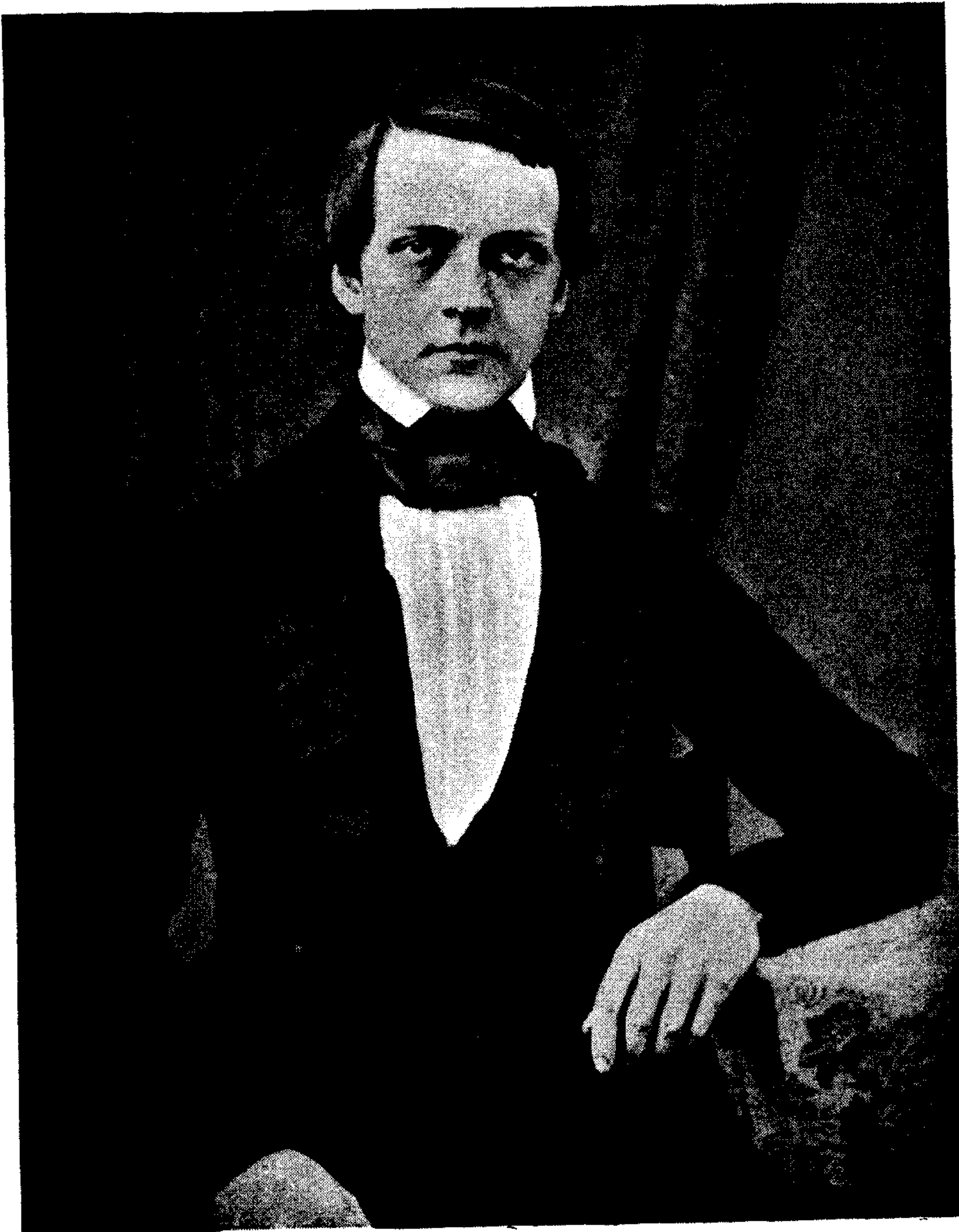
1938 г. №

1938 г. №

# О СОХРАНЕНИИ СИЛЫ.

(Физическое исследование).

Доложено на заседании Физического Общества в Берлине 23 июля 1847 г.;  
появилось в издании Г. Рейнера 1847 г.



*Н. В. Гельмгольц*

## Введение.

Предлагаемое сочинение предназначено в своей главной части для физиков, поэтому я предпочел установить основные положения, развиваемые в нем независимо от философского их обоснования, в форме физического предположения; далее я считал нужным развить следствия этого допущения и сравнить их в различных областях физики с опытными законами естественных явлений. К выводу положений, установленных в настоящей работе, можно подходить с двух различных точек зрения, или исходя из аксиомы, что невозможно получить безграничное количество работы при действии любой комбинации тел природы друг на друга, или же, допуская предположение, что все действия в природе можно свести на притягивательные или отталкивательные силы, величина которых зависит только от расстояния действующих друг на друга точек. Что оба положения являются тождественными, это доказывается в самом начале сочинения. В то же время эти оба положения имеют ближайшее отношение к главной и существенной задаче физического естествознания вообще, очертить которую я попытаюсь в настоящем введении.

Цель указанных наук заключается в разыскании законов, благодаря которым отдельные процессы в природе могут быть сведены к общим правилам и могут быть из этих последних снова выведены. Эти правила, к которым относятся, например, законы преломления или отражения света, закон Мариотта и Гей-Люссака для объема газов, являются, очевидно, не чем иным, как общими видовыми понятиями, которыми охватываются все относящиеся сюда явления.

Разыскание подобных законов является делом экспериментальной части нашей науки. Теоретическая часть ее старается в то же



время определить неизвестные причины явлений из их видимых действий; она стремится понять их из закона причинности<sup>1)</sup>).

Мы вынуждены так поступать и имеем на это право, благодаря основному закону, по которому всякое изменение в природе должно иметь достаточное основание. Ближайшие причины, которым мы подчиняем естественные явления, могут быть в свою очередь или неизменными, или изменяющимися. В последнем случае тот же закон принуждает нас искать других причин этого изменения и так далее до тех пор, пока мы не доходим до последних причин, которые действуют по неизменному закону, которые, следовательно, в каждое время при одинаковых условиях вызывают одно и то же действие. Конечной целью теоретического естествознания и является таким образом разыскание последних неизменных причин явлений в природе.

Здесь не место решать, могут ли в настоящее время в действительности все процессы быть сведены к таковым причинам, и может ли таким образом природа быть понята вполне, или же в ней имеются изменения, которые исключаются из действия закона необходимой причинности, которые, следовательно, попадают в область произвола, свободы; во всяком случае ясно, что наука, задача которой состоит в понимании природы, должна исходить из предположения возможности этого понимания и, согласно этому положению, и должна делать свои заключения и исследования, пока она не будет принуждена, благодаря неопровержимым фактам, к признанию границы для возможности понимания.

Наука рассматривает предметы внешнего мира с двух различных упрощенных точек зрения. Или она рассматривает только существование предметов, отвлекаясь от их действий на другие предметы или на наши органы чувств; таковую сущность предметов наука обозначает словом материя. Существо материи в себе самой представляется для нас покоящимся, бездейственным; мы различаем в ней пространственное распределение и количество (массу), которая считается вечно неизменяемой. Материи, как таковой, мы не можем приписать различных качеств, так как если мы говорим о различного рода материи, то мы заключаем о различии ее только по различию в ее действиях, то-есть по ее силам. Материя, как таковая, не может испытывать никаких иных изменений, кроме пространственных, то-есть кроме движения. Предметы в природе в са-

<sup>1)</sup> Смотри прибавление 1.

мом деле не бездейственны, и мы приходим к их познанию, только изучая те действия, которые оказывают они на наши органы чувств, так как мы по действиям заключаем о действующем предмете. Если, таким образом, мы желаем применять в реальной обстановке понятие материи, то мы можем это сделать, только прибавив еще второе представление, от которого мы раньше отвлекались, именно способность оказывать действия, то-есть наделяя материю силами.

Ясно, что понятия материи и силы в применении к природе никогда не могут быть отделены друг от друга. Материя при отсутствии ее действий не существовала для всей остальной природы, так как она никогда не могла бы вызвать изменения ни в ней самой, ни в наших органах чувств; сила без материи была бы нечто, что должно бы было существовать, и что, однако, не существовало, так как все существующее мы называем материей. Точно так же было бы ошибочным признать материю за нечто реально существующее и считать силу простым определением, которому не соответствует ничего реального; и то и другое является скорее отвлечением от действительности, образованными совершенно одинаковым образом; мы можем в самом деле воспринимать материю только благодаря действию силы, а не материю в себе самой.

Мы видели выше, что естественные явления должны быть сведены к действию последних неизменяемых причин; это требование должно быть понимаемо так, что в качестве последних причин должны быть указаны неизменные во времени силы. Вид материи с неизменными силами (с неуничтожаемыми качествами) мы назвали в науке (химической) элементом. Представим себе, что весь мир разложен на элементы с неизменными качествами, тогда единственно возможными изменениями в такой системе явятся пространственные изменения, то-есть движения, и внешние взаимоотношения, благодаря которым изменяется действие сил, могут быть только пространственными, следовательно, силы могут быть только движущими силами, зависящими в своем действии только от пространственных соотношений.

Точнее говоря, явления природы должны быть сведены к движениям материи с неизменными движущими силами, которые зависят только от пространственных взаимоотношений.

Движение есть изменение пространственных отношений. Пространственные отношения возможны только по отношению к пространственным величинам, имеющим конечные размеры, а не по отношению к пустому пространству, не имеющему отличительных



признаков. Движение может поэтому изучаться на опыте только как изменение пространственных отношений по крайней мере двух материальных тел друг по отношению к другу; движущая сила, как причина движений, о которой можно заключить только по взаимоотношениям по крайней мере двух тел друг по отношению к другу, может быть определена, как стремление двух масс изменять свое взаимное положение. Но сила, с которой действуют друг на друга две целые массы, должна быть разложена на взаимные силы всех частей этих масс.

Механика по этому приводится к силам материальных точек, то-есть точек пространства, заполненного материей<sup>1)</sup>.

Кроме взаимных расстояний две точки не имеют никаких пространственных взаимоотношений друг по отношению к другу, так как направление линии, их соединяющей, может быть определено только по отношению к еще двум по крайней мере точкам. Движущая сила, с которою точки действуют друг на друга, может быть поэтому причиной изменения только их расстояния, то-есть движущая сила может быть притягательной или отталкивательной.

Это непосредственно следует из закона достаточного основания. Силы, с которыми две массы действуют друг на друга, должны быть точно определены по их величине и их направлению, если только вполне дано положение масс. Двумя точками определяется только одно единственное направление, именно прямая, их соединяющая; следовательно, силы, с которыми точки действуют друг на друга, направлены по этой линии и величина сил может зависеть только от их расстояния.

Таким образом задача физического естествознания в конце концов заключается в том, чтобы свести явления природы на неизменные притягательные или отталкивательные силы, величина которых зависит от их расстояния. Разрешимость этой задачи есть в то же время условие для возможности полного понимания природы. Теоретическая механика не принимала до сих пор этого ограничения понятия движущей силы, во-первых, потому, что не выяснено было происхождение основных положений механики, далее потому, что для механики важно иметь возможность предвычислять действие системы движущих сил в таких случаях, когда разложение этих сил на простые составляющие еще не удалось произвести. Во всяком случае большая часть общих принципов

движения сложных систем масс выполняется в том случае<sup>1)</sup>, когда последние связаны друг с другом при помощи неизменных притягательных или отталкивательных сил; к таким принципам относятся принцип возможных перемещений, принцип движения центра тяжести, принцип сохранения главной плоскости вращения и момента вращения свободной системы, принцип сохранения живой силы. Из этих принципов в земных условиях применяются по преимуществу только первый и последний принцип, так как остальные относятся только к совершенно свободным системам, первый же принцип, как мы покажем, представляется частным случаем последнего, который поэтому является самым общим и важным следствием из сделанных выводов.

Теоретическое естествознание, если оно не желает остановиться на полпути понимания, должно согласовать свои воззрения с установленными выше требованиями, касающимися природы простых сил и со следствиями этого представления. Его дело будет выполнено, если, с одной стороны, будет закончено приведение явлений к простым силам, и в то же время может быть доказано, что данное приведение представляется единственно возможным, которое допускают явления. Тогда можно будет рассматривать данную схему приведения, как необходимую форму содержания для объяснения естественных процессов, и можно будет этой схеме приписать объективную истинность.

## I. Принцип сохранения живой силы.

Мы исходим из допущения, что невозможно при существовании любой произвольной комбинации тел природы получать непрерывно из ничего движущую силу. Из этого положения Карно и Клапейрон<sup>2)</sup> уже вывели теоретически ряд частью известных, частью еще экспериментально не доказанных законов относительно удельной и скрытой теплоты различных тел природы. Задачей настоящего сочинения является проведение указанного принципа совершенно тем же способом через все отделы физики отчасти для того, чтобы доказать применимость его во всех тех случаях, где законы явлений уже достаточно изучены, частью, чтобы с помощью этого принципа, опираясь на многообразные аналоги и более известных явлений,

<sup>1)</sup> Лучше сказать: „доказана только для того случая“ (1881).

<sup>2)</sup> Poggendorff's Annalen. LIX. 446, 566.

<sup>1)</sup> См. прибавление 2.



сделать дальнейшие заключения о законах еще не вполне изученных явлений, и дать таким образом в руки эксперимента путеводную нить.

Указанный принцип может быть формулирован следующим образом: вообразим себе систему тел природы, которые стоят друг к другу в известных пространственных взаимоотношениях и начинают двигаться под действием своих взаимных сил до тех пор, пока они не придут в определенное другое положение; мы можем приобретенные ими скорости рассматривать, как результат определенной механической работы и можем выразить их через работу. Если бы мы захотели, чтобы те же силы пришли в действие во второй раз, совершая еще раз ту же работу, то мы должны бы были перевести тела каким бы то ни было образом в первоначальные условия, применяя другие силы, которыми мы можем располагать. Мы на это затратим определенное количество работы приложенных сил. В этом случае наш принцип требует, чтобы количество работы, которое получается, когда тела системы переходят из начального положения во второе, и количество работы, которое затрачивается, когда они переходят из второго положения в первое, всегда было одно и то же, каков бы ни был способ перехода, путь перехода или его скорость. Так как если бы величина работы была на каком-нибудь одном пути больше, чем на другом, то мы могли бы пользоваться первым путем для получения работы, а вторым для обратного перемещения тел, при котором мы могли бы затратить только часть полученной работы, и мы получили бы неопределенно большое количество механической силы, мы построили бы вечный двигатель (*perpetuum mobile*), который не только поддерживал бы свое собственное движение, но и был бы в состоянии давать силу для совершения внешней работы.

Если мы будем отыскивать математическое выражение этого принципа, то мы его найдем в известном законе сохранения живой силы. Количество работы, которое получается или затрачивается, может, как известно, быть выражено, как работа поднятия на определенную высоту  $h$  груза  $m$ ; работа равна  $mgh$ , где  $g$  есть ускорение силы тяжести. Чтобы подняться свободно на высоту  $h$ , тело должно обладать начальной скоростью  $v = \sqrt{2gh}$ ; эту же скорость тело получает при обратном падении на землю. Таким образом  $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ , следовательно, половина произведения  $mv^2$ , которое называется в механике „количеством живой силы тела  $m$ “, может быть мерою величины работы. Для лучшего согласования с употре-

бительным В настоящее время способом измерений величины силы, я предлагаю величину  $\frac{1}{2}mv^2$  обозначать, как количество живой силы, благодаря чему она будет тождественна по величине с величиной затраченной работы. Для приведенного выше приложения понятия живой силы, ограниченного только вышеуказанным принципом, это изменение несущественно, в то время как в дальнейшем мы от этого получим существенные выгоды. Принцип сохранения живой силы гласит: если любое число подвижных материальных точек движется только под влиянием таких сил, которые зависят от взаимодействий точек друг на друга, или которые направлены к неподвижным центрам, то сумма живых сил всех взятых вместе точек останется одна и та же во все моменты времени, в которые все точки получают те же самые относительные положения друг по отношению к другу и по отношению к существующим неподвижным центрам, каковы бы ни были их траектории и скорости в промежутках между соответствующими моментами. Представим себе, что живые силы затрачиваются для того, чтобы поднять части системы, или эквивалентные им массы, на определенную высоту; тогда из только что доказанного следует, что представляющиеся при этом величины работы при указанных условиях должны быть равны. Этот принцип, однако, выполняется не для всех возможных видов сил; в механике этот принцип обыкновенно связан с принципом возможных перемещений и этот последний может быть доказан только для материальных точек с притягательными или отталкивательными силами. Мы сначала покажем здесь, что принцип сохранения живой силы остается справедливым сам по себе там, где действующие силы<sup>1)</sup> могут быть разделены на силы, исходящие из материальных точек, действующих по направлению прямой, их соединяющей, и имеющие величину, зависящую только от расстояния; в механике подобные силы обыкновенно называются центральными. Отсюда следует и обратно, что при всех действиях тел природы друг на друга, когда вообще указанный принцип может быть применен даже к самым малым частям этих тел, простейшие основные силы должны быть рассматриваемыми как центральные силы.

Рассмотрим сначала материальную точку с массой  $m$ , которая движется под влиянием сил, исходящих из многих тел, связанных в одну неизменяемую систему  $A$ ; механика нам указывает на возможность определить в каждый отдельный момент времени поло-

<sup>1)</sup> Которые предполагаются разлагаемыми на силы, исходящие из точек.



жение и скорость этой точки. Мы будем рассматривать время  $t$ , как независимую переменную, и выразим в зависимости от него координаты  $x, y, z$  точки  $m$ , по отношению к системе координат, прочно связанной с системой  $A$ , далее—тангенциальную скорость  $q$ , и—параллельные осям координат компоненты ее  $u = \frac{dx}{dt}, v = \frac{dy}{dt}, w = \frac{dz}{dt}$ , и, наконец,—компоненты действующих сил

$$X = m \frac{du}{dt}, Y = m \frac{dv}{dt}, Z = m \frac{dw}{dt}.$$

Наш принцип требует, чтобы  $\frac{1}{2}mq^2$ , и, следовательно,  $q^2$  было бы постоянно одно и то же, если  $m$  имеет то же положение по отношению к  $A$  и, следовательно, чтобы  $q$ , будучи зависимым от  $t$ , являлось функцией только координат  $x, y, z$ . то-есть:

$$d(q^2) = \frac{d(q^2)}{dx} dx + \frac{d(q^2)}{dy} dy + \frac{d(q^2)}{dz} dz \quad (1)$$

Так как  $q^2 = u^2 + v^2 + w^2$ , то  $d(q^2) = 2udu + 2v dv + 2w dw$ . Если подставить из предыдущих выражений  $\frac{dx}{dt}$  вместо  $u$  и  $X \frac{dt}{m}$  вместо  $du$ , точно также подставить вместо  $v$  и  $w$  аналогичные величины, то мы получим

$$d(q^2) = \frac{2X}{m} dx + \frac{2Y}{m} dy + \frac{2Z}{m} dz \quad (2)$$

Так как уравнения 1 и 2 должны существовать при любом одновременном значении  $dx, dy, dz$ , то должны быть порознь равны:

$$\frac{d(q^2)}{dx} = \frac{2X}{m}, \frac{d(q^2)}{dy} = \frac{2Y}{m}, \frac{d(q^2)}{dz} = \frac{2Z}{m}.$$

Если  $q^2$  есть функция только  $x, y, z$ , то отсюда следует, что  $X, Y, Z$  являются также только функциям координат, то-есть направление и величина действующей силы являются функциями взаимного положения  $m$  и  $A$ .

Если мы представим себе вместо системы  $A$  отдельную материальную точку  $a$ , то на основании вышедшего следует, что направление и величина силы, направленной от  $a$  к  $m$ , определятся

<sup>1)</sup> Это заключение требует некоторого ограничения (1881), см. приложение 3.

только относительным положением  $m$  по отношению к  $a$ . Так как положение  $m$  по отношению к одной точке  $a$  определяется расстоянием  $ma$ , то в этом случае закон должен быть изменен так, что направление и величина силы должны быть функциями этого расстояния  $r$ . Если мы примем, что координаты отнесены к какой-нибудь произвольной системе осей, начало которой лежит в  $a$ , то должно быть

$$m d(q^2) = 2X dx + 2Y dy + 2Z dz = 0 \quad (3)$$

если только при этом:

$$d(r^2) = 2x dx + 2y dy + 2z dz = 0,$$

то-есть когда

$$dz = -\frac{x dx + y dy}{z}$$

Если ввести это значение в уравнение 3, то получается:

$$\left(X - \frac{x}{z} Z\right) dx + \left(Y - \frac{y}{z} Z\right) dy = 0$$

для каждого любого значения  $dx$  и  $dy$  таким образом должны в отдельности быть равны

$$X = \frac{x}{z} Z \text{ и } Y = \frac{y}{z} Z,$$

т.-е. результирующая сила должна быть направлена к началу координат, к воздействующей точке  $a$ .

Следовательно, в системах, которые подчиняются вообще закону сохранения живой силы<sup>1)</sup>, простые силы материальных точек суть силы центральные.

## II. Принцип сохранения силы (энергии).

Мы дадим вышеуказанному закону для случая действия центральных сил еще более общее выражение.

Пусть  $\varphi$  величина силы, которая действует по направлению  $r$ , считается положительной, если имеется притяжение, и отрицательной, если наблюдается отталкивание, таким образом

$$X = -\frac{x}{r} \varphi; Y = -\frac{y}{r} \varphi; Z = -\frac{z}{r} \varphi \quad (1)$$

<sup>1)</sup> И закону равенства действия и противодействия (1881).

Согласно уравнению 2 предыдущего параграфа,

$$md(q^2) = -2 \frac{\varphi}{r} (x dx + y dy + z dz);$$

отсюда

$$\frac{1}{2} m d(q^2) = -\varphi dr,$$

или если  $Q$  и  $q$ ,  $R$  и  $r$  суть соответствующие тангенциальные скорости и расстояния, то

$$\frac{1}{2} m Q^2 - \frac{1}{2} m q^2 = - \int_r^R \varphi dr \quad (2)$$

Если рассматривать ближе это уравнение, то мы найдем в левой части разность живых сил, которая соответствует разным расстояниям  $m$  от  $a$ . Чтобы найти значение величины  $\int_r^R \varphi dr$  представим себе, что

величины  $\varphi$ , которые относятся к различным точкам линии соединяющей  $m$  и  $a$ , представлены перпендикулярно восстановленными к соответствующим точкам ординатами: указанная величина должна была бы представлять величину площади, которая заключается между кривой, ординатами соответствующими  $R$  и  $r$  и осью абсцисс. Поскольку эту площадь можно представить, как сумму бесконечного числа бесконечно малых прямоугольников<sup>1)</sup>, то эта величина есть сумма всех элементарных работ<sup>2)</sup>, которые произведены на расстояниях, лежащих между  $R$  и  $r$ . Если назвать энергию, обладая которой точка  $m$  может двигаться, но пока еще не движется, потенциальной энергией<sup>3)</sup>, в противоположность тому, что механика называет

живой силой, то мы могли бы назвать величину  $\int_r^R \varphi dr$  суммой потенциальных энергий<sup>4)</sup> между расстояниями  $R$  и  $r$ , и предыдущий закон мог бы быть выражен так: увеличение живой

<sup>1)</sup> У Гельмгольца в оригинале сказано: „поскольку эту площадь можно представить, как сумму бесконечного числа лежащих в ней абсцисс“. *П. Л.*

<sup>2)</sup> Величин сил (у Гельмгольца). *П. Л.*

<sup>3)</sup> У Гельмгольца буквально: „Если назвать теперь силы, которые стремятся двинуть точку  $m$ , пока они еще не произвели движения, напряженными силами“. *П. Л.*

<sup>4)</sup> Мы могли назвать величину  $\int_r^R \varphi dr$  суммой напряженных сил (у Гельмгольца). *П. Л.*

силы точки при ее движении под влиянием центральной силы равно сумме соответствующих изменению ее расстояния потенциальных энергий<sup>1)</sup>.

Представим себе, что две точки, находящиеся под действием притягательной силы на определенном расстоянии  $R$ , переводятся под влиянием воздействия силы на более близкое расстояние  $r$ , при этом их скорость, их живая сила увеличиваются; если они должны бы были перейти на более далекое расстояние  $r$ , то их живая сила должна была бы убывать и, наконец, должна сделаться равной нулю<sup>2)</sup>. Мы можем поэтому при притягивающих силах сумму

работ сил между пределами  $r=0$  и  $r=R$ ,  $\int_r^R \varphi dr$  обозначить как еще существующую, сумму тех же величин между  $r=R$  и  $r=\infty$  назвать, как использованную; первые могут перейти в действие непосредственно, последние только после эквивалентной потери в живой силе. Обратное наблюдается при отталкивающих силах. Если точки находятся на расстоянии  $R$ , то при их удалении мы будем получать живую силу, и мы должны считать работой силы имеющейся в нашем распоряжении величины между  $r=R$  и  $r=\infty$ , работой затраченной — величины работы между  $r=0$  и  $r=R$ .

Чтобы вывести наш закон в самом общем виде, мы представим себе любое количество материальных точек, имеющих массы  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , и т. д., при чем в общем случае массу, имеющую координаты  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$  мы обозначим через  $m_a$ . Параллельные осям координат слагающие действующих на массу сил пусть будут  $X_a$ ,  $Y_a$ ,  $Z_a$ , разложенные по осям координат скорости пусть будут  $u_a$ ,  $v_a$ ,  $w_a$ , тангенциальные скорости  $q_a$ ; расстояние между  $m_a$  и  $m_b$  пусть равно  $r_{ab}$ , центральная сила, действующая между этими двумя точками, пусть равна  $\varphi_{ab}$ . Для одной точки  $m_n$  аналогично уравнению 1, находится:

$$X_n = \Sigma \left[ (x_a - x_n) \frac{\varphi_{an}}{r_{an}} \right] = m_n \frac{du_n}{dt}$$

$$Y_n = \Sigma \left[ (y_a - y_n) \frac{\varphi_{an}}{r_{an}} \right] = m_n \frac{dv_n}{dt}$$

$$Z_n = \Sigma \left[ (z_a - z_n) \frac{\varphi_{an}}{r_{an}} \right] = m_n \frac{dw_n}{dt}$$

<sup>1)</sup> напряженных сил. *П. Л.*

<sup>2)</sup> быть совершенно исчерпанной. *П. Л.*



где знак суммы  $\Sigma$  относится ко всем членам, которые получаются, если вместо показателя  $a$  вставить все числа 1, 2, 3... и т. д., за исключением  $n$ .

Умножим первое уравнение на  $dx_n = u_n dt$ , второе на  $dy_n = v_n dt$ , третье на  $dz_n = w_n dt$ ; представим себе, что три полученных таким образом уравнения написаны для всех отдельных точек  $m_b$ , как это было сделано для  $m_n$ , и что эти все уравнения сложены, тогда мы получаем:

$$\begin{aligned} \Sigma \left[ (x_a - x_b) dx_b \frac{\varphi_{ab}}{r_{ab}} \right] &= \Sigma \left[ \frac{1}{2} m_a d(u_a^2) \right] \\ \Sigma \left[ (y_a - y_b) dy_b \frac{\varphi_{ab}}{r_{ab}} \right] &= \Sigma \left[ \frac{1}{2} m_a d(v_a^2) \right] \\ \Sigma \left[ (z_a - z_b) dz_b \frac{\varphi_{ab}}{r_{ab}} \right] &= \Sigma \left[ \frac{1}{2} m_a d(w_a^2) \right] \end{aligned}$$

Члены рядов, находящихся в левой части равенства, будут получены, если вместо  $a$  поставить отдельные индексы 1, 2, 3... и т. д., и при каждом из них поставить для  $b$  все большие и все меньшие величины, чем величина  $a$ . Суммы распадаются таким образом на две части, из которых в одной  $a$  всегда больше  $b$ , и в другой всегда меньше, при этом ясно, что для каждого члена одной части, имеющего вид

$$(x_p - x_q) dx_q \frac{\varphi_{pq}}{r_{pq}},$$

в другой должен находиться член:

$$(x_q - x_p) dx_p \frac{\varphi_{pq}}{r_{pq}}.$$

Если оба члена сложить, то получается

$$-(x_p - x_q) (dx_p - dx_q) \frac{\varphi_{pq}}{r_{pq}}$$

Если сделать это соединение членов в суммы, сложить все три суммы и при этом положить

$$\frac{1}{2} d[(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2] = r_{ab} dr_{ab},$$

то мы получим:

$$-\Sigma [\varphi_{ab} dr_{ab}] = \Sigma \left[ \frac{1}{2} m_a d(q_a^2) \right] \quad (3)$$

или

$$-\Sigma \left[ \int_{rab}^{Rab} \varphi_{ab} dr_{ab} \right] = \Sigma \left[ \frac{1}{2} m_a Q_a^2 \right] - \Sigma \left[ \frac{1}{2} m_a q_a^2 \right] \quad (4)$$

если  $R$  и  $Q$  точно так же, как  $r$  и  $q$  имеют соответствующие значения.

Мы имеем здесь слева опять сумму затраченных работ, справа сумму живых сил всей системы, и мы можем теперь выразить этот закон так: во всех случаях движения свободных материальных точек под влиянием исходящих из них притягательных или отталкивательных сил, величины которых зависят только от расстояния, уменьшение количества работы, которую можно от системы получить<sup>1)</sup>, всегда равно увеличению живой силы, и, наоборот, увеличение первой величины—уменьшению второй. Следовательно, всегда сумма существующих в системе потенциальной энергии<sup>2)</sup> и живых сил постоянна. В этой наиболее общей форме мы можем наш закон назвать принципом сохранения силы.

При данном выводе закона ничего не изменится, если одна часть точек, которые мы отметим буквами  $d$ , закреплена так, что  $q_d = 0$ ; тогда закон имеет вид

$$\Sigma [\varphi_{ab} dr_{ab}] + \Sigma [\varphi_{ad} dr_{ad}] = -\Sigma \left[ \frac{1}{2} m_b d(q_b)^2 \right] \quad (5)$$

Остается только указать, в каких соотношениях стоит принцип сохранения силы к общему закону статики, к так называемому принципу возможных перемещений. Этот последний принцип вытекает прямо из наших уравнений 3 и 5. Если при определенном положении точки  $m_a$  должно существовать равновесие, другими словами, если для того случая, когда эти точки находятся в покое, когда, следовательно,  $q_a = 0$ , это состояние остается неизменным, и, следовательно, все  $dq_a = 0$ , то из уравнения 3 следует

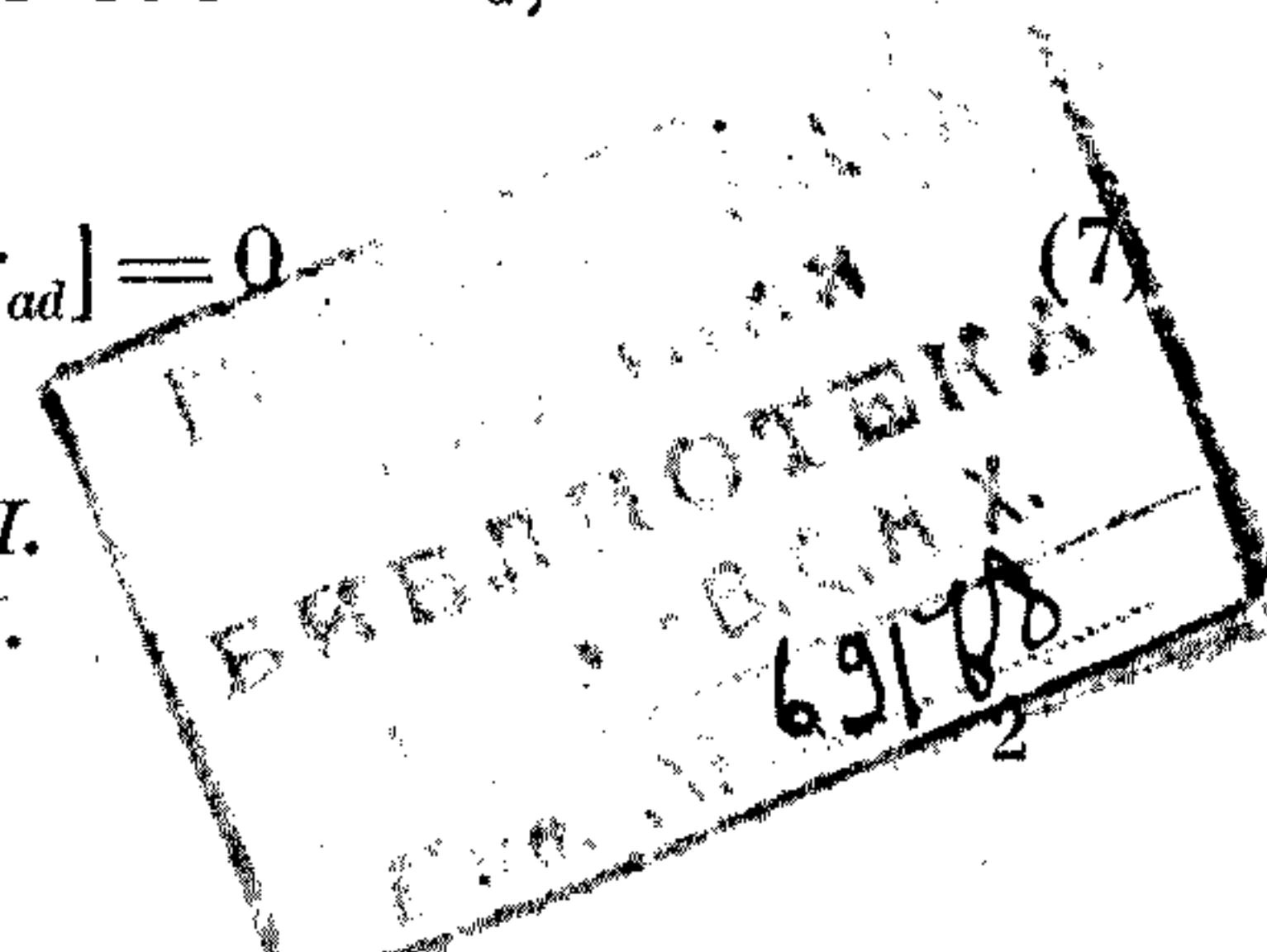
$$\Sigma [\varphi_{ab} dr_{ab}] = 0 \quad (6)$$

или, если действующие силы принадлежат точкам  $m_a$ , лежащим вне системы, то по уравнению 5

$$\Sigma [\varphi_{ab} dr_{ab}] + \Sigma [\varphi_{ad} dr_{ad}] = 0 \quad (7)$$

<sup>1)</sup> У Гельмгольца: напряженных сил. П. Л.

<sup>2)</sup> У Гельмгольца: напряженных сил. П. Л.





В этом уравнении под  $dr$  нужно подразумевать те изменения расстояний, которые наступают при любых малых перемещениях точки  $m_a$ , допустимых при существующих условиях системы. Мы видели в предыдущих выводах, что увеличение живой силы и, следовательно, переход из покоя в движение, может быть произведено только за счет затраты потенциальной энергии<sup>1)</sup>; последние уравнения выражают соответственно этому, что при таких условиях, когда потенциальная энергия при всех возможных направлениях движения в первые моменты не уменьшается, система, находящаяся в покое в данный момент, остается в покое и в дальнейшем.

Известно, что из установленных уравнений могут быть выведены все законы статики. Для природы действующих при этом сил является важным следующее следствие: представим себе, что вместо любых малых перемещений точек  $m$  берутся такие, какие могли бы существовать, если бы система была бы твердой системой, так что в уравнении 7 все  $dr_{ab} = 0$ , отсюда следует, что отдельно

$$\Sigma [\varphi_{aa} dr_{aa}] = 0$$

$$\Sigma [\varphi_{ab} dr_{ab}] = 0$$

В этом случае условиям равновесия удовлетворяют как внешние, так и внутренние силы. Поэтому, если определенная система тел природы при действии определенных сил приведена в состояние равновесия, то равновесие не нарушается, 1) если мы отдельные точки системы в их настоящих положениях представим себе соединенными неизменяемыми связями, и 2) если мы устраним силы, с которыми точки действуют друг на друга. Из этого далее следует: если силы, с которыми действуют друг на друга две материальные точки, удерживаются в равновесии приложенными к ним двумя внешними силами, то эти точки должны находиться в равновесии, если вместо взаимодействующих между точками сил подставить твердое соединение их между собой. Силы, которые действуют на две точки твердой прямой линии, могут быть в равновесии только в том случае, если они действуют по направлению этой линии, и при этом равны и направлены в противоположные стороны. Таким образом, по отношению к силам, с которыми точки действуют друг на друга и которые должны быть равны внешним силам и направлены в противоположные стороны от них, следует, что эти силы действуют

<sup>1)</sup> У Гельмгольца: затраты напряженной силы. П. Л.

по линии, соединяющей точки, и являются таким образом притягательными или отталкивательными силами.

Мы можем следующим образом выразить установленные положения:

1) Когда тела природы действуют друг на друга с силами притяжения или отталкивания, независимыми от времени и скорости, то сумма их живых сил и потенциальной энергии остается постоянной; максимум работы, которую можно получить, является таким образом определенным, конечным.

2) Если, наоборот, в телах природы находятся силы, которые зависят от времени и скорости или которые действуют не по направлению двух действующих друг на друга материальных точек, и, следовательно, например, являются вращающими силами, то возможна такая комбинация подобных тел, при которой сила или беспредельно теряется, или получается<sup>1)</sup>.

3) При равновесии системы тел под действием центральных сил внутренние и внешние силы должны находиться в равновесии сами по себе, если мы тела системы представим при этом неизменяемо соединенными друг с другом и допустим подвижной по отношению к лежащим снаружи телам только систему в целом. Твердая система, состоящая из подобных тел, никогда не может поэтому быть приведена в движение действием своих внутренних сил, но это движение может получиться только при действии внешних сил. Если бы имелись иные силы кроме центральных, то можно было бы установить такие твердые связи тел природы, которые позволили бы системе двигаться самой по себе без всякого отношения к другим телам.

### III. Приложение принципа в механических теориях.

Мы переходим теперь к специальным приложениям закона сохранения энергии<sup>2)</sup>. Сначала мы кратко упомянем о таких случаях, при которых сохранение живой силы уже и до настоящего времени применялось и признавалось.

1. Все движения, которые происходят под влиянием силы всемирного тяготения, следовательно, движения небесных и весомых земных тел. При движениях небесных тел закон

<sup>1)</sup> См. прибавление 4.

<sup>2)</sup> У Гельмгольца: силы. П. Л.



выражается в увеличении скорости, при приближении по орбите движущихся тел к центральному телу, в неизменности их больших осей и неизменности их времени обращения вокруг центрального тела и вокруг оси; при движениях земных тел это же выражается известным законом, что конечная скорость при падении зависит только от высоты падения, а не от направления и вида пробегаемой траектории, и что эта скорость, если она не будет уменьшена благодаря трению или неупругому удару, как раз достаточна, чтобы заставить упавшие тела подняться на ту же высоту, с которой они упали. Что высотой падения определенного груза можно пользоваться, как мерой величины работы наших машин, уже было упомянуто.

2. Передача движений при посредстве несжимаемых твердых и жидких тел, если при этом не существует трения или удара неупругих веществ. Наш общий принцип обыкновенно выражается для этого случая, как правило, по которому движение, производимое и изменяемое механическими машинами, всегда настолько теряет в величине силы, насколько оно приобретает в скорости. Если мы представим себе, что машина, в которой каким-либо образом получается работа, подняла груз  $m$  со скоростью  $c$ , то при другом механическом расположении может быть поднят груз  $nm$ , но только со скоростью  $\frac{c}{n}$ , так что количество работы, отдаваемой машиной в единицу времени, в обоих случаях можно представить в виде  $mgc$ , где  $g$ —ускорение силы тяжести<sup>1)</sup>.

3. Движение вполне упругих твердых и жидких тел. Как условие полной упругости, мы должны установить, что измененное по отношению к форме или объему тело снова их вполне восстанавливает, и еще прибавить, что внутри упругого тела не существует никакого трения между частицами. Наш принцип был ранее всего найден при изучении законов этих движений и им в этих случаях чаще всего пользовались. Как обыкновенные случаи его применения при твердых телах нужно упомянуть об упругом ударе, законы которого легко выводятся из нашего принципа и из закона сохранения движения центра тяжести, и о разнообразнейших упругих колебаниях, которые продолжаются также без нового толчка до тех пор, пока они не уничтожатся благодаря трению внутри тела и благодаря передаче движения на внешнюю среду. У жидкостей, как капельно-

<sup>1)</sup> У Гельмгольца—напряжение силы тяжести. П. Л.

жидких (очевидно, также упругих и обладающих только весьма большим модулем упругости и имеющих определенное положение равновесия частиц), так и газообразных (с малым модулем упругости и без положения равновесия), все движения при их распространении превращаются в волновые. К таким движениям относятся волны на поверхности капельно-жидких тел, звуковые движения, а также, по всей вероятности, движение света и лучистой теплоты. Живая сила отдельной частицы  $\Delta m$  в среде, через которую проходит ряд волн, очевидно, определяется скоростью, которую частица имеет в положении равновесия. Общее волновое уравнение, как известно, следующим образом определяет скорость  $u$ , если  $a^2$ —интенсивность,  $\lambda$ —длина волны,  $a$ —скорость распространения,  $x$ —абсцисса и  $t$ —время:

$$u = a \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - at) \right]$$

Для положения равновесия  $u = a$ , следовательно, живая сила частицы  $\Delta m$  во время движения есть  $\frac{1}{2} \Delta m a^2$ , и, следовательно, пропорциональна интенсивности. Если волны распространяются из центра в виде сферических волн, то они приводят в движение все большие массы, и, следовательно, интенсивность должна уменьшаться, если живая сила должна оставаться одной и той же.

Так как приведенные в волновые движения массы возрастают, как квадрат расстояния, то отсюда следует известный закон, по которому интенсивность уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния<sup>1)</sup>.

Законы отражения, преломления, поляризации света на границе двух сред, обладающих различной скоростью распространения волн, как известно, выведены Френелем из предположения, что движение частичек лежащих, на границе обеих сред одно и то же и из сохранения живой силы. При интерференции двух рядов волн не имеется никакого уничтожения живой силы, а лишь только иное распределение ее. Два ряда волн с интенсивностями  $a^2$  и  $b^2$ , которые не интерферируют, вызывают в точках, на которые они падают, интенсивность  $a^2 + b^2$ ; если они интерферируют, то максимумы имеют ин-

<sup>1)</sup> Здесь следует упомянуть, что для распространяющихся плоских волн количество потенциальной энергии, принадлежащей сжатой или смещенной упругой среде, составляет такую же часть общей энергии, как и живая сила (1881).



тенсивность  $(a + b)^2$ , то-есть на  $2ab$  большую, а минимумы  $(a - b)^2$  на столько же меньшую интенсивность, чем  $a^2 + b^2$ .

Живая сила упругих волн уничтожается только при таких процессах, которые мы назовем абсорбцией волн. Абсорбция звуковых волн получается, главным образом, благодаря удару волн о податливые неупругие тела, например, занавески, крыши, и она зависит, главным образом, от передачи движения телам, на которые волны упали, и от уничтожения движения в них благодаря трению; может ли движение уничтожаться благодаря трению частичек воздуха друг о друга, пока еще не может быть точно установлено<sup>1)</sup>.

Абсорбция тепловых лучей сопровождается пропорциональным развитием тепла; насколько последнее соответствует определенному эквиваленту энергии, мы рассмотрим в ближайшем параграфе. Сохранение энергии было бы установлено, если бы количество тепла, которое исчезает в излучающем теле, снова появлялось в теле, освещенном лучами источника, при чем предполагается, что нет никакой потери лучистой энергии, никакая часть лучей не попала в другое место. Эта теорема при опытах с тепловым излучением была до сих пор принимаема, как допущение; однако, мне неизвестен ни один опыт для ее обоснования. При поглощении световых лучей не вполне прозрачными или вполне непрозрачными телами мы знаем троякого рода процессы. Прежде всего фосфоресцирующие тела поглощают свет таким образом, что они могут его потом испустить опять, как свет. Во-вторых, повидимому, большая часть лучей, и по всей вероятности все лучи, создают теплоту. Предположение о тождественности тепловых, световых и химических лучей спектра встречается на всем пути все меньше и меньше препятствий<sup>2)</sup>, и только, повидимому, тепловой эквивалент химических и световых лучей весьма мал по сравнению с их сильным действием на глаз. Если бы тождество этих различно действующих лучей не подтвердилось, то мы должны бы были конечный процесс светового движения считать не исследованным. В-третьих, во многих случаях поглощенный свет вызывает химические действия. По отношению к затраченной энергии здесь должны быть различаемы двоякого рода действия: прежде всего такие, где свет дает толчок к проявлению деятель-

ности химического сродства, подобно телам, действующим каталитически, напр., при действии света на смесь хлора и водорода; во-вторых, такие, где свет действует против сил химического сродства, напр., при разложении солей серебра, при действии на зеленые части растений. В огромном большинстве этих процессов результаты действия света так мало известны, что мы еще совершенно не можем судить о величине встречающихся при этом сил; особенно значительны по количеству и интенсивности должны быть силы при воздействии света на зеленые части растения.

#### IV. Механический эквивалент тепла.

Те механические процессы, при которых до сих пор предполагалась абсолютная потеря силы, суть следующие.

##### 1. Удар неупругих тел.

Это явление связано по большей части с изменением и уплотнением тела, по которому произведен удар, следовательно, с увеличением потенциальной энергии. Далее, при часто повторяющихся ударах мы наблюдаем весьма значительное развитие тепла, как, напр., это имеет место при проковке металлического предмета, наконец, часть движения передается в виде звука ударяемому твердому телу и газу.

2. Трение как на поверхности двух тел, движущихся одно около другого, так и внутри тел при изменении формы, вызываемой смещением мельчайших частиц друг около друга. При трении точно также находят по большей части небольшие изменения в молекулярном строении тел, именно в начале взаимного трения друг о друга; позднее обыкновенно поверхности так приспособляются, что эти изменения при дальнейшем движении могут считаться исчезающе малыми. Во многих случаях эти явления совершенно отсутствуют, напр., если жидкости трутся о твердые тела или жидкости о жидкость. Кроме всего перечисленного можно всегда найти термические и электрические изменения.

В механике обычно представляют трение, как силу, которая противодействует существующему движению и величина которой является функцией скорости. Очевидно, это представление, созданное для того, чтобы можно было произвести подсчеты, является весьма неполным выражением сложного процесса, при котором наступают взаимодействия различных молекулярных сил. Из этого представления следует, что при трении живая сила совершенно

<sup>1)</sup> Это обстоятельство в настоящее время, без сомнения, доказано (1881).

<sup>2)</sup> S. Melloni. — В Pogg. Ann. Bd. LVII. S. 300. Brücke. В Ann. Bd. LXV. 593.



теряется, точно так же это допускается и при неупругом ударе<sup>1)</sup>. При этом, однако, не принимается во внимание, что помимо увеличения потенциальной энергии, происходящего благодаря сжатию трущихся или ударяющихся тел, получается при этом, с одной стороны, тепло, являющееся для нас энергией, при помощи которой мы можем получить механические действия, с другой стороны, по большей части возникает при этом электричество, обнаруживающееся или непосредственно притягательными, или отталкивательными силами, или косвенно благодаря тому, что оно вызывает появление тепла.

Остается таким образом только задаться вопросом, соответствует ли сумма этих энергий всегда потерянной механической энергии. В тех случаях, где молекулярные изменения и возникновение электричества, по возможности, устранены, вопрос должен был бы быть поставлен так: возникает ли при определенной потере механической силы всякий раз определенное количество тепла, и насколько тепловой эквивалент может соответствовать эквиваленту механической энергии? Для решения первого вопроса выполнено небольшое количество опытов. Д ж а у л ь<sup>2)</sup> определял количества тепла, которое развивается при трении воды в узких трубках или в сосуде, в котором приводится в движение колесо, построенное по типу турбины; в первом случае он нашел, что тепло, которое нагревает 1 килогр. воды на 1°Ц., поднимает на высоту 1 метра 452 килогр., во втором— 521 килогр. Однако, его методы измерения мало соответствуют сложности изучаемого явления, поскольку эти результаты могут претендовать каким-либо образом на точность<sup>3)</sup>; по всей вероятности, приведенные числа слишком высоки, так как при его методе теплота легко могла ускользнуть от наблюдения, наоборот, неизбежная потеря механической энергии в остальных частях аппарата не вводилась в расчеты.

Мы обратимся теперь к дальнейшему вопросу, насколько теплота может соответствовать эквиваленту механической энергии. Материальная теория теплоты должна, по необходимости, считать по-

<sup>1)</sup> У Гельмгольца ошибочно: при упругом ударе. *П. Л.*

<sup>2)</sup> J. P. Joule.—On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power. *Phil. mag.* XXVII. 205.

<sup>3)</sup> Это суждение относится только к первым, сделавшимся известными в то время опытам Д ж а у л я. Более поздние опыты того же исследователя, произведенные с глубоким знанием дела и железной энергией, заслуживают глубочайшего удивления; эти опыты дали 425 килогр. (1881).

стоянным количество теплового вещества; механическая сила может по этой теории получиться только благодаря стремлению теплорода расширяться.

По этой теории силовой эквивалент у тепла может заключаться в работе, которую теплота совершает при переходе от более высокой температуры к температуре низшей. В этом смысле К а р н о и К л а п е й р о н обработали задачу и нашли, что все следствия из предположения подобной эквивалентности, по крайней мере для газов и паров, выполняются.

Чтобы объяснить теплоту трения, материальная теория должна или допустить, что тепло, как предполагает В. Г е н р и<sup>1)</sup>, подведено извне, или что тепло, как думает Б е р т о л е<sup>2)</sup>, возникает от сдавливания поверхностей и стирающихся частей. Для принятия первого предположения недостает до сих пор опытов, доказывающих, что в окружающем трущиеся части пространстве развивается холод, соответствующий часто огромному количеству развивающегося в трущихся частях тепла; вторая гипотеза, не говоря уже о том, что она должна принимать совершенно невероятное по величине влияние уплотнения, по большей части не открываемого гидростатическими весами, совершенно исключается при трении жидкостей, при опытах, где куски железа благодаря проковке раскаляются и размягчаются, где куски льда при трении расплавляются<sup>3)</sup>, при чем размягченное железо и возникшая при плавлении вода не могут остаться в сжатом состоянии. Кроме того развитие тепла при движениях электричества доказывает нам, что абсолютное количество тепла в действительности может быть увеличено. Если даже оставить в стороне электричество, развивающееся при трении и voltaическое электричество, так как здесь можно предположить, что путем соединения и взаимоотношения электричества с теплородом, этот последний в этих случаях подводится из своего первоначального места и выделяется в нагретой проволоке, проводящей ток, — все же у нас остаются два пути для получения электрических напряжений чисто механическим путем, при чем в этих случаях никогда не обнаруживается тепла, которое могло бы быть перемещено, именно при перераспределении электричества<sup>4)</sup> и при движении магнитов. Если мы имеем заряжен-

<sup>1)</sup> Mem. of the Society of Manchester. T. V, p. 2. London. 1802.

<sup>2)</sup> Statique chimique. T. I, p. 247.

<sup>3)</sup> H u m p h r e y D a v y. Essay on heat; light and the combinations of light.

<sup>4)</sup> Статического. *П. Л.*



ное положительным электричеством вполне изолированное тело, которое не может терять своего электричества, то приближенный изолированный проводник будет обнаруживать на одной стороне  $+E$ , которым мы можем зарядить внутреннюю обкладку батареи, далее мы можем удалить проводник, содержащий свободное  $-E$ , которое мы можем собрать на наружной обкладке первой батареи или в другой батарее. При повторении этого опыта мы можем зарядить любой величины батарею сколько угодно раз и при ее разряде получить развитие тепла без того, чтобы теплота где-либо исчезала. При этом процессе мы затрачиваем известную механическую работу, так как при каждом удалении отрицательно заряженного проводника от тела, имеющего положительный заряд, должно преодолевать сопротивление, существующее между ними. В сущности, этот процесс осуществляется при применении электрофора для заряда лейденской банки. Подобный же случай мы находим при магнито-электрических машинах; когда магнит и якорь движутся друг относительно друга, возникают электрические токи, которые возбуждают тепло в замыкающей проволоке, и так как эти токи все время противодействуют движению якоря по отношению к магниту, они потребляют на это известную часть механической энергии. Здесь, очевидно, из тел, составляющих машину, можно получать бесконечное количество теплоты без того, чтобы теплота где-либо исчезала. Что магнито-электрический ток возбуждает в части спирали, непосредственно испытывающей влияние магнита, тепло, но не холод, это пытался доказать непосредственно опытом Джауль<sup>1)</sup>. Из этих данных следует, что абсолютное количество тепла может быть увеличено при применении механической силы, и поэтому тепловые явления не могут вызываться веществом, которое обуславливает наличие тепла только своим присутствием, но что эти явления могут быть получены при изменениях, при движениях, особого вещества, или уже известных весомых и невесомых тел, напр., электричества или светового эфира. То, что до сих пор называлось количеством тепла, должно бы было, по сказанному, явиться выражением, во-первых, для количества живой силы теплового движения, во-вторых, для количества той потенциальной энергии в атомах, которая при изменении их расположения может вызвать подобное движение; первая часть соответствовала бы тому, что до сих пор называется свободной теплотой, вторая тому, что называется скрытой теплотой. Если допустимо

<sup>1)</sup> Philos. Magazine. 1844.

попытаться еще определеннее установить представление об этих движениях, то настоящему состоянию науки, повидимому, вообще лучше всего соответствует гипотеза, примыкающая к взглядам Ампера. Вообразим себе тело, построенное из атомов, которые в свою очередь состоят из различных частичек (химические элементы, электричество и т. д.); мы можем различать в подобном атоме тройного рода движения, а именно: 1) смещение центра тяжести, 2) вращение около центра тяжести и 3) смещение частиц атома друг по отношению к другу. Два первые рода движения вызываются действием сил соседних атомов и распространяются в окружающее пространство в виде волны; подобное распространение соответствует излучению тепла, но не теплопроводности. Движение отдельных частей атома друг по отношению к другу вызывается силами, возникающими внутри атома, и эти движения только весьма постепенно могут приводить в совместное движение соседние атомы, подобно тому как одна колеблющаяся струна сообщает движение другой, при этом атомы теряют определенное количество движения; этот род распространения является, повидимому, аналогичным тому, который имеется при теплопроводности. Вообще является понятным, что подобные движения в атомах могут вызвать изменение в молекулярных силах, и, следовательно, изменения в агрегатном состоянии; однако, нельзя определить точно, какого рода являются эти движения: для этого у нас нет никаких точек опоры; для нашей цели является достаточным только признание возможности, что тепловые явления могут быть рассматриваемы как движения. Сохранение энергии должно бы было при этих движениях выполняться постольку, поскольку до сих пор признавалось сохранение количества теплоты, именно это имеет место при явлениях проведения и излучения от одного тела к другому, при связывании и выделении тепла, происходящих при изменении агрегатного состояния.

Из различных способов возникновения тепла мы рассмотрели до сих пор тепло, возникающее при излучении, и тепло, возбуждаемое действием механических сил; теплоту, возникающую при электрических процессах, мы рассмотрим ниже. Остается изучить развитие тепла при химических процессах. До сих пор это явление объяснялось как освобождение теплоты, который в скрытом состоянии заключался в соединяющихся телах. Так как согласно этому нужно было наделять каждое простое тело и каждое химическое соединение, которое может образовать еще дальнейшие соединения высшего порядка, определенным количеством скрытой теплоты, необходимо



связанной с их химической конституцией, то отсюда следовал закон, который, по крайней мере, отчасти оправдался на опыте, именно, что при химическом соединении многих веществ, превращающихся в одинаковые продукты, всегда выделяется одинаковое количество тепла, в каком бы порядке, через какие бы промежуточные ступени происходило соединение<sup>1)</sup>. Согласно нашему представлению возникающее при химических процессах тепло является количеством живой силы, которая получается из определенного количества работы химических сил притяжения, и предыдущий закон представляется в данном случае выражением закона сохранения энергии.

Условия и законы исчезания тепла так же мало изучены, как и условия и законы возбуждения теплоты, хотя без сомнения таковые существуют. До сих пор известны только случаи, при которых разрушаются химические соединения или получаются более разреженные агрегатные состояния и благодаря этому теплота делается скрытой. Исчезает ли тепло при возникновении механической работы, что является необходимым постулатом сохранения энергии, этот вопрос еще никогда не ставился. Я могу в пользу этого привести только один опыт Джауля, который представляется достаточно надежным<sup>2)</sup>. Именно этот последний нашел, что воздух при вытекании из резервуара вместимостью в 136,5 куб. дюймов, в котором он находился под давлением в 22 атмосферы, охладил окружающую резервуар воду на 4°,085 F., если только вытекание происходило в атмосферу и, следовательно, должно было преодолевать ее сопротивление. Наоборот, не наступало никакого понижения температуры, если воздух перетекал в эвакуированный сосуд такого же размера, который стоял в том же самом сосуде с водой, так как в этом случае воздух не преодолевал никакого сопротивления и не производил никакой механической работы.

Нам остается теперь еще исследовать, в каком отношении к нашим исследованиям стоят попытки Клапейрона<sup>3)</sup> и Гольцманна<sup>4)</sup> вывести механический эквивалент тепла. Клапейрон исходит из представления, что теплота только при ее перетекании из более нагретого тела в другое более холодное может явиться средством

1) Hess. Pogg. Ann. L. 392. LVI. 598.

2) Philos. Magaz. XXVI. 369.

3) Pogg. Ann. Bd. LIX 446. 566. (1843).

4) Über die Wärme und Elasticität der Gase und Dämpfe. Mannheim., 1845. Извлечение из этого сочинения в Pogg. Ann. Ergänzung. Bd. II.

для получения механической работы, и что максимум этой последней может быть достигнут, если перенос тепла происходит между телами с равной температурой и изменения температуры производятся только сжатием и расширением нагретых тел. Этот максимум должен быть один и тот же для всех тел природы, которые могут производить механическую работу за счет нагревания или охлаждения; так как, если бы этого не было, то можно было бы пользоваться для получения механической работы телом, в котором определенное количество тепла производило бы большее действие, при чем часть механической работы получившейся при этом можно было бы применять для того, чтобы при помощи другого тела обратно перевести тепло из более холодного тела в более теплое и таким образом можно бы было получить бесконечное количество механической работы; при этом само собою подразумевается, что количество тепла благодаря этому процессу не изменяется. Клапейрон выражает аналитически этот закон в следующем общем виде:

$$\frac{dq}{dv} \cdot \frac{dt}{dp} - \frac{dq}{dp} \cdot \frac{dt}{dv} = C,$$

где  $q$ —количество тепла, которое содержит тело,  $t$ —его температура, при чем обе величины выражены, как функции объема  $v$  и давления  $p$ .  $\frac{1}{C}$  есть механическая работа, которую совершает единица тепла (которая нагревает 1 килогр. воды на 1° Ц), если она переходит к температуре на 1° ниже. Эта теплота должна быть для всех тел природы одной и той же, но должна изменяться от температуры. Для газов предыдущая формула имеет следующий вид:

$$C = v \frac{dq}{dv} - p \frac{dq}{dp}.$$

Следствия, выведенные Клапейроном из предположения полной справедливости этой формулы, имеют за себя, по крайней мере для газов, большое количество согласных с опытом аналогий. Его вывод закона может быть справедливым только в том случае, если рассматривать абсолютное количество тепла неизменным<sup>1)</sup>; впрочем, его специальная формула для газов, которая только и подтверждена

1) Как известно, Клаузиус позднее (1850) усовершенствовал эту часть теории Карно (1881).



ср внемием с опытом, вытекает, как это мы скоро увидим, также из формулы Гольцманна. По отношению к общей формуле он попытался только показать, что следующий из нее закон, по крайней мере, не противоречит опыту. Этот закон гласит, что если увеличить на малую величину давление на различные тела, взятые при одной и той же температуре, то развиваются количества тепла, которые пропорциональны их способности расширяться от теплоты.<sup>1)</sup> Я хотел бы обратить внимание только на одно по меньшей мере невероятное следствие этого закона. Сжатие воды при точке ее максимальной плотности не должно давать никакого тепла, а между этой точкой и точкой замерзания должно давать охлаждение.

Гольцманн исходит из представления, что определенное количество тепла, которое поступает в газ, может вызывать в нем или повышение температуры, или расширение без повышения температуры. Производимую этим расширением работу он принимает за механический эквивалент теплоты и вычисляет из звуковых опытов Дюлонга, касающихся отношения обеих удельных теплот газов, что количество тепла, которое нагревает 1 килогр. воды на 1° Ц., поднимает 374 килограмма на 1 метр. Этот способ подсчета по нашим представлениям допустим только тогда, когда вся живая сила подведенного тепла действительно отдается в виде механической работы, и, следовательно, сумма живой силы и потенциальной энергии, то-есть количество свободной и скрытой теплоты, в сильно разреженном газе в точности такова же, как и в более сжатом газе той же температуры. Поэтому газ, который расширяется без совершения работы, не должен был бы изменять свою температуру, как это повидимому действительно следует из вышеупомянутого опыта Джауля, и повышение и понижение температуры при сжатии и расширении при обычных условиях должно было бы зависеть от развития тепла в зависимости от применения механической силы и наоборот. В пользу закона Гольцманна говорит большое количество полученных следствий, согласных с опытом, и в частности вывод формулы для упругости водяных паров при различных температурах.

Джауль нашел из своих собственных опытов величину механического эквивалента, вычисленную Гольцманном из опытов других авторов в 374, равной 481, 464, 479, в то время как из опытов

<sup>1)</sup> Их коэффициенту расширения.

с трением Джауль нашел для механического эквивалента единицы теплоты 452 и 521.

Формула Гольцманна тождественна для газов с формулой Клапейрона; только в этой последней находится неопределенная функция температуры  $C$ , и благодаря этому является возможным полное нахождение интеграла. Именно первая формула гласит:

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

где  $a$ —механический эквивалент единицы тепла; формула Клапейрона такова:

$$C = v \frac{dq}{dv} - p \frac{dq}{dp}.$$

Обе формулы, следовательно, совпадают, если  $C = \frac{pv}{a}$  или, так как  $p = \frac{k}{v}(1 + at)$ , где  $a$ —коэффициент расширения и  $k$ —постоянная, если

$$\frac{1}{C} = \frac{a}{k(1 + at)}.$$

Вычисленные Клапейроном значения  $\frac{1}{C}$  согласуются достаточно хорошо с этой формулой, как это вытекает из нижеследующего сопоставления.

Температура.	Вычисленные Клапейроном.			На основании формулы.
	$a$	$b$	$c$	
0°	1,410	—	1,586	1,544
35,5	—	1,365	1,292	1,366
78,8	—	1,208	1,142	1,198
100,0	—	1,115	1,102	1,129
156,8	—	1,076	1,072	0,904

Число, стоящее под буквой  $a$ , вычисляется из скорости звука в воздухе, ряд  $b$  из скрытых теплот паров эфира, алкоголя, воды, скипидара,  $c$ —из упругости водяного пара для разных температур. Формула Клапейрона для газов, таким образом, тождественна с формулой Гольцманна, ее приложимость к твердым и капельножидким телам остается пока сомнительной<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> См. прибавление 5, относящееся к работам Р. Майера (стр. 59).



## V. Механический эквивалент электрических процессов.

Статическое электричество. Электричество, получаемое от статических машин, может явиться средством для получения силы двумя способами: или когда оно движется с своим носителем, благодаря своим притягательным или отталкивательным силам, или когда оно перемещается в проводниках благодаря развитию тепла. Механические явления первого рода, как известно, выводятся из закона притяжения или отталкивания сил, действующих между двумя электрическими жидкостями обратно пропорционально квадрату расстояния, и опыты, поскольку они могут быть сравнены с теорией, оказались согласующимися с расчетами. Согласно нашим первоначальным выводам, закон сохранения энергии должен выполняться для подобных сил. Мы желали бы поэтому углубиться в специальные законы механических действий электричества лишь постольку, поскольку это нам необходимо для вывода закона развития тепла при электрических явлениях.

Пусть  $e_1$  и  $e_2$  две электрические массы, для измерения которых применяется единица, равная массе, отталкивающей равное ему количество электричества на расстоянии  $= 1$  с силой  $= 1$ ; если противоположные электричества обозначим противоположными знаками масс, и если  $r$  есть расстояние между  $e_1$  и  $e_2$ , то величина их центральной силы равна

$$\varphi = - \frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

Прирост живой силы при переходе масс с расстояния  $R$  к расстоянию  $r$  есть

$$- \int_R^r \varphi dr = \frac{e_1 e_2}{R} - \frac{e_1 e_2}{r}.$$

Если они переходят с расстояния  $\infty$  к расстоянию  $r$ , то предыдущее выражение равно  $-\frac{e_1 e_2}{r}$ . Мы назовем эту последнюю величину, представляющую сумму затраченной при движении от  $\infty$  до  $r$  работы <sup>1)</sup> или полученной живой силы, согласно тому обозначению, которое Гаусс ввел в учение о магнетизме, потенциалом обоих электрических элементов на расстоянии  $r$ ; прирост живой силы при каком-либо движении является равным избытку потенциала в конце пути над значением его в начале.

<sup>1)</sup> У Гельмгольца — напряженной силы. П. Л.

Назовем точно также сумму потенциалов электрической элементарной массы, по отношению ко всем элементам наэлектризованного тела, потенциалом этой массы по отношению к телу, и сумму потенциалов всех масс одного наэлектризованного тела, по отношению ко всем массам другого, потенциалом обоих тел; тогда увеличение живой силы опять-таки выразится через разность потенциалов, если предположить, что распределение электричества в телах не изменяется, что, следовательно, тела являются идиоэлектрическими. Если распределение изменяется, то изменяется количество потенциальной энергии в самих телах, и полученная живая сила может, таким образом, быть иной.

При всех методах электризации получается равное количество положительного и отрицательного электричества; при переходе электричества между двумя телами, из которых одно  $A$  имеет столько же положительного электричества, сколько другое  $B$  заключает отрицательного, половина положительного электричества переходит из  $A$  в  $B$  и наоборот половина отрицательного из  $B$  в  $A$ . Если назвать потенциалы тел самих на себя через  $W_a$  и  $W_b$ ; потенциал одного тела по отношению к другому  $V$ , то мы найдем <sup>1)</sup> все количество полученной живой силы, если мы вычтем потенциал перешедших электрических масс до их движения по отношению к другим массам и самих на себя из этих же потенциалов после движения. При этом нужно заметить, что потенциал двух масс изменяет свой знак, если его изменяет одна из масс.

Таким образом, должны быть рассмотрены следующие потенциалы:

1) перешедшего $+\frac{1}{2} E$ из $A$ самого на себя . . . . .	$\frac{1}{4} (W_b - W_a)$
по отношению к перешедшему $-\frac{1}{2} E$ . . . . .	$\frac{1}{4} (V - V)$
по отношению к покоящемуся $+\frac{1}{2} E$ . . . . .	$\frac{1}{4} (-V - W_a)$
по отношению к покоящемуся $-\frac{1}{2} E$ . . . . .	$\frac{1}{4} (-W_b - V)$
2) перешедшего $-\frac{1}{2} E$ из $B$ самого на себя . . . . .	$\frac{1}{4} (W_a - W_b)$
по отношению к перешедшему $+\frac{1}{2} E$ . . . . .	$\frac{1}{4} (V - V)$
по отношению к покоящемуся $-\frac{1}{2} E$ . . . . .	$\frac{1}{4} (-V - W_b)$
по отношению к покоящемуся $+\frac{1}{2} E$ . . . . .	$\frac{1}{4} (-W_a - V)$

---

Сумма  $-(V + \frac{W_a + W_b}{2})$

<sup>1)</sup> Именно: при сделанных здесь предположениях см. прибавление 6 (1881).



Эта величина дает нам, следовательно, максимум живой силы, которую можно получить, и количество работы, которая получится благодаря электризации.

Чтобы вместо этих потенциалов ввести в расчеты более наглядные представления, мы можем применить такое рассуждение. Представим себе, что мы построили поверхности, для каждой из которых потенциал одной лежащей на них электрической массы по отношению к одному или многим существующим в поле наэлектризованным телам, имеет постоянное значение и назовем эти поверхности поверхностями равновесия,<sup>1)</sup> то движение электрической частицы от одной точки одной поверхности к другой точке, принадлежащей другой поверхности, всегда увеличивает живую силу на равную величину; наоборот, движение по самой поверхности не изменяет скорости частицы. Следовательно, равнодействующие всех сил электрического притяжения для каждой точки пространства должны стоять нормально к поверхности равновесия, проходящей через эту точку, и каждая поверхность, к которой эти равнодействующие стоят нормально, должна быть поверхностью равновесия.

Электрическое равновесие в проводнике установится не прежде, чем равнодействующая всех сил притяжения его собственных электрических и еще других существующих в поле наэлектризованных тел будет стоять нормально к его поверхности, так как в противном случае под действием сил электрические частицы должны бы были перемещаться по поверхности. Отсюда следует, что поверхность наэлектризованного проводника сама является поверхностью равновесия, и живая сила, которую приобретает бесконечно малая электрическая частица, переходя от поверхности одного проводника к поверхности другого, является постоянной. Пусть  $C_a$  обозначает живую силу, которую получает единица положительного электричества при переходе от поверхности проводника  $A$  до бесконечности, так что  $C_a$  для положительных электрических зарядов положительно, пусть  $A_a$  потенциал того же количества электричества, если бы оно находилось в определенной точке поверхности  $A$  по отношению к  $A$ ,  $A_b$  тот же потенциал по отношению к  $B$ ,  $W_a$  потенциал  $A$  самого на себя,  $W_b$  таковая же величина для  $B$ ,  $V$  потенциал  $A$  на  $B$  и  $Q_a$  количество электричества на  $A$ ,  $Q_b$  на

<sup>1)</sup> В настоящее время эти поверхности принято называть поверхностями уровня. П. Л.

$B$ : тогда живая сила, которую получает электрическая частица  $e$  при переходе из бесконечности на поверхность  $A$ , равна

$$-e C_a = e (A_a + A_b)$$

Если подставить вместо  $e$  поочередно все электрические частицы поверхности  $A$  и вместо  $A_a$  и  $A_b$  соответствующие потенциалы и сложить все члены, то получается

$$-Q_a C_a = V + W_a$$

Точно также для проводника  $B$ :

$$-Q_b C_b = V + W_b$$

постоянная  $C$  должна быть одинакова не только для всей поверхности одного и то же проводника, но и для отдельных проводников, у которых при установлении между ними связи, не изменяющей заметно распределения их электрических, не наблюдается взаимного обмена электричеством, то-есть эта величина должна быть одинакова для всех проводников равного напряжения. Мы можем применять как меру свободного напряжения наэлектризованного тела то количество электричества, которое находится с данным телом в электрическом равновесии, заряжая шар радиуса  $= 1$ , находящийся вне пространства, где возможно влияние заряженного тела на распределение электричества. Если электричество равномерно распределено по шару, то оно, как известно, действует на наружные точки пространства так, как будто оно все целиком сосредоточено в центре шара. Обозначим через  $E$  массу электричества, радиус шара через  $R = 1$ , то для этого шара константа

$$C = \frac{E}{R} = E^1)$$

следовательно, константа  $C$  непосредственно равна свободному напряжению.

Согласно этому количество потенциальной энергии двух проводников, которые содержат равные количества  $Q$  положительного и отрицательного электричества, находится в такой форме

$$- \left( V + \frac{W_a + W_b}{2} \right) = Q \left( \frac{C_a - C_b}{2} \right).$$

<sup>1)</sup> У Гельмгольца  $C = \frac{R}{E} = E$ ; здесь есть явная опечатка. П. Л.



Так как  $C_b$  отрицательно, то алгебраическая разность  $C_a - C_b$  равна их абсолютной сумме. Если емкость проводника  $B$  весьма велика <sup>1)</sup> и, следовательно, приближенно  $C_b = 0$ , то количество потенциальной энергии равно  $\frac{1}{2} Q C_a = - \left( V + \frac{1}{2} W_a \right)$  если при этом расстояние обоих проводников весьма велико, то эта величина равна  $-\frac{1}{2} W_a$ .

Мы нашли, что живая сила, которая возникает при движении двух электрических масс, равна уменьшению суммы  $\frac{1}{2} (Q_a C_a + Q_b C_b)$ . Эту живую силу мы получаем в качестве механической энергии, если скорость, с которой электричество движется в телах, бесконечно мала по отношению к скорости распространения электрических движений; мы должны получать эту живую силу в виде тепла, если этого нет. Поэтому при разряде равных количеств противоположного электричества  $Q$  полученное тепло  $\Theta$  найдется равным

$$\Theta = \frac{1}{2a} Q (C_a - C_b),$$

где  $a$  обозначает механический эквивалент единицы тепла, или если  $C_b = 0$ , как это имеет место в батареях, у которых наружная обкладка не изолирована, и емкость <sup>2)</sup> которых есть  $S$ , так что  $CS = Q$ :

$$\Theta = \frac{1}{2a} Q C = \frac{1}{2a} \frac{Q^2}{S}.$$

Рисс <sup>3)</sup> доказал опытом, что при различных зарядах и различном количестве одинаковой конструкции лейденских банок развившееся в каждой отдельной части той же замыкающей проволоки тепло пропорционально величине  $\frac{Q^2}{S}$ . Он обозначает только через  $S$  поверхность обкладок банок. При одинаково устроенных банках эта величина должна быть пропорциональна емкости. Далее из своих опытов Ворсельман де Геер <sup>4)</sup>, равно как и Кнохенгауер <sup>5)</sup> из своих

<sup>1)</sup> У Гельмгольца Ableitungsgrösse. II. Л.

<sup>2)</sup> У Гельмгольца Ableitungsgrösse II. Л.

<sup>3)</sup> Pogg. Ann. XLIII, 47.

<sup>4)</sup> Pogg. Ann. XLVIII 292. К этой статье замечания Рисса там же стр. 320

<sup>5)</sup> Ann. LXII, 364 LXIV, 64.

исследований, заключили, что развитие тепла при той же зарядке одной и той же батареи остается тем же самым, как бы ни была изменена замыкающая батарею проволока. Последний изучил этот закон также при ветвлении замыкающей цепи и при побочных токах. Относительно величины постоянной  $a$  нет до сего времени никаких наблюдений.

Этот закон весьма легко объясняется, если мы разряд батареи будем представлять не как простое движение электричества в одном направлении, но как течение его то в одну, то в другую сторону между двух обкладок в виде колебаний, которые делаются все меньше и меньше, пока, наконец, вся живая сила не будет уничтожена суммой сопротивлений <sup>1)</sup>. В пользу того, что разрядный ток состоит из токов попеременно направленных в противоположную сторону, говорит, во-первых, изменчивое магнитное действие такого тока, и во-вторых, явление, которое наблюдал при своем опыте с разложением воды электрическими разрядами Воластон, именно, что оба рода газов развиваются на обоих электродах. Подобное предположение объясняет в то же время, почему электроды при этом опыте должны иметь по возможности малую поверхность.

Гальванизм. По отношению к гальваническим явлениям мы различаем два рода проводников: 1) такие, которые проводят по типу металлов и следуют закону ряда гальванических напряжений, и 2) такие, которые этому закону не следуют. Эти последние суть сложные жидкости и они испытывают при прохождении определенного количества электричества пропорциональное разложение.

Мы можем поэтому опытные данные разделить: 1) на такие, которые происходят только между проводниками первого рода (на зарядке различных соприкасающихся металлов не одинаковыми электричествами) и 2) на явления, происходящие в проводниках обоих классов, на электрические разности напряжений разомкнутой цепи и электрические токи в цепях замкнутых. При любой комбинации проводников первого класса не могут никогда возникать электрические токи и возникают только электрические напряжения. Эти напряжения, однако, не эквивалентны определенной величине силы, как это имеет место для ранее рассмотренных, которые создают нарушение электрического равновесия; гальванические напряжения наоборот возникают, вследствие установления электрического равнове-

<sup>1)</sup> Это явление было впоследствии строго доказано рядом исследователей, среди которых нужно назвать Н. Н. Шиллера, Федерсена и др. II. Л.



сия; благодаря им не может быть вызвано никакого движения электричества, за исключением случая изменения положения самих проводников, при чем изменяется распределение связанного электричества.

Если мы представим себе, что все металлы земли приведены в соприкосновение друг с другом, и что установилось соответственное распределение электричества, то ни при каком другом соединении металлов ни один из них не может получить изменения своего свободного электрического напряжения, прежде чем не произойдет соприкосновения с проводником второго класса. До сих пор понятие контактной силы, силы, которая действует на месте соприкосновения двух различных металлов и вызывает или поддерживает их различные электрические напряжения, не определялось более близко, чем это сделано выше, потому что старались охватить этим определением одновременно явления соприкосновения проводников первого и второго класса в то время, когда еще не знали постоянного и существенного различия обоих явлений, именно химического процесса. При этой по необходимости принятой неопределенности понятия контактная сила является силой, которая может вызвать появление бесконечного количества свободного электричества, и вместе с этим появление механических сил, тепла и света, если только был бы хотя бы один проводник второго класса, который не обнаруживал бы электролиза при проведении электричества. Именно это обстоятельство является таким фактом, который придал контактной теории, несмотря на простое и точное объяснение ею явлений, такой решительно неприемлемый характер<sup>1)</sup>. Понятие такой силы, принимаемое до сих пор, противоречит таким образом непосредственно устанавливаемому здесь нами принципу, если вместе с тем не принимать необходимости химических процессов в явлениях. Если это последнее имеет место, и мы предполагаем, что проводники второго класса именно потому не заключаются в ряду гальванических напряжений, что они проводят ток только благодаря электролизу, то понятие контактной силы тотчас же может быть упрощено и сведено к притягательной и отталкивательной силе. В самом деле, очевидно, что все явления в проводниках первого класса можно вывести из предположения, что различные химические вещества имеют различные силы притяжения по отношению к обоим

<sup>1)</sup> См. Фарадей. Опытные исследования по электричеству. 17 ряд Philos. Transact. 1840, стр. 1. No. 2071 и Pogg. Ann. LIII, 568.

электричествам и что эти силы притяжения действуют только на неизмеримо малых расстояниях, в то время как электричества действуют друг на друга и на больших расстояниях. Контактная сила должна была бы поэтому выражаться разностью сил притяжения, которые оказывают на электричества, лежащие совершенно вблизи от точки соприкосновения, металлические частицы, и электрическое равновесие наступает, если электрическая частица, переходя от одного тела к другому, не теряет и не получает избытка живой силы. Пусть  $c_1$  и  $c_2$  свободные напряжения обоих металлов,  $a_1 e$  и  $a_2 e$  живые силы, которые приобретает электрическая частица  $e$  при своем переходе к одному или другому незаряженному металлу; тогда живая сила, которую частица приобретает при переходе от одного заряженного металла к другому равна:

$$e(a_1 - a_2) - e(c_1 - c_2).$$

При равновесии это выражение должно быть  $= 0$ , следовательно,

$$a_1 - a_2 = c_1 - c_2,$$

то-есть разность напряжений должна быть постоянной у различных кусков того же металла и должна следовать закону ряда гальванических напряжений при различных металлах.

При гальванических токах мы рассмотрим по отношению к сохранению энергии, главным образом, следующие действия: развитие тепла, химические процессы и поляризацию. Электродинамические действия мы изложим при магнетизме. Развитие тепла наблюдается при всех токах; по отношению к остальным действиям мы можем для нашей цели разделить явления на такие, которые обнаруживают только химические разложения; на такие, которые показывают только поляризацию и на такие, которые обнаруживают те и другие явления.

Сначала мы изучим условия сохранения энергии в таких цепях, в которых нет поляризации, так как эти цепи являются единственными, для которых мы до сих пор имеем определенные доказанные измерения законы. Сила тока  $J$  в цепи, состоящей из  $n$  элементов, дается законом Ома:

$$J = \frac{nA}{W},$$

где постоянная  $A$  называется электродвижущей силой отдельного элемента и  $W$  сопротивлением цепи;  $A$  и  $W$  в этих цепях независимы от силы тока. Так как в течение определенного промежутка



времени действия подобной цепи в ней не изменяется ничего, кроме химических отношений и количества тепла, то закон сохранения энергии требует, чтобы количество тепла, которое может развиваться благодаря химическим процессам, и количество полученное в действительности были бы равны. В куске металлического проводника с сопротивлением  $w$  развившееся в течение времени  $t$  тепло равно по Ленцу <sup>1)</sup>

$$\vartheta = J^2 wt$$

если за единицу  $w$  принимают длину проволоки, в которой единица тока развивает в единицу времени единицу тепла. Для разветвленных замыкающих проволок, где сопротивления отдельных ветвей обозначаются через  $w_a$ , общее сопротивление  $w$  дается уравнением:

$$\frac{1}{w} = \sum \left[ \frac{1}{w_a} \right],$$

сила тока  $J_n$  в ветви  $w_n$  выражается через

$$J_n = \frac{Jw}{w_n}$$

и, следовательно, тепло  $\vartheta_n$  в той же самой ветви <sup>2)</sup>:

$$\vartheta_n = J^2 w^2 \frac{1}{w_n} t$$

и количество тепла, развившееся в целом разветвленном проводнике, равно

$$\vartheta = \sum [\vartheta_a] = J^2 w^2 \sum \left[ \frac{1}{w_a} \right] t = J^2 wt.$$

Следовательно, общее количество развившейся теплоты в цепи, имеющей любые разветвления проводов, при условии, что закон Ленца верен для жидких проводников, как это нашел Джауль, может быть выражено через

$$\Theta = J^2 Wt = nAJt.$$

Мы имеем двойного рода постоянные цепи, одни устроены по типу даниэлевского элемента и другие—по типу Грове. В первых химический процесс состоит в том, что положительный металл раство-

<sup>1)</sup> См. Pogg. Ann. LIX, стр. 203 и 407 из Bull. de l'acad. d. scienc. de St. Petersburg. 1843.

<sup>2)</sup> У Гельмгольца в собр. сочин. ошибочно  $\vartheta^n$  П. Л.

ряется в кислоте и из раствора в той же кислоте отлагается отрицательный. Примем за единицу силы тока такую, которая в единицу времени разлагает один эквивалент воды (приблизительно  $O = 1$  грам.) <sup>1)</sup> то во время  $t$  растворяется  $nJt$  эквивалентов положительного металла и столько же отлагается отрицательного. Если  $a_z$  есть тепло, которое развивает один эквивалент положительного металла, при своем окислении и растворении окиси в соответствующей кислоте и  $a_c$  то же значение для отрицательного, то в зависимости от химической реакции количество получившегося тепла есть

$$= nJt(a_z - a_c).$$

Теплота от химической реакции была бы равна теплоте развиваемой электрическим током, если

$$A = a_z - a_c,$$

то-есть если электродвижущие силы двух комбинированных таким образом металлов пропорциональны теплоте, развиваемой при их сожжении и соединении с кислотами.

В элементах, устроенных по типу элемента Грове, поляризация уничтожается таким образом, что выделяющийся водород тотчас же применяется для восстановления богатых кислородом составных частей жидкости, которая окружает отрицательный металл. К такому типу относятся элементы Грове и Бунзена: амальгамированный цинк, разведенная серная кислота, дымящаяся азотная кислота, платина или уголь; далее сюда же относятся постоянные элементы, включающие хромовую кислоту, среди которых более точно изучены комбинации: амальгамированный цинк, разведенная серная кислота, раствор кислого хромо-кислого калия с серной кислотой и медь или платина. Химические процессы в обоих элементах, заключающих азотную кислоту, одинаковы, точно так же как и в обоих элементах с хромовой кислотой. Отсюда, согласно выше сделанному выводу, должно бы следовать, что электродвижущие силы их так же должны быть равны и это весьма точно выполняется в действительности по измерениям Поггендорфа <sup>2)</sup>. Элемент с хромовой кислотой, включающий уголь, весьма непостоянен и имеет гораздо большую электродвижущую силу, по крайней мере вначале, поэтому его нельзя причислить сюда, но приходится отнести к элементам с поляризацией. У этих постоянных элементов электродвижущая сила независима от отрицательного металла; мы можем их свести к типу дани-

<sup>1)</sup> O—знак кислорода.

<sup>2)</sup> Pogg. Ann. LIV, 429 и LVII, 104.



элементарного элемента, если мы будем считать в качестве проводников первого рода непосредственно прилежащие к жидкости ближе всего лежащие около платины частицы азотной и хромовой кислоты, так что мы можем рассматривать элементы Гроуэ и Бунзена как цепи с цинком и азотной кислотой и элементы с хромовой кислотой, как цепи с цинком и окислами хрома.

Между элементами с поляризацией мы можем различать такие, которые обнаруживают только поляризацию и не показывают никакого химического действия, и такие, которые обладают тем и другим. К первым, дающим непостоянный скоро исчезающий ток, относятся в качестве наиболее простых цепей, исследованные Фарадеем<sup>1)</sup> комбинации с раствором едкого кали, сернистого кали, азотистой кислоты, далее более сильно отрицательные металлы в обыкновенных кислотах, если более из них положительный не может уже разлагать ту же кислоту, напр., медь с серебром, золотом, платиной, углем в серной кислоте и т. д.; к более сложным относятся все цепи с включенными сосудами, в которых происходит разложение и у которых поляризация превосходит электродвижущую силу остальных элементов. Определенные измерительные опыты, касающиеся силы тока этих цепей до сих пор благодаря значительной изменчивости тока не могли быть сделаны. Вообще, повидимому, сила их тока зависит от природы погруженного металла, длительность тока их растет с величиной поверхности и с уменьшением силы тока; они могут снова быть освежены, если ток почти что исчез в них путем движения пластин в жидкости и при соприкосновении пластин с воздухом, благодаря чему поляризация пластины с водородом устраняется. От подобных явлений зависит остающийся хотя и очень малый, однако не прерывающийся ток, который обычно всегда обнаруживают точные гальванометрические аппараты. Весь процесс представляет собой таким образом установление электрического равновесия частиц жидкости и металлов; при этом, повидимому, во-первых частицы жидкости располагаются иначе и затем, по крайней мере, во многих случаях<sup>2)</sup> возникают химические изменения поверхностных слоев. При сложных цепях, где поляризация первоначально одинаковых пластин зависит от действия тока других элементов, мы можем потерянную энергию первоначального тока получить в виде вторичного тока,

<sup>1)</sup> Опытные исследования по электричеству 16-й ряд. Philos. Transact. 1840 стр. I и Pogg. Ann. LII стр. 163 и 547.

<sup>2)</sup> S. Ohm в Pogg. Ann. LXIII, 389.

после того как мы удалим поляризующие элементы и соединим металлы поляризованных элементов между собой. Нам недостает пока еще специальных данных, чтобы мы могли более обстоятельно приложить здесь принцип сохранения энергии.

Более сложный случай образуют такие цепи, в которых рядом друг с другом протекает поляризация и химическое разложение; сюда относятся цепи с выделением газа. Ток этих цепей, как и ток поляризационных элементов является наиболее сильным вначале, падает быстрее или медленнее до определенной достаточно постоянной величины. В отдельных элементах этого рода, или в цепях, составленных из таких элементов, поляризационный ток прекращается весьма медленно; легче удастся получить в течение короткого времени постоянные токи при комбинации постоянных цепей с отдельными непостоянными, и именно в том случае, если пластины у последних относительно малы. Однако до сих пор на подобных составных цепях было сделано лишь немного рядов наблюдений; из небольшого числа, найденных мною, измерений Ленца<sup>1)</sup> и Поггендорфа<sup>2)</sup> вытекает, что сила тока подобных цепей при различных сопротивлениях проволок не может быть представлена простой формулой Ом а и, если постоянные этой формулы вычислены при малых силах тока, то для больших сил тока результаты расчета слишком велики. Поэтому необходимо числитель или знаменатель дроби или обе эти величины рассматривать как функции силы тока; известные до сих пор данные не дают нам никакой возможности решить, какой из этих случаев в самом деле выполняется.

Если мы попытаемся приложить принцип сохранения энергии к подобным токам, мы должны эти токи разделить на две части, на непостоянную часть или ток поляризации, относительно которого верно все то, что было сказано о чистом токе поляризации, и на постоянный ток или ток разложения. К последнему применим тот же способ рассуждения, как и к постоянному току без развития газов. Выделенное током тепло должно быть равно полученному при химическом процессе. Если, например, при комбинации цинка и отрицательного металла в разведенной серной кислоте развитие тепла при растворении атома цинка и выделении водорода равно  $a_2 - a_1$ , то полученное за время  $dt$  тепло есть:

$$J(a_2 - a_1) dt.$$

<sup>1)</sup> Pogg. Ann. LIX, 229.

<sup>2)</sup> Ann. LXVII, 531.



Если бы развитие тепла во всех частях подобной цепи было бы пропорционально квадрату силы тока, и, следовательно, равно  $J^2 W dt$ , то мы имели бы, как и раньше:

$$J = \frac{a_z - a_h}{W},$$

то-есть простую формулу Ома. Так как эта формула здесь не выполняется, то отсюда следует, что в цепи имеются сечения, в которых развитие тепла идет по другому закону, сопротивление которых, следовательно, не может быть рассматриваемо как постоянное. Если выделение тепла в каком-либо сечении прямо пропорционально силе тока, как это между прочим должно иметь место для тепла связанного при изменении агрегатного состояния и, следовательно,  $\vartheta = \mu J dt$ , то

$$J(a_z - a_h) = J^2 w + J\mu$$

$$J = \frac{a_z - a_h - \mu}{w}$$

Таким образом появилась в числителе формулы Ома величина  $\mu$ . Сопротивление подобного сечения было бы  $w = \vartheta/J^2 = \mu/J$ . Если развитие тепла, однако, не точно пропорционально силе тока, и, следовательно, величина  $\mu$  не вполне постоянна, но возрастает с силою тока, то мы получаем случай, который соответствует наблюдениям Ленца и Поггендорфа.

В качестве электродвижущей силы подобной цепи по аналогии с постоянной цепью, когда поляризация прекратилась, можно было бы считать электродвижущую силу между цинком и водородом. Говоря словами контактной теории, электродвижущая сила была бы равна электродвижущей силе между цинком и отрицательным металлом, уменьшенной на поляризацию последнего в водороде. Мы должны только в этом случае рассматривать максимум поляризации независимым от силы тока и для разных металлов различающимися настолько, насколько различаются электродвижущие силы этих металлов. Числитель формулы Ома, вычисленный из измерений сил тока при различных сопротивлениях, может кроме электродвижущих сил содержать еще слагающее, которое зависит от переходного сопротивления и которое у различных металлов, по всей вероятности, различно. Что переходное сопротивление существует, это следует, по закону сохранения энергии, из того обстоятельства, что силы токов этих цепей не могут вычисляться по закону Ома, хотя хими-

ческие процессы в них остаются одинаковыми<sup>1)</sup>. В пользу того, что в цепях, где прекращаются поляризационные токи, числитель формулы Ома зависит от природы отрицательного металла, я не мог найти до сих пор никаких определенных наблюдений. Чтобы устранить быстро токи поляризации, необходимо в данном случае, по возможности, увеличить плотность тока на поляризованных пластинках, частью при помощи введения элементов с постоянной электродвижущей силой, частью путем уменьшения поверхности этих пластинок. В относящихся сюда опытах Ленца и Савельева<sup>2)</sup>, по их собственным указаниям, постоянство тока еще не было достигнуто, вычисленные ими электродвижущие силы содержат согласно сказанному еще и поляризационные токи. Они нашли для цинка меди в серной кислоте 0,51, для цинка железа 0,76, для цинка ртути 0,90.

В заключение еще замечу, что Джемс<sup>3)</sup> была сделана попытка экспериментально обнаружить равенство количества тепла, развивающегося при химическом и электрическом процессе. Однако против его метода измерения можно многое возразить. Он предполагает, напр., для тангенс буссоли закон тангенсов справедливым вплоть до отклонений в большое число градусов, при этом он не имеет постоянного тока, но вычисляет его силу только как среднее из начального и конечного отклонений, предполагает электродвижущую силу и сопротивление элементов с выделением газа постоянным. Гесс уже указал на несогласие его количественных тепловых определений с другими наблюдениями. Тот же закон Э. Беккерель считал эмпирически подтвержденным в его заметке в *Comptes rendus* (1843, № 16).

Выше мы видели себя вынужденными свести понятие контактной силы к простым силам притяжения и отталкивания, чтобы эти силы согласовать с нашим принципом. Попробуем теперь свести к этому же электрические движения между металлом и жидкостями. Представим себе, что части сложного атома жидкости одарены различными притягательными силами по отношению к электричествам и поэтому являются электрически различными. Если эти атомные части осаждаются на металлических электродах, то каждый атом отдает электродам по электролитическому закону определенное и независимое от его электродвижущих сил количество электричества  $\pm E$ . Мы

<sup>1)</sup> Поглощение водорода металлами было еще неизвестно (1881).

<sup>2)</sup> Bull. de la classe phys. math. de l'acad. d. scienc. de St. Petersburg. T. V, стр. 1 и Pogg. Ann. LVII, 497.

<sup>3)</sup> Philos. Magaz. 1841, том. XIX, стр. 275 и 1843, XX, стр. 204.



можем поэтому себе представить, что уже в химическом соединении атомы соединены с эквивалентами электричества  $\pm E$ , которые являются для всех тел так же равными, как и стехиометрические эквиваленты весовых тел в различных соединениях. Если мы погрузим теперь два различные в электрическом отношении металла в жидкость, без того, чтобы произошел химический процесс, то положительные части жидкости притягиваются отрицательным электродом, отрицательные — положительным. Результат, таким образом, сведется к изменению направления и распределения различных электрических частиц жидкости, при чем наступление этого явления мы обнаруживаем, как ток поляризации. Движущая сила этого тока является электрической разностью металлов, и величина этой разности должна быть пропорциональна начальной величине силы; продолжительность существования этой разности должна при равной величине силы тока быть пропорциональной количеству отложившихся на пластинах атомов и, следовательно, их поверхности. При токах, связанных с химическим разложением, дело не доходит до длительного равновесия частиц жидкости с металлами, так как положительно заряженная поверхность положительного металла постоянно удаляется и благодаря этому делается сама составной частью жидкости, и, следовательно, около нее должно постоянно существовать возобновление заряда. Раз начавшееся движение ускоряется каждым атомом положительного металла, который входит в раствор, будучи соединен с эквивалентом положительного электричества, при чем атом отрицательной составной части откладывается в электрически нейтральном состоянии, если только величина силы притяжения первого атома по отношению к  $+E$ , обозначенная через  $a_2$ , будет больше чем последнего атома  $a_c$ . Движение, благодаря этому, возрастало бы безгранично по отношению к скорости, если бы одновременно не возрастала потеря живой силы благодаря развитию тепла. Движение поэтому будет ускоряться до тех пор, пока эта потеря  $J^2 W dt$  не сделается равным потребленной потенциальной энергии  $J(a_2 - a_c) dt$  или пока

$$J = \frac{a_2 - a_c}{W}.$$

И считаю, что в этом разделении гальванических токов на такие, которые вызывают поляризацию, и на такие, которые вызывают разложение, как оно обусловлено принципом сохранения энергии, является единственный выход, чтобы обойти одновременно затруднения химической и контактной теории.

Термоэлектрические токи. При этих токах мы должны искать источники энергии в явлениях, найденных Пельтье на местах спайки, которые могут возбудить ток, противоположный данному.

Представим себе постоянный гидроэлектрический ток, в проводящую проволоку которого впаян кусок другого металла, места спая которого имеют температуры  $t'$  и  $t''$ , тогда электрический ток в течение элемента времени  $dt$  выделит во всем проводнике количество тепла  $J^2 W dt$ , кроме того на одном спае выделится тепло  $q_1 dt$ , на другом поглотится  $q_2 dt$ . Если  $A$  есть электродвижущая сила гидроэлектрической цепи и, следовательно,  $AJ dt$  возникающее при химических процессах тепло, то из закона сохранения энергии следует

$$AJ = J^2 W + q_1 - q_2. \quad (1)$$

Пусть  $B_t$  есть электродвижущая сила термо-цепи; если один спай имеет температуру  $t$  и другой какую-либо постоянную температуру, напр., температуру  $0^\circ$ , то для всей цепи

$$J = \frac{A - B_t + B_0}{W}$$

при  $t_1 = t_2$  получится

$$J = \frac{A}{W}.$$

Если это ввести в уравнение (1) то находится:

$$q_1 = q_2,$$

т.-е. при равных температурах мест спая того же металла и при одинаковой силе тока выделенное и поглощенное количества тепла равны, независимо от поперечного сечения.

Если бы мы могли предположить, что этот процесс является одинаковым в каждой точке сечения, то отсюда следовало бы, что количества тепла, развивающиеся на равных площадях разных сечений одним и тем же током, относятся между собой как плотности тока, и отсюда следует далее, что количества тепла, развивающиеся при разных токах в целом сечении, относятся как силы тока.

Если места спая имеют разную температуру, то из уравнений (1) и (2) следует, что

$$(B_t' - B_t'') J = q_1 - q_2$$



и, следовательно, что при равных силах тока сила, вызывающая и связывающая тепло, изменяется с температурой так же, как и электродвижущая сила.

Для подтверждения обоих следствий мне неизвестны никакие измерительные опыты.

## VI. Эквивалент энергии магнетизма и электромагнетизма.

Магнетизм. Магнит, благодаря своей притягательной и отталкивательной силе по отношению к другим магнитам и немагнитному железу, способен сообщать телам определенную живую силу. Так как явления притяжения магнитов могут быть выведены из представления о двух жидкостях, которые притягиваются и отталкиваются обратно пропорционально квадрату расстояния, то из этого одного следует согласно выводу, данному в начале нашего сочинения, что при движении магнитных тел друг по отношению к другу должен выполняться принцип сохранения энергии. Ввиду приложений этих явлений к теории индукции, мы должны несколько глубже войти в законы этих движений<sup>1)</sup>.

1) Пусть  $m_1$  и  $m_2$  две элементарных магнитных массы, единица которых такова, что одна масса на расстоянии  $= 1$  отталкивает другую, равную с силой  $= 1$ ; если обозначить противоположные магнетизмы противоположным знаком и назвать через  $r$  расстояние  $m_1$  и  $m_2$ , то величина центральной силы, действующей между ними, есть

$$\varphi = - \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Увеличение живой силы при переходе из бесконечного расстояния к расстоянию  $r$  равно  $-\frac{m_1 m_2}{r}$ .

2) Назовем эту величину потенциалом обоих элементов и распространим понятие потенциала на магнитные тела, как это было сделано для электричества; мы получим увеличение живой силы при движении двух тел с неизменяющимся магнетизмом, следовательно, при движении стальных магнитов, если мы из значения потенциала в конце движения вычтем значение его в начале дви-

<sup>1)</sup> Изменения к этому месту находятся в следующем приложении (1881).

жения. Наоборот, увеличение живой силы при движении магнитных тел, распределение у которых изменяется, подобно тому, как это имеет место при электричествах, измеряется изменением суммы

$$V + \frac{1}{2} (W_a + W_b),$$

где  $V$  потенциал тел друг по отношению к другу,  $W_a$  и  $W_b$  потенциалы тел самих на себя. Если тело  $B$  — неизменяемый — стальной магнит, то приближение тела с изменяющимся магнетизмом создает живую силу, равную увеличению суммы  $V + \frac{1}{2} W_a$ .

3) Известно, что действия магнитов во внешнем пространстве могут быть заменены действием определенного распределения магнитных жидкостей на их поверхности. Мы можем, следовательно, вместо потенциалов магнитов поставить потенциалы подобных поверхностей. Тогда, подобно тому, как это имеет место для электричества у электрически проводящих поверхностей, мы находим для вполне мягкого железа  $A$ , которое намагничивается влиянием магнита  $B$ , увеличение  $C$  живой силы, на единицу количества положительного магнетизма, при переходе от поверхности железа в бесконечность, выражено уравнением

$$-QC = V + W_a.$$

Так как каждый магнит содержит столько же северного, сколько южного магнетизма, и, следовательно,  $Q$  в каждом магните равно 0, то для подобного куска железа или для куска стали с той же самой формой, положением и распределением магнетизма, у которого, следовательно, магнетизм всецело обусловлен магнитом  $B$

$$V = -W_a.$$

4)  $V$  есть живая сила, которую возбуждает стальной магнит при своем приближении вплоть до связывания своих магнетизмов; эта живая сила должна быть, согласно указанному уравнению, той же самой, к какому бы магниту данный магнит ни приближался, если только дело идет о полном связывании, так как  $W_a$  остается постоянно тем же самым. Наоборот, живая сила равного куска железа, которое приближается до тех пор, пока распределение магнетизма у него делается то же самое, равна, как это было показано выше:

$$V + \frac{1}{2} W = -\frac{1}{2} W$$



и, следовательно, равна только половине живой силы уже намагниченного куска; необходимо отметить, что  $W$  само по себе отрицательно и, следовательно,  $-\frac{1}{2}W$  всегда положительно.

Если кусок стали приближается к задающему распределение магниту, не будучи намагниченным, и сохраняет при удалении полученный магнетизм, то при этом теряется механическая работа  $-\frac{1}{2}W$ , но зато магнит может произвести работу на  $-\frac{1}{2}W$  большую, чем это мог сделать раньше кусок стали.

Электромагнетизм. Электродинамические явления сведены Ампером к притягательным и отталкивательным силам элементов тока, величина которых зависит от скорости и направления токов. Его вывод при этом не включает явлений индукции. Эти последние явления вместе с явлениями электродинамическими сводятся Вебером к притягательным и отталкивательным силам самих электрических жидкостей, при чем величина сил зависит от скорости приближения или удаления и от ее изменения. До сих пор еще не найдено никакой гипотезы, при помощи которой эти явления могли бы быть сведены к постоянным центральным силам. Законы наведенных токов развиты Нейманом<sup>1)</sup>, когда он распространил опытно найденный для всего тока закон Ленца на мельчайшие части тока и эти законы при замкнутых токах согласуются с выводами Вебера. Точно так же законы Ампера и Вебера для электродинамических действий замкнутых токов согласуются с выводом их из сил вращения Грассмана<sup>2)</sup>. Далее опыт нам не дает ничего, так как до сих пор эксперименты производились только с замкнутыми или почти замкнутыми токами. Мы приложим наш принцип поэтому только к замкнутым токам и покажем, что из него вытекают те же законы.

Уже Ампером было доказано, что электродинамические действия замкнутого тока всегда могут быть заменены определенным распределением магнитных жидкостей на любой поверхности, имеющей те же границы, как и ток. Нейман поэтому перенес понятие потенциала на замкнутые токи, подставив вместо потенциала этих токов потенциал указанных выше поверхностей.

5) Если магнит движется под влиянием тока, то живая сила, которую он приобретает, должна получаться из потенциальной энер-

гии, которую теряет ток. Эта последняя равна в течение времени  $dt$  согласно уже применявшемуся способу обозначения  $AJdt$  в тепловых единицах или  $aAJdt$  в механических единицах, если  $a$  есть механический эквивалент тепла. Полученная в проводнике живая сила равна  $aJ^2Wdt$ , полученная магнитом  $\frac{JdV}{dt}$ , где  $V$  потенциал магнита по отношению к тому же проводнику при пропускании через последний единицы силы тока. Таким образом

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

и, следовательно,

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

Мы можем назвать величину  $\frac{1}{a} \frac{dV}{dt}$  новой электродвижущей силой индукционного тока. Она действует всегда обратно той электродвижущей силе, которая перемещает магнит в направлении, в котором он движется, или которая увеличивает его скорость. Так как эта электродвижущая сила независима от силы тока, то она должна остаться той же самой, если бы перед движением магнита не существовало никакого тока.

Если сила тока меняется, то полный в течение определенного времени наведенный ток равен

$$\int Jdt = -\frac{1}{aW} \int \frac{dV}{dt} dt = \frac{1}{a} \frac{(V_1 - V_2)}{W},$$

где  $V_1$  — потенциал в начале и  $V_2$  — потенциал в конце движения. Если магнит приближается с весьма большого расстояния, то

$$\int Jdt = -\frac{1}{a} \frac{V_2}{W}$$

независимо от пути и скорости магнита.

Мы можем выразить закон таким образом: общая электродвижущая сила индукционного тока, который вызывается перемещением магнита по отношению к замкнутому проводнику, равна изменению, которое происходит в потенциале магнита по отношению к провод-

<sup>1)</sup> Pogg. Ann. LXVII, 31.

<sup>2)</sup> Ann. LXIV, 1.



нику, если через последний протекает ток  $-\frac{1}{a}$ . Единицей электродвижущей силы является такая единица, которая создает произвольную единицу тока в проводнике с сопротивлением, равным единице. Единицей сопротивления является такая, в которой единица тока в течение единицы времени развивает единицу тепла.

Тот же закон имеется у Неймана [цитиров. место § 9], только у него вместо  $\frac{1}{a}$  стоит неопределенная постоянная  $\varepsilon$ .

6) Если магнит движется находясь под влиянием проводника с током, по отношению к которому его потенциал при единице тока равен  $\varphi$ , и под влиянием намагниченного действием проводника куска железа, по отношению, к которому его потенциал для магнетизма создаваемого единицей тока есть  $\chi$ , то как и прежде имеется:

$$aAJ = aJ^2W + J \frac{d\varphi}{dt} + J \frac{d\chi}{dt}$$

и, следовательно:

$$J = \frac{A - \frac{1}{a} \left( \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\chi}{dt} \right)}{W}$$

Электродвижущая сила тока индукции, которая зависит от присутствия куска железа, равна, следовательно:

$$-\frac{1}{a} \frac{d\chi}{dt}$$

Если в электромагните благодаря току  $n$  создается то же самое распределение магнетизма, как и благодаря приближению магнита, то согласно сказанному в Nr. 4 потенциал электромагнита по отношению к магниту  $-n\chi$  должен равняться его потенциалу по отношению к проводящей проволоке  $nV$ , если  $V$  обозначает потенциал при единице тока. Таким образом  $\chi = V$ . Таким образом, если индукционный ток вызывается тем, что кусок железа намагничивается благодаря расположению магнитов, то электродвижущая сила равна —

$-\frac{1}{a} \frac{d\chi}{dt} = -\frac{1}{a} \frac{dV}{dt}$  и общий ток, как и в Nr. 7, равен

$$\int J dt = \frac{1}{a} (V_1 - V_2)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  потенциалы намагниченного железа по отношению к проводящей проволоке до и после намагничивания. Нейман выводит этот закон из аналогии с предыдущим случаем.

7) Если электромагнит намагничивается под влиянием тока, то благодаря индукционному току теряется тепло; если кусок железа мягкий, то при размыкании тот же индукционный ток пойдет в обратном направлении и тепло будет снова приобретено. Если это есть кусок стали, сохраняющей свой магнетизм, то теплота теряется, и вместо нее мы получаем магнитную силу, способную создать работу, равную половине потенциала магнита при полном связывании магнетизма, как это было показано в Nr. 4. Из аналогии предыдущего случая является вероятным, что электродвижущая сила соответствует полному потенциалу, как это заключил и Нейман, и что часть движения магнитных жидкостей, благодаря быстроте его, является потерянной в качестве тепла, при чем эта часть приобретается магнитами.

8) Если двигаются, друг по отношению к другу, два проводника с током, то силы тока будут в обоих проводниках изменены. Если  $V$  их потенциал, друг по отношению друга, при силе тока, равной единице, то как и в предыдущем случае и на тех же основаниях должно быть

$$A_1 J_1 + A_2 J_2 = J_1^2 W_1 + J_2^2 W_2 + \frac{1}{a} J_1 J_2 \frac{dV}{dt}$$

Если сила тока в одном проводнике  $W_2$  значительно меньше, чем в другом  $W_1$ , так что электродвижущая сила индукции, которая возбуждается в  $W_2$  проводником  $W_1$ , по отношению к  $A_1$  исчезающе мала, и мы можем положить  $J_2 = \frac{A_1}{W_1}$ , то мы находим

$$J_2 = \frac{A_2 - \frac{1}{a} J_1 \frac{dV}{dt}}{W_2}$$

Электродвижущая сила индукции таким образом оказывается той же самой силой, которую создал бы магнит, который имел бы ту же электродинамическую силу, как и индуцирующий ток. Этот закон обнаружил экспериментально В. Вебер<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Elektrodynamische Maasbestimmungen стр. 71—75.



Если, наоборот, сила тока в  $W$ , бесконечно мала по отношению к силе тока в  $W''$ , то

$$J_1 = \frac{A_1 - \frac{1}{a} J'' \frac{dV}{dt}}{W_1}.$$

Электродвижущие силы проводников друг по отношению к другу равны, если силы токов равны, какова бы ни была форма проводников.

Общая сила индукции, которая в течение определенного движения проводников, друг по отношению к другу, создает ток, который сам благодаря индукции не изменяется, равна по сказанному опять-таки изменению потенциала проводника по отношению к другому, через который течет ток  $-\frac{1}{a}$ . В такой форме Нейман выводит закон из аналогии магнитных и электродинамических сил (цитир. место § 10) и распространяет его также на случай, где индукция вызывается в покоящихся проводниках усилением или ослаблением тока. В. Вебер показывает согласие своего предположения об электродинамической силе с этой теоремой (цитир. место, стр. 147—153). Из закона сохранения энергии для этого случая нельзя получить никакого определения этой величины; благодаря обратному действию индуцированного тока на индуцирующий должно наступать только ослабление последнего, который дает такую же потерю тепла, какая приобретается наведенным током. Это же соотношение между начальным ослаблением тока и экстра-током должно существовать при действии тока самого на себя. Никаких дальнейших выводов, однако, отсюда нельзя получить, так как форма нарастания тока неизвестна и, кроме того, омовский закон неприменим сюда непосредственно, так как эти токи могут не совершенно одновременно протекать через всю длину проводников.

Из известных процессов природы нам остается рассмотреть только процессы в организованном существе. Процессы в растениях являются по большей части химическими и, кроме того, по крайней мере, в некоторых из них имеется небольшое развитие тепла. В них по преимуществу отлагается огромное количество потенциальной энергии, эквивалент которой доставляется нам в виде тепла при сжигании вещества растений. Единственной живой силой, которая погло-

щается для этого по нашим современным сведениям в течение роста растения, являются химические лучи солнечного света. У нас еще совершенно нет данных для ближайшего сравнения эквивалентов энергий, которые здесь теряются или получаются. Для животных мы уже имеем некоторые более точные опорные пункты. Эти последние воспринимают сложные окислимые соединения, которые произведены растениями и, кроме того, кислород и отдают эти вещества обратно частью после сжигания в виде углекислоты и воды, частью в виде простых соединений; таким образом животные поглощают определенное количество химических скрытых сил и за счет этого производят теплоту и механическую работу. Так как механическая работа составляет относительно малую часть по отношению к количеству тепла, то вопрос о сохранении энергии сводится, в конце концов, к вопросу, вызывает ли сжигание и превращение веществ, служащих для питания, то же самое количество тепла, какое отдают животные. На этот вопрос по опытам Дюлонга и Дебре, по крайней мере, с известным приближением можно ответить утвердительно<sup>1)</sup>.

Наконец я должен упомянуть о некоторых замечаниях Маттеуччи против проведенной в этой статье точки зрения, которые находятся в *Biblioth. univ. de Genève Suppl. № 16 — 1847. 15 Mai* стр. 375. Он исходит из предположения, что химический процесс мог бы выделять различное количество тепла в том случае, если бы он одновременно производил электричество, магнетизм или свет, если бы этого не было. Он приводит данные, стремящиеся доказать на основании ряда его измерений, что цинк при растворении в серной кислоте дает столько же тепла в том случае, если тепло освобождается при действии химического средства, как и в том случае, если цинк образует с платиной цепь, и что электрический ток отклоняющий магнит, производит такие же химические и тепловые действия, как и без отклонения. То обстоятельство, что Маттеуччи рассматривает эти данные, как возражения, основано на полном непонимании взгляда, который он желает опровергать, как это тотчас же легко выяснится из сравнения этих соотношений с нашими представлениями. Кроме этого, он приводит два калориметрические

<sup>1)</sup> Ближе я разбираю этот вопрос в *Encycl. Wörterbuch der medicinischen Wissenschaften, Art. „Wärme“*. (Сочин. Гельмгольца, том II) в *Fortschritte der Physik im Jahre 1845, dargestellt von der physikalischen Gesellschaft*. (Сочин. Гельмгольца, том I, № 1).



опыта относительно количества тепла, которое развивается при соединении едкого бария с концентрированной или разведенной серной кислотой, и относительно тепла, которое получается в проволоке, помещенной в газах, обладающих различной способностью охлаждения, и нагреваемый одним и тем же электрическим током, причем массы газа и проволока то делались раскаленными, то нет. Он находит количество тепла в первом случае не меньше, чем во втором. Если, однако, принять во внимание несовершенство наших калориметрических методов, то нельзя удивляться, что в этом случае не могла быть констатирована разница охлаждений через лучеиспускание, которое может зависеть от того, что это излучение смотря по тому, является ли оно лежащим в видимой части спектра или в невидимой, будет проникать легче или труднее через прозрачную среду. В первом опыте Маттеуччи при соединении бария с серной кислотой эксперимент производился к тому же в непрозрачном сосуде из свинца, из которого лучи видимой части спектра совершенно не могли выйти. Мы можем совсем не говорить о несовершенстве методов Маттеуччи при этих измерениях.

Я думаю, что приведенные данные доказывают, что высказанный закон не противоречит ни одному из известных в естествознании фактов и поразительным образом подтверждается большим числом их. Я постарался установить по возможности полно следствия, которые получаются из комбинации этого закона с известными до сих пор законами естественных явлений, и которые еще должны ожидать своего подтверждения на опыте. Цель этого исследования, которая может мне извинить и гипотетическую часть его, представить физикам в возможной полноте теоретическое, практическое и эвристическое значение этого закона, полное подтверждение которого должно быть рассматриваемо, как одна из главных задач ближайшего будущего физики.

## ПРИБАВЛЕНИЯ.

(1881 г.)

1) К стр. 6. Философские соображения, приведенные во введении, находились под более сильным влиянием воззрений Канта в области теории познания, чем это я могу признать в настоящее время допустимым. Я уже позднее ясно понял, что принцип причинности в действительности есть не что иное, как допущение закономерности всех явлений природы. Мы называем силой то, что закон признает за объективный факт. Причина по своему первоначальному слово-

образованию есть то, что после смены явлений является остающимся или существующим; таковым, именно является вещество и законы его действия, сила. Затронутая на стр. 7 невозможность мыслить эти оба понятия изолированными весьма просто вытекает из того, что закон определенного воздействия предполагает условия, при которых он может обнаружить свою способность вызывать действие. Отделенная от материи сила явилась бы объективированием закона, для которого не доставало бы условий, подходящих для проявления действия.

2) К стр. 8. Необходимость разложения сил на такие силы, которые относятся к точкам, может быть выведена для масс, на которые действуют силы из принципа полной возможности понимания природы, поскольку недостает полного знания движения и если движение каждой отдельной материальной точки не может быть задано. Но подобная необходимость, как мне кажется, не существует для масс, из которых исходят силы. Я уже высказал это в предыдущем параграфе. Рассуждения в I и II гл. текста допустимы только тогда, если эта разложимость на силы, действующие на точки, уже признается с самого начала существующей. Силы движения, как они определены Ньютоном, силы, которые являются равнодействующими всех отдельных сил, складываемых по закону параллелограмма, силы, которые исходят из всех отдельных существующих элементов масс, я могу только признать, как найденный опытом естественный закон. Он выражает положение: ускорение, которое получает материальная точка, если действуют совместно многие причины, является равнодействующей (геометрической суммой) тех ускорений, которые могли бы сообщить отдельные причины, действуя порознь. Конечно может встретиться при опыте, что два тела, напр., два магнита, которые действуют одновременно на третий, обнаруживают силу, которая не является простой равнодействующей сил, которые обнаруживали бы магниты, взятые по отдельности. Мы выходим в этом случае из затруднения, говоря, что каждый отдельный магнит изменяет в другом распределение невидимой и невесомой субстанции. Однако я не могу более признать принцип возможности понимания выполняющимся по отношению к следствиям, что действие, возникающее благодаря одновременному существованию двух или многих причин движения, необходимо должно быть найдено путем геометрического суммирования из действий отдельных причин. Это фактическое содержание второй аксиомы Ньютона, равно как и высказанный выше принцип, что силы, с которыми две массы действуют друг на друга, с точностью определяются, если известны места масс, совершенно игно-



рируются в тех электродинамических теориях, которые допускают, что сила между электрическими массами зависит от скорости и ускорения.

Сделанные в этом направлении опыты приводили всегда к противоречию с механическим принципом равенства действия и противодействия, принципом в точности, без исключения выполняющимся в пределах нашего настоящего опыта и к противоречию с постоянством энергии. Если бы для электричества в проводниках существовало только неустойчивое равновесие, то благодаря этому исчезла бы однозначность и определенность решений электрических проблем, и если признать силу зависящей от абсолютного движения, то-есть от изменяющегося отношения массы по отношению к некоторой сущности, которая никогда не может сделаться предметом возможного восприятия, именно по отношению к неимеющему отличий пустому пространству, то это, как мне кажется, могло бы явиться предположением, которое давало бы надежду на полное решение всех естественно-исторических задач, что по моему мнению необходимо было бы сделать, только в том случае, если все другие теоретические возможности были бы исчерпаны.

3) К стр. 12. Это многократно применявшееся доказательство является недостаточным для случая, когда сила должна зависеть от скоростей или ускорений, на что обратил мое внимание Л и п ш и т ц.

В самом деле, можно положить:

$$\begin{aligned} X &= \frac{dU}{dx} + Q \frac{dz}{dt} - R \frac{dy}{dt} \\ Y &= \frac{dU}{dy} + R \frac{dx}{dt} - P \frac{dz}{dt} \\ Z &= \frac{dU}{dz} + P \frac{dy}{dt} - Q \frac{dx}{dt} \end{aligned}$$

где  $U$  есть функция координат,  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ —функция координат и их производных, тогда

$$X \frac{dx}{dt} + Y \frac{dy}{dt} + Z \frac{dz}{dt} = \frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} m q^2 \right]$$

и, следовательно, живая сила есть функция координат. Прибавки к слагающим силы, снабженные множителями  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ , представляют равнодействующую силу, которая перпендикулярна к результирующей скорости подвижной точки. Подобная сила, как понятно, изменила бы кривизну траектории, но не живую силу.

Если признать справедливость закона действия и противодействия и признать разложимость силы на силы, действующие на точки, то установленная в тексте общая теорема справедлива. В самом деле, указанный закон допускает для пары точек только силы, которые имеют по направлению линии, соединяющей точки, равную величину и противоположное направление. Силы, перпендикулярные к скоростям, получались бы поэтому только в те моменты когда обе скорости точек были бы перпендикулярны к линии их соединяющей.

Заключительный вывод должен заключать сделанные в примечании дополнения.

4) К стр. 19. Эта теорема также слишком обща, так как мы должны все предыдущие теоремы ограничить случаем, когда вообще имеет место равенство действия и противодействия. Если мы этого не будем признавать, то недавно установленный Клаузиусом электродинамический закон обнаруживает случай, когда силы, которые зависят от скоростей и ускорений, не могут дать бесконечной движущей силы.

5) К стр. 31. К истории открытия закона сохранения энергии здесь следует еще прибавить, что Р. Майер опубликовал в 1842 г. свою статью „О силах в неживой природе“<sup>1)</sup> и в 1845 г. работу: „Органическое движение в ее связи с обменом веществ“ (Гейльбронн). Уже в первой статье высказано убеждение в эквивалентности тепла и работы и вычислен эквивалент тепла в 365 килогр. метр тем же путем, каким это произведено в тексте, где указан этот расчет, как расчет Гольцманна. Вторая статья по своей цели в существенных чертах совпадает с моей. Я узнал об обеих статьях только позднее, и с тех пор как я обе их узнал, всякий раз, когда я публично говорил об установлении излагаемого здесь закона<sup>2)</sup>, я всегда в первую очередь называл Р. Майера, точно так же я всегда оказывал защиту его притязаниям, насколько я смог это сделать против друзей Джауля, которые склонны были их совершенно отрицать. Одно письмо, написанное мной к П. Г. Тэту, напечатано им в предисловии к его книге: Sketch of Thermodynamics (Edinburgh, 1868). Я его приведу здесь:

<sup>1)</sup> Annalen der Chemie und Pharmacie von Wöhler und Liebig. Том XLII стр. 233. Обе статьи перепечатаны в Mechanik der Wärme в собрании сочинений Майера (Stuttgart-gotta, 1867).

<sup>2)</sup> См. популярно-научные речи Гельмгольца: тетрадь II, стр. 112 (1854). Там же стр. 141 (1862), там же, стр. 194 (1869).



„Я должен сказать, что открытия Кирхгоффа в этой области (излучение, абсорбция) представляются поучительнейшим случаем в истории науки, главным образом потому, что многие другие исследователи уже раньше стояли вплотную перед этим открытием.

Предшественники Кирхгоффа стоят к нему в таком же отношении, как по отношению сохранения энергии стоят Роберт Майер, Кольдинг и Сеген к Джаулю и В. Томсону.

Что касается до Роберта Майера, то я могу понять ту точку зрения, которую вы имеете по отношению к нему, однако, я не могу упустить случая, чтобы не сказать, что я сам не разделяю того же самого мнения. Успехи естествознания зависят от того, что из существующих фактов образуются все новые обобщения, которые, поскольку они касаются новых фактов, могут быть сравнены путем опыта с действительностью. Необходимость этого второго обстоятельства не подлежит никакому сомнению. Часто эта вторая часть требует большой затраты работы и остроумия, и огромная заслуга приписывается тому, кто это хорошо доводит до конца. Но слава открытия принадлежит и тому, кто нашел новую идею; экспериментальная проверка после этого является более механическим способом работы. Невозможно также непременно требовать, чтобы человек, открывший идею, должен был выполнить и вторую часть работы. Если бы это было так, мы должны бы были отвергнуть большую часть работы всех математических физиков. В. Томсон также выполнил ряд теоретических работ относительно закона Карно и его следствий, прежде чем он выполнил единственный эксперимент по этому поводу, и никому из нас не придет в голову именно поэтому низко расценивать его работы.“

„Роберт Майер был не в состоянии поставить опыты; его отвергли известные ему физики (еще много лет спустя то же произошло и со мной); он мог только с большим трудом получить место для опубликования своего первого короткого сообщения. Вы знаете, что благодаря этому отказу в признании он-сделался душевнобольным. Теперь трудно проникнуть в круг мыслей того времени и уяснить себе, насколько новой представлялась тогда эта вещь. Мне кажется, что Джауль точно также должен был долгое время бороться за признание его открытия.“

„Таким образом хотя никто не будет отрицать, что Джауль сделал гораздо больше, чем Майер, и что в первой статье последнего многие детали еще неясны, я думаю, однако, что нужно рассматривать Майера, как человека, который независимо и самосто-

ятельно нашел идею, которая обусловила величайшие новые успехи в естествознании; его заслуга не сделается меньше от того, что в то же время другой человек в другой стране и в другом кругу сделал то же открытие, и провел его позднее лучше, чем он.“

В новейшее время приверженцы метафизической спекуляции пытались объявить, что закон сохранения энергии а priori должен быть справедливым, и поэтому выставляли Р. Майера, как героя в области чистой мысли. То, что они рассматривали, как вершину достижений Майера, именно метафизически сформулированные кажущиеся доказательства этого закона представляются каждому привыкшему к строгой научной методике естествоиспытателю, наоборот, как наиболее слабое место его рассуждений, и это, несомненно, было причиной, почему работы Майера в естественно-научных кругах оставались так долго неизвестными. И только, когда убеждение в справедливости закона проложило себе путь с другой стороны, именно, благодаря мастерским работам Джауля, было обращено внимание на статьи Майера.

Во всяком случае этот закон, как и все знания об явлениях в реальном мире, был получен индуктивным путем. То обстоятельство, что нельзя построить никакого *perpetuum mobile*, т.-е. что нельзя получить безграничного количества движущейся силы без соответствующих затрат, явилось, после многих напрасных попыток осуществить это, постепенно осознанным выводом.

Уже давно французская Академия поставила *perpetuum mobile* в категории тех задач, к которым относится квадратура круга, и решила не принимать больше никаких мнимых решений этой задачи. Это, конечно, должно быть рассматриваемо, как выражение широко распространенного среди специалистов убеждения. Уже во время моего пребывания в школе я сам достаточно часто слышал выражение этого убеждения и слышал объяснение недостаточности приводимых для этого доказательств. Вопрос о природе животной теплоты требовал старательного и полного объяснения всех фактов, которые имели к этому отношение. Когда я напал на эту работу, я всегда ее рассматривал только как критическую, а совершенно не как оригинальное открытие, о приоритете которого может быть спор. Я был после этого до некоторой степени удивлен тем сопротивлением, которое я встретил в кругу специалистов; мне было отказано в приеме работы в *Poggendorf's Annalen* и среди членов берлинской академии был только математик К. Г. И. Якоби, принявший мою сторону. Слава и внешнее поощрение в то время при суще-



ствовавшем убеждении не могли быть достигнуты, скорее могло быть обратное; то обстоятельство, что я сам при составлении статьи совершенно не думал о принадлежащем мне приоритете, как старались это выставить мои противники с метафизическим направлением, я полагаю, устанавливается совершенно ясно тем, что я цитировал других исследователей, которые работали в этом направлении, насколько я их знал. Ввиду этих мною цитированных работ, именно работ Джауля, для меня в это время не могло быть больше речи о признании права на приоритет, поскольку вообще может быть речь о приоритете по отношению к общему принципу.

Если мои литературные знания ко времени 1847 года были еще неполны, я прошу это извинить тем, что я обработал предполагаемое сочинение в городе Потсдаме, где мои литературные пособия ограничивались библиотекою гимназии, находящейся там же, и что тогда не существовало Fortschritte der Physik Берлинского Физического Общества и других пособий, при помощи которых теперь весьма легко ориентироваться в физической литературе.

6) К стр. 33. Понятие потенциала тела относительно электрического заряда самого на себя здесь принято несколько в ином смысле, чем это обычно делалось позднее в научной литературе. Я не мог в весьма бедной, доступной мне тогда литературе найти ни одного предшественника для употребления этого понятия и поэтому при его образовании я руководился аналогией потенциала двух различных зарядов друг по отношению к другу (в тексте  $V$ ). Если носителей обоих представить способными к совпадению и соответствующие части поверхности допустить одинаково сильно заряженными, то можно образовать потенциал  $V$  обеих поверхностей. Теперь можно мыслить оба тела переведенными к совпадению друг с другом; тогда  $V$  будет то, что я здесь обозначил через  $W$ ; в нем каждая комбинация каждых двух электрических частиц  $e$  и  $\epsilon$  входит в вычисление два раза. Полученное таким образом  $W$  есть уже не значение работы, как это показано и в тексте, но последняя равна  $\frac{1}{2} W$  (стр. 33). В моих более поздних работах я примкнул к более целесообразным обозначениям других авторов и обозначал  $\frac{1}{2} W$  как потенциал тела самого на себя.

## Г. Гельмгольц.

Герман-Людви-Фердинанд Гельмгольц родился 31 августа 1821 г. в Потсдаме, где отец его занимал должность учителя в гимназии. С материнской стороны Гельмгольц имел английскую кровь, так как мать Гельмгольца происходила из английской семьи, переселившейся в Германию. По окончании гимназии Гельмгольц вступил в качестве студента в медико-хирургический институт, где под влиянием знаменитого Иоганесса Мюллера заинтересовался гистологией и физиологией. При окончании школы Гельмгольц выбрал для диссертации тему о строении нервной системы (*De fabrica systematis nervosi evertibratorum*), которую и защитил в 1843 году. В этой своей первой работе он впервые доказал, что известные до того времени элементы нервной системы, нервные клетки и волокна, соединены друг с другом и составляют части неразрывного целого.

В 1843 году Гельмгольц был назначен военным врачом в Потсдаме, где в период брожения и революционного движения в Германии и сложилась его работа о сохранении силы, находящаяся в предлагаемом сборнике. Работа эта, положившая основание всемирной известности Гельмгольца, дала возможность ему получить место преподавателя анатомии в академии художеств в Берлине, а в следующем году (1849) он по рекомендации И. Мюллера был приглашен профессором физиологии в Кенигсберг. Здесь же в Кенигсберге Гельмгольц женился на Ольге фон Фельтен. Первый период деятельности заключал в себе работы, тесно связанные с законом сохранения энергии; в 1847 и 1848 годах появляется его работа о тепловых явлениях при мускульном сокращении, являющаяся непосредственным следствием приложения принципа сохранения энергии к физиологии. Далее в это же время Гельмгольц опубликовал интересную работу о построении тангенс-буссоли.

В Кенигсберге появляется ряд исследований Гельмгольца о скорости распространения возбуждения в нервах, которые показали в нем не только глубокого мыслителя, но и гениального экспериментатора. Здесь же Гельмгольцу удалось осуществить построение глазного зеркала, позволяющего видеть у живого человека дно глаза и играющего в настоящее время огромную роль при диагностике не только специально глазных болезней, но и при диагностике нервных заболеваний (опухоль мозга, сухотка спинного мозга и т. д.).

В Кенигсберге же Гельмгольц начал интересоваться общим вопросом об отношении воздействий окружающего мира и реакцией организма; наряду с имеющей философское значение работой о природе ощущений у человека Гельмгольц предпринял глубокое физическое изучение глаза. Работы эти завели Гельмгольца далеко за пределы физиологии и в ряде блестящих, гениальных работ Гельмгольц дал теорию ощущения сложных цветов, заложенную впервые работами великого врача-физика Юнга. В Кенигсберге Гельмгольц начал свои систематические исследования об аккомодации глаза, здесь были заложены основания для работ его по акустике.



В 1855 году Гельмгольц перешел профессором анатомии и физиологии в Бонн, а в 1858 г. профессором физиологии в Гейдельберг.

Этот период явился наиболее блестящим и глубоким по своим последствиям периодом работы Гельмгольца. Здесь наряду с глубокими работами по физиологической оптике, перестроившими все учение о распространении лучей в глазу, о цветах и их смешении, о пространственном зрении, и трудами по физиологической и физической акустике, к которым относятся исследования Гельмгольца о резонаторах, о составе гласных, о комбинационных тонах, зарождаются и глубокие математические исследования по гидродинамике, представляющиеся одними из наиболее крупных успехов этой области математической физики с самого ее основания <sup>4)</sup>.

Во время пребывания в Гейдельберге у Гельмгольца в связи с его исследованиями по физиологической оптике зародилась мысль о происхождении геометрических аксиом, развитая им в ряде классических статей.

В гейдельбергский период скончалась первая жена Гельмгольца (1859 г.), тяжело и долго перед этим болевшая, и в 1861 году Гельмгольц вторично женился на Анне фон Моль.

В течение франко-прусской войны 1871 году Гельмгольц принял живое участие в организации помощи раненым.

Здесь следует отметить, что в 1870 году, когда Гельмгольцу пришлось произносить на открытии съезда естествоиспытателей в Инсбруке речь на тему „О целях и успехах естествознания“, он, указав на роль закона сохранения энергии в современной науке, отметил, что „первым, кто ясно и отчетливо понял смысл этого закона и решился высказать его во всей общности, был тот, которого вы будете иметь удовольствие слышать здесь же, именно доктор Роберт Майер из Гейльбронна“.

Цитата эта, чрезвычайно ярко подчеркивающая скромность и беспристрастие великого ученого, ярко иллюстрирует, как Гельмгольц относился к лицам, которых можно было считать соперниками в его работе.

В 1871 году Гельмгольц принял приглашение занять первую физическую кафедру в Германии в Берлине. Продолжая свои работы по физиологической акустике и оптике, он все более и более переходит к вопросам чисто физическим и дает ряд блестящих исследований, из которых нужно назвать основные работы над электродинамическими действиями, которые явились первым шагом в создании электромагнитной теории света, развитой Максвеллом, далее работы по аномальной дисперсии, остающиеся классическими до сих пор. Далее следует отметить гениальные работы по термодинамике химических процессов, установившие уравнение для свободной энергии, явившееся для Вант Гоффа и Нернста исходной точкой при развитии так называемого третьего принципа термодинамики.

К выдающимся работам этого периода относится гениальная попытка Гельмгольца дать в самой общей форме теорию тепловых процессов, представляя тепло как движение и не специализируя этого представления ближе. Эти попытки, изложенные им в статьях „О статике моноциклических

<sup>4)</sup> Работы Гельмгольца по физической и физиологической акустике изложены в статье П. П. Лазарева. „Учение о слуховых ощущениях Гельмгольца и современная физиологическая акустика“. Природа, стр. 1251. 1914 (Москва).

систем“, явились основаниями для приложений в области электрических явлений, как это было сделано Больцманом.

Наконец, к физическим работам этого периода нужно отнести и глубокие исследования по принципу наименьшего действия, позволившие связать в виде одного принципа разрозненные факты физики. В этом принципе лежат основания теории квантов в той форме, как она была развита Зоммерфельдом; этот же принцип в руках Гильберта явился основанием и для современного принципа относительности.

Заканчивая обзор работ Гельмгольца за это время, нужно отметить, что им высказаны были два положения, играющие капитальную роль в современной науке: им впервые было указано на необходимость признания ограниченной делимости электричества (фарадеевская лекция), приводящей к теории электронов, и было дано представление о возможности электрических колебаний, впервые экспериментально обнаруженных у него же в лаборатории нашим соотечественником Шиллером и гениально исследованных великим учеником Гельмгольца Герцем, заложившим прочные экспериментальные основы электромагнитной теории света Максвелла.

В течение последнего периода деятельности Гельмгольц много работал над психо-физическим законом Фехнера, являющимся основой современной психо-физики. Из работ, возникших при жизни его, нужно упомянуть только о трудах его великого ученика Кенига. Однако только в недавнее время эти работы оценены по заслугам и получили большое значение в учении об органах чувств.

Из внешних событий жизни Гельмгольца в Берлине нужно указать на его избрание профессором физики в медико-хирургическую академию, в которой он получил свое научное образование. Ответом на эти выборы была речь Гельмгольца (1877) „О мышлении в медицине“, представляющая глубочайший интерес до сего времени.

В 1888 г. Гельмгольц назначен президентом физико-технического государственного учреждения (Physikalisch-technische Reichsanstalt).

Эту должность, совмещая ее с профессурой по теоретической физике в университете, он занимал до своей смерти, последовавшей 8 сентября 1894 г.

Подводя итоги богатой содержанием и глубокой по значению жизни величайшего ученого новейшего времени, мы должны отметить несколько черт, делающих деятельность Гельмгольца особенно близкой нам, русским. Гельмгольц явился главой многочисленной школы выдающихся учеников, среди которых мы можем из физиологов и офтальмологов назвать проф. Е. Адамюка, проф. Н. Бакста, М. Воинова, проф. Л. Гиршмана, проф. И. Догеля, проф. В. Дыбковского, проф. Ф. Заварыкина, проф. А. Иванова, проф. Е. Мандельштама, проф. И. Сеченова, проф. А. Ходина, проф. Ф. Шереметевского, проф. Э. Юнга. В числе физиков, работавших у Гельмгольца и слушавших его лекции, можно указать профессоров П. Зилова, Р. Колли, П. Лебедева, В. Михельсона, А. Соколова, Н. Шиллера. Мы видим, что многие крупные русские исследователи были непосредственными учениками Гельмгольца, но еще большее влияние оказали сочинения великого физика-физиолога на ход работ русской физиологии, физики и психо-физики. Многие из них явились непосредственным продолжением трудов основателя современного точного естествознания.



Отмечая это значение Гельмгольца, проф. А. Столетов писал так <sup>1)</sup>:

„Гельмголец дорог нам не только как гениальный ученый,—он в то же время самый заслуженный из современных насадителей науки вообще и в частности в нашем отечестве.

Многие десятки натуралистов и врачей, получивших известность своей общественной деятельностью и учеными трудами, обязаны своим специальным образованием Гельмгольцу. Значение его в качестве международного учителя, думаю, ни для одной страны (кроме родной ему Германии) не было так велико, как для России.

Долгие годы руководя лабораториями, сперва как физиолог, потом как физик, Гельмголец производил неотразимое влияние своей могучей личностью на молодых людей, отовсюду стекавшихся к нему на выучку. „Кто раз пришел в соприкосновение с человеком первоклассным, у того духовный масштаб изменен навсегда, тот пережил самое интересное, что может дать жизнь“.

Эти слова говорил сам Гельмголец, вспоминая о своем учителе Иоганне Мюллере; эти слова повторит каждый из его учеников при мысли о Гельмгольце.

Но не только специалиста-исследователя, специалиста-учителя мы чтим в этом человеке... Перед нами явление вполне исключительное, натура истинно титаническая,—человек первоклассный из первоклассных.

Чтобы закончить характеристику Гельмгольца как ученого и учителя мы приведем его слова, сказанные по этому поводу в его уже цитированной речи:

„Вспоминая первую половину жизни, когда еще приходилось работать ради внешнего положения, не скажу, чтобы и тут, рядом с потребностью знания и чувством служебного долга, не действовали и более высокие этические побуждения; но, во всяком случае, было труднее убедиться в их содействии, пока к работе призывали эгоистические мотивы. Думаю, то же бывает и с другими исследователями. Но зато позже, когда положение обеспечено, когда человек без внутреннего влечения к работе может вовсе перестать работать,—для тех, кто и дальше работает, более высокое сознание своих отношений к человечеству выступает на передний план. Мало-помалу из собственного опыта слагается представление о том, каким образом мысли, нами пущенные в ход,—будет ли то путем литературы, или изустного преподавания,—как эти мысли продолжают действовать среди современников, продолжают как бы жить самостоятельной жизнью; как они разрабатываются далее нашими учениками, получают более богатое содержание и более прочную форму и нам самим, в свою очередь, приносят новое поучение... Естественно, что собственные идеи каждого прочнее, чем чужие, связаны со всем его умственным кругозором, и, следя за развитием этих своих мыслей, он чувствует себя более ободренным и удовлетворенным. Ко всякому такому детищу ума у родителя развивается под конец своего рода отцовская любовь; она побуждает его так же хлопотать и ратовать за этих чад, как и за настоящих детей по плоти.

„Но в то же время перед научным деятелем выступает вся совокупная мысль цивилизованного человечества, как одно живущее и развивающееся целое, чья жизнь представляется вечностью в сравнении с коротким жизненным сроком каждого отдельного лица. Он видит себя, со своими скромными трудами на пользу науки, поставленным на служение вечному и святому делу, к которому привязан тесными узами любви. Собственная работа освещается для него этим сознанием. Теоретически понять это сумеет, быть может, всякий; но чтоб это понимание развивалось до степени нравственного чувства—нужен собственный опыт.

„Свет, неохотно верящий в идеальные побуждения, совет это чувство славлющим. Но есть решительный признак, чтобы различить эти два настроения. Задай себе вопрос: все ли равно тебе, будут ли признаны твоими или нет результаты твоих изысканий—буде с ответом на этот вопрос уже не связаны какие-либо соображения о внешней выгоде. По отношению к руководителям лабораторий ответ особенно ясен. Учителю постоянно приходится отдавать другим и главную идею работы, и множество советов, как преодолеть новые экспериментальные препятствия,—советов, требующих большей или меньшей изобретательности. Все это переходит в работу ученика, и под конец, если работа удалась, публикуется от его имени. Кто потом разберет, что внес один, что собственность другого? А разве мало учителей, которые в этом отношении свободны от всякого ревнивого чувства?“

Горячая любовь к родине и ясное сознание заслуг немецкого народа перед мировой культурой не позволяли Гельмгольцу закрывать глаза перед значением в области цивилизации других стран, и это критическое, строго научное отношение великого мыслителя не покидало его даже в те политические моменты, когда другие ученые старались умалить это значение.

„В эпохи самого страстного шовинизма в Германии“,—писал в 1891 г. А. Г. Столетов,—„Гельмголец ни разу не позволил себе тех резких выходов против Франции, от каких несвободны даже люди, как Вирхов, Дю Буа Реймон, Штраус. В прошлом (1890 г.), присутствуя как делегат берлинского университета на праздновании 600-летия университета в Монпелье, он был предметом восторженных оваций со стороны французов“.

Для характеристики взглядов Гельмгольца интересны его письма, в которых он выражает глубокое преклонение перед культурой, где бы он ее ни наблюдал.

Так, в письме к своему знаменитому другу проф. К. Людвигу он пишет: „Англия великая страна, и здесь чувствуешь, какая огромная и прекрасная вещь есть цивилизация, если она проникает во все мельчайшие отношения в жизни“.

За год до смерти во время путешествия в Америку (1893) Гельмголец писал: „Я знаю прекрасно, что Америка представляет собою будущность для цивилизованного человечества и что она заключает в себе большое количество интересных людей“.

На статуе основателя современной физики Ньютона помещена надпись Qui geni humanum ingenio superavit (превосходивший умом человеческий род), надпись которая выражала мнение современников о гениальном авторе Principia. Чеменьшим правом мы должны отнести эти слова и к величайшему естествоиспытателю прошлого века—Герману фон Гельмгольцу

<sup>1)</sup> А. Столетов. Общедоступные лекции и речи. Стр. 142.



### Примечания редактора.

Среди бессмертных творений, которыми наряду с сочинениями Архимеда, Ньютона, Гюйгенса будет всегда гордиться человечество, нужно поставить и мемуар Гельмгольца „О законе сохранения силы“. Мемуар этот, являющийся плодом первых самостоятельных исследований молодого Гельмгольца, представлялся для физиков настолько новым и неожиданным по своему содержанию, что Поггендорф, редактор *Annalen d. Physik*, к которому Гельмголец через проф. Магнуса направил свое сочинение, отказался его поместить в журнале, мотивируя это тем, что статья является теоретической и что она очень велика. Только со стороны близких друзей физиологов Дюбуа Реймона и Брюкке Гельмголец встретил самое доброжелательное отношение и в созданном ими Берлинском физическом обществе еще до отправки манускрипта Поггендорфу 23 июня 1847 Гельмголец сделал сообщение о своей работе, которой суждено было сделаться основанием всей современной точной науки. Как отмечает биограф Гельмгольца Кенигсбергер в своем докладе, Гельмголец явился, по словам Дюбуа, уже сформировавшимся физико-математиком: „физическое общество признало закон сохранения силы, когда весь остальной мир еще ничего о нем не знал“. Конечно, как и во всяком исследовании, в законе сохранения энергии у Гельмгольца были предшественники. Он самым добросовестным и пунктуальным образом отмечал все работы, касающиеся этого принципа, считая своей заслугой только со рвание воедино всех фактов, и поэтому для потомков он является не только недостижимым идеалом глубины мысли и точности мышления, но и примером человека, который скромно оценивает свои результаты, ставя себя в подчиненное положение, в зависимость от того, что сделано его предшественниками. Тем менее понятны ряд нападок, которые пришлось Гельмгольцу испытать в течение жизни, в особенности в связи с вопросом о приоритете Майера. Мы приведем только резкий отзыв о работе Гельмгольца Е. Дюринга <sup>1)</sup>: „Численная величина эквивалента была настоящим открытием, и без него можно было бы еще целые столетия рассуждать об единстве или сохранении силы, ни оного окончательно не убеждая. Если же долгое время спустя после майеровского открытия добавочные рассуждения общего и неопределенного характера нередко сходили за главное дело, то виною этому отсутствию понимания у публики. Но уже совсем комично, когда даже простое и к тому же не только не оригинальное, а тривиальное и ошибочное соучастие в подобных шатких исследованиях смешивается с изобретением мысли или даже с самим открытием.“

„Одним из таковых была, например, статья Гельмгольца „о сохранении силы“ (Берлин, 1847), в которой встречается эквивалент Джауля, разбирается множество маловажных работ, но не упоминается о Р. Майере.“ Однако общее признание закона физиками позволило Гельмгольцу спокойно продолжать свою работу, и потомство оказалось благодарным к своему великому учителю, так что, когда в 1886 году немецкие физики собрались в Берлине на ежегодном съезде естествоиспытателей, то признание Гельмгольца творцом закона сохранения энергии было выполнено посылкой р Швейца-

<sup>1)</sup> Е. Дюринг. Критическая история общих принципов механики. Перев. с немц. стр. 393. Москва, 1893.

рию больному Гельмгольцу телеграммы, гласившей: „Отцу закона сохранения силы физическая секция съезда естествоиспытателей шлет искренние пожелания восстановления творческой силы и долгого ею обладания.“

Относительно истории открытия закона всего лучше обратиться к словам самого Гельмгольца, который в застольной речи 2 ноября 1891 года на праздновании его 70-летия, вспоминая время своих первых научных работ, сказал <sup>1)</sup>: „Наступало время перехода в университет. В ту пору физика еще не считалась в числе хлебных занятий. Мои родители были вынуждены жить крайне бережливо. Отец объявил, что может помочь мне в изучении физики не иначе, как под условием, что я возьму и медицину в придачу. Я был ничуть не против того, чтобы изучать живую природу, и согласился без затруднений. К тому же единственный влиятельный человек в нашей семье был врач,—бывший генерал-хирург, Мурсинна. Это родство обеспечило мне, среди других конкурентов, прием в наше военно-медицинское учебное заведение, институт Фридриха-Вильгельма, которое столь существенно облегчает прохождение врачебного курса недостаточным студентам.“

„При этих новых занятиях я сейчас же подпал влиянию глубокомысленного учителя физиолога Иоганна Мюллера; он же, и в ту же пору, привлек к физиологии и анатомии Э. Дюбуа-Реймона, Э. Брюкке, К. Лудвига, Вирхова. Относительно загадочных вопросов о природе жизни И. Мюллер еще боролся между старым по существу метафизическим воззрением и вновь развивавшимся натуралистическим; но убеждение в том, что знания фактов нельзя заменить ничем, выступало у него все с большею и большею твердостью, а то обстоятельство, что он сам еще боролся, быть может, еще более способствовало тому влиянию, какое он производил на своих учеников.“

„Молодые люди всего охотнее берутся сразу за самые глубокие задачи; так и меня занял вопрос о загадочном существе жизненной силы. Большинство физиологов в то время ухватилось за компромисс Г. Э. Штала. По Шталаю, силы, действующие в живом теле, суть физические и химические силы органов и веществ; но какая-то присущая телу жизненная душа (*Lebensseele*) или жизненная сила может связывать или освобождать их деятельность; свободная игра этих сил по смерти организма вызывает гниение, а при жизни действие их постоянно регулируется жизненной силой. В таком объяснении мне чувалось что то противоестественное; но мне стоило великого труда формулировать смутное подозрение в виде точного вопроса. Наконец в последний год моего студенчества я нашел, что шталева теория приписывает всякому живому телу свойства так называемого *perpetuum mobile*. О пререканиях относительно *perpetuum mobile* я знал довольно хорошо: разговоры о них я часто слышал в эпоху моих школьных занятий от отца и от нашего учителя математики. Потом в качестве воспитанника института Фридриха-Вильгельма мне приходилось помогать библиотекарю, и в свободные минуты я разыскивал и просматривал сочинения Даниэля Бернулли, д'Аламберта и других математиков прошлого столетия. Таким образом я натолкнулся на вопрос: „какие отношения должны существовать между различными силами природы, если принять, что *perpetuum mobile* вообще невоз-

<sup>1)</sup> Перевод взят у А. Г. Столетова. Общедоступные лекции и речи, стр. 188. Москва, 1902.



можно“, и далее: „выполняются ли в действительности все эти отношения“. В моей книжке о сохранении силы я намеревался только дать критическую оценку и систематику фактов в интересе физиологов.

„Для меня не было бы неожиданностью, если бы, в конце концов, сведущие люди сказали мне: „Да все это нам отлично известно. Чего хочет этот юный медик, распространяясь так подробно об этих вещах“. К моему удивлению, те авторитеты по физике, с которыми мне пришлось войти в соприкосновение, посмотрели на дело совершенно иначе. Они были склонны отвергать справедливость закона; среди той ревностной борьбы, какую они вели с натурфилософией Гегеля, и моя работа была сочтена за фантастическое умствование. Только математик Якоби признал связь между моими рассуждениями и мыслями математиков прошлого века, заинтересовался моим опытом и защищал меня от недоразумений. С другой стороны, восторженное одобрение и практическую помощь нашел я у моих молодых друзей, в особенности у Э. Дюбуа-Реймона. Вскоре они привлекли на мою сторону членов только что возникавшего Берлинского Физического Общества. О работах Джауля на ту же тему я знал в то время очень мало, о Р. Майере ровно ничего.

К этому присоединились потом небольшие опытные исследования по физиологии о гниении и брожении, где мне удалось доказать, что эти процессы—отнюдь не простые химические разложения, наступающие самопроизвольно или вызываемые содействием кислорода атмосферы, как думал Либих; что винное брожение, например, существенно обусловлено присутствием дрожжевых грибов, возникающих не иначе как путем размножения. Далее следовала работа об обмене вещества при действии мышц: к ней присоединилась позже другая работа—о развитии тепла при мышечной работе; эти процессы предусматривались законом сохранения силы“.

Из этой выписки ясна та необыкновенная скромность, с которой величайший из современных естествоиспытателей смотрел на одну из своих величайших работ.

Мы полагали, что классическая книга Гельмгольца должна быть издана в том самом виде, как она была проредактирована им самим в 1881 году для полного собрания его сочинений.

Мы изменили только терминологию оригинала, заменив ее современной, иначе для менее подготовленного читателя было бы очень трудно следить за мыслью автора. Во время написания Гельмгольцем книги слову „сила“ придавались различные значения: или понимали под силой величину, которую мы и теперь называем силой (движущая сила), или величину потенциальной энергии (скрытая напряженная сила), или, наконец, понятие сила отождествлялась с понятием энергии вообще. Это смешение терминов вызвало со стороны Дюринга ряд совершенно несправедливых и необоснованных нападок на терминологию Гельмгольца. Это обстоятельство и имело для нас решающее значение в деле выбора терминологии, тем более, что и в других классических работах при переводе подобная замена терминов делалась <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Так, например, в классиках Оствальда при переводе начертательной геометрии Монжа сделаны некоторые изменения в обозначениях, затрудняющих чтение. Далее заменены одни слова другими, выражавшими более точно смысл предмета (См. Ostwald's Klassiker. № 117, стр. 193—194).

К истории вопроса, как он совершенно ясно освещен в дополнениях Гельмгольца, можно прибавить только, что исследования самого последнего времени показали, что над вопросами сохранения энергии трудились еще задолго до авторов, указанных Гельмгольцем.

Основание современной механической теории тепла и кинетической теории газов, базирующееся на представлении о теплоте как о движении, было высказано, как это отмечает в своих примечаниях к изданию Principia Ньютона академик А. Н. Крылов, Ньютоном еще в 1692 году в статье de Natura Accidiorum, предназначенной для технического словаря Harris'a. Ньютон пишет: Calor est agitatio partium quamqua versum („Теплота есть колебание частиц друг около друга“).

Как отмечает далее Крылов в примечании на стр. 148 перевода Principia (Ньютон.— Математические основания естественной философии „Петроград 1915), предложение XXXIII у Ньютона „выражает закон живых сил“.

Таким образом из данных Ньютона вытекало, что закон живых сил должен выполняться для тепловых движений, а это и есть выражение первого начала термодинамики, выведенного из представлений кинетической теории.

С другой стороны, мы должны отметить интереснейшие работы М. В. Ломоносова, на которые внимание ученого мира было впервые обращено проф. Б. Н. Меншуткиным, и которые являются основанием не только для закона сохранения энергии, высказанного Ломоносовым в неясной форме, но и для закона сохранения материи, впервые обоснованного теоретически и проверенного точными опытами Ломоносовым за много лет до Лавуазье.

В общем виде закон этот приведен Ломоносовым в „рассуждении о твердости и жидкости тел“ в такой форме: „Все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится к другому. Так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте...“

„Сей всеобщий естественный закон простирается и на самые правила движения, ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оные у себя теряет сколько сообщает другому, которое от него движение получает“.

Эта мысль, как отмечает Меншуткин, встречается у Ломоносова впервые в 1740 году.

Далее не безынтересно отметить, что среди ученых, цитируемых Гельмгольцем, есть ряд лиц, имена которых связаны тесно с Россией.

Так, Клапейрон был профессором в Петербурге, Гесс, термодинамические работы которого являются классическими, был академиком в Петербургской Академии Наук. Наконец академиком и директором физической лаборатории академии был Ленц, закон которого цитирует Гельмгольц. Впоследствии блестящие работы Джауля оставили на время в тени эти классические работы, и закон, связывающий силу тока, сопротивление и количество развившегося тепла, носит в литературе обычно имя Джауля или в лучшем случае называется законом Джауля-Ленца.

В заключение нужно отметить, что к настоящей книжке приложен портрет Гельмгольца, относящийся к периоду открытия им закона сохранения силы.



## ОГЛАВЛЕНИЕ.

	<i>Стр.</i>
Введение . . . . .	5
I. Принцип сохранения живой силы . . . . .	9
II. Принцип сохранения силы (энергии) . . . . .	13
III. Приложение принципа в механических теориях . . . . .	19
IV. Механический эквивалент тепла . . . . .	23
V. Механический эквивалент электрических процессов . . . . .	32
VI. Эквивалент энергии магнетизма и электромагнетизма . . . . .	48
Прибавления . . . . .	56
Г. Гельмгольц . . . . .	63
Примечания редактора . . . . .	68

### Значение сокращений, принятых Г. Гельмгольцем.

- 1) Ann. — Annalen der Physik.
- 2) Bull. de l'acad. d. Scienc. de St. Petersbourg — Bulletin de l'academi des Sciences de St. Petersbourg.
- 3) Philos. Magaz. — Philosophical Magazine.
- 4) Philos. Transact. — Philosophical Transactions.
- 5) Pogg. Ann. — Annalen der Physik, herausgeg. von Poggendorf.