



Сади Карно

вали этот принцип как всеобщий, тем не менее его конкретный смысл и характер применимости к немеханическим процессам оставался пока еще не вполне ясным и требовал анализа и изучения.

§ 45. НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ТЕПЛОТЫ И РАБОТЫ

Все более и более широкое применение парового двигателя делает актуальным исследование процессов превращений теплоты в работу. Впервые изучением этого вопроса занялся французский инженер Сади Карно (1793—1832), сын Лазаря Карно, о работах которого упоминалось выше. В 1824 г. он опубликовал работу «Размышление о движущей силе огня» в которой изложил свои исследования по данному вопросу.

Он отмечал, что паровые машины получают все большее и большее распространение и «по-видимому, им суждено сделать большой переворот в цивилизованном мире»¹⁾. В связи с этим, полагает он, возникла необходимость создания теории этих машин. Первым эта теория должна решить вопрос о том, «ограничена или бесконечна движущая сила тепла, существует ли определенная граница для возможных улучшений, граница, которую природа вещей мешает перешагнуть каким бы то ни было способом, — или, напротив, возможны безграничные улучшения?»²⁾

С. Карно, как и большинство его современников, придерживался в период написания данной работы теории теплорода. Поэтому и к анализу работы паровой и вообще тепловой машины он подходит с позиции этой теории.

Карно полагает, что для работы тепловой машины необходимы нагреватель и холодильник и что при ее работе происходит переход теплорода от нагревателя к холодильнику. При этом от нагревателя теплород берется при высокой температуре, а передается холодильнику при более низкой. При этом общее количество теплорода сохраняется. Он даже специально пишет:

¹⁾ Карно С. Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу. — В кн.: Второе начало термодинамики. М. — Л., Гостехиздат, 1934, с. 17.

²⁾ Там же, с. 19.

«Возникновение движущей силы обязано в паровой машине не действительной трате теплорода, а его переходу от горячего тела к холодному»¹⁾.

Далее Карно подчеркивает, что для совершения работы непосредственный переход теплорода должен осуществляться между телами с одинаковой температурой. В противном случае при простом переходе теплорода от горячего тела к холодному (при тепловом контакте) никакая работа не совершается и происходит бесполезная трата теплорода.

Можно предположить, что к этим соображениям Карно пришел под влиянием исследований своего отца — Л. Карно, о которых мы выше говорили, проводя аналогию между работой водяного двигателя и тепловой машины. Действительно, как при работе водяного двигателя необходимо падение воды с одного уровня на другой (более низкий), так и при работе тепловой машины необходим переход теплорода с более высокой температуры на более низкую. Таким образом, для работы тепловой машины нужны нагреватель и холодильник. От нагревателя теплород забирается и передается холодильнику. Для того чтобы исключить потерю энергии в механических машинах, нужно, чтобы передача движения (энергии) происходила без удара и так, чтобы скорость при такой передаче не испытывала скачка. Это положение было доказано отцом Сади Карно. Также и в тепловой машине при передаче теплорода от одного тела к другому не должна существовать разность температур, так как при простом переходе теплорода от горячего тела к холодному не совершается никакая работа. Эти соображения приводят Карно к представлению об идеальной тепловой машине, в которой непроизводительная трата теплорода исключена.

Простейшей идеальной тепловой машиной является машина, совершающая цикл Карно. При этом цикле как раз теплота забирается и отдается при температуре нагревателя и холодильника соответственно. Карно доказывает теорему:

«Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития: ее количество исключительно определяется температурами тел, между которыми, в конечном счете, производится перенос теплорода»²⁾.

Он рассматривает две идеальные машины. Одна из этих машин осуществляет, по его мнению, передачу теплорода от нагревателя к холодильнику и совершает работу a_1 . Вторая возвращает нагревателю избранное у него количество теплорода и над ней совершается работа a_2 . Карно доказывает, что $a_1 = a_2$, основываясь на двух принципах: невозможности вечного двигателя и неуничтожаемости теплорода. Количество теплоты, взятое у нагревателя и переданное холодильнику, как полагает Карно, одно и то же. За один цикл это количество берется у нагревателя, а затем возвращается ему обратно.

¹⁾ Карно С. Размышление о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу.— В кн.: Второе начало термодинамики, с. 20.

²⁾ Там же, с. 30.

При этом рабочее вещество обеих машин приходит в первоначальное состояние. Но если при этом $a_1 > a_2$, то вся система совершила за цикл внешнюю работу, равную $a_1 - a_2$, и вернулась в первоначальное состояние, а такая система есть не что иное, как вечный двигатель, который невозможен. Следовательно, предположение, что $a_1 > a_2$, не верно. Рассмотрев работу всей системы в обратном направлении, можно сделать заключение, что предположение $a_1 < a_2$ также не верно. Таким образом, возможно только одно условие: $a_1 = a_2$. После того как было доказано, что «движущая сила тепла» зависит только от температур нагревателя и холодильника, следовало найти математическое выражение этой зависимости. Или, говоря другими словами, определить коэффициент полезного действия как функцию этих температур. Карно не решил эту задачу. Он только показал, что «движущая сила тепла» при падении единицы теплоты от температуры t до 0° пропорциональна t , т. е. что соответствующий коэффициент полезного действия равен tc , где c — не известная пока функция температуры нагревателя и холодильника. Эту функцию, равную, как выяснилось позже, $1/T$, где T — абсолютная температура нагревателя, некоторое время называли функцией Карно.

Таковы основные результаты, полученные Карно при разработке теории тепловых машин. Как мы видим, несмотря на неверное представление о природе теплоты и о самом процессе работы тепловой машины, Карно получил правильный результат. Это один из примеров, когда, основываясь на неправильных предположениях, можно получить правильные результаты.

Работа Карно первое время не обратила на себя должного внимания. Только в 1834 г. французский инженер Клапейрон заинтересовался и в сочинении «Мемуар о движущей силе теплоты» дополнил некоторые выводы Карно. Клапейрон впервые использовал графический метод изображения круговых циклов, который в дальнейшем нашел широкое применение в термодинамике.

Клапейрон также рассмотрел цикл, в котором рабочим телом является система из жидкости и насыщенного пара, и вывел уравнение

$$\lambda = \frac{dp}{dt} \Delta V \frac{1}{c},$$

где λ — удельная теплота испарения; ΔV — изменение удельного объема при превращении воды в пар; $\frac{dp}{dt}$ — производная, выражающая изменение давления насыщенного пара с температурой; c — функция Карно.

Впоследствии это уравнение (учитывая, что $c = 1/T$) получил Клаузиус уже на основе второго закона термодинамики; оно называется в настоящее время уравнением Клапейрона — Клаузиуса.

Следует отметить также, что Клапейрон впервые применил запись объединенного закона Бойля — Мариотта в виде

$$pV = A(267 + t)^1),$$

где A — постоянная для данной массы газа. Впоследствии Д. И. Менделеев обобщил это уравнение, введя универсальную газовую постоянную R и молекулярный вес газа μ , записав уравнение состояния идеального газа в виде

$$pV = \frac{m}{\mu} RT,$$

где m — масса газа.

Клапейрон продолжал придерживаться теории теплорода и рассматривал работу тепловой машины так же, как и Карно. При этом Клапейрон признавал, что «живая сила» в природе теряется. Для того чтобы создать разность температур, необходимо затратить определенную работу, тогда как эта разность температур может исчезнуть при простом теплообмене без совершения работы. Он писал:

«Каждый раз, когда два тела разной температуры приходят в соприкосновение и теплота перетекает непосредственно от одного тела к другому, имеет место потеря живых сил»²⁾.

После работ Карно и Клапейрона можно указать только одну работу, связанную с вопросом превращения теплоты в работу, в которой автор, придерживаясь теории теплорода, сумел сделать положительный вклад в термодинамику. Это работа В. Томсона по установлению абсолютной шкалы температур. Всякое дальнейшее продвижение вперед в этом вопросе уже с необходимостью пришлось бы в противоречие с теорией теплорода и потребовало бы ее отмены.

Однако отмена теории теплорода произошла в результате рассмотрения обратного процесса, а именно процесса превращения работы в теплоту. Нужно, правда, отметить, что Карно, продолжая свои исследования, в конце концов пришел к правильным взглядам на природу теплоты, но это стало известно только после его смерти. Об этом свидетельствуют его записи, в которых он отмечал:

«Тепло не что иное, как движущая сила или, вернее, движение, изменившее свой вид; это движение частиц тел; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратное: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила.

Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве; она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается: в действительности она меняет форму, т. е. вызывает то один род движения, то другой, но никогда не исчезает»³⁾.

Как мы видим, Карно не только высказал правильный взгляд на природу теплоты, но и сформулировал закон сохранения и превра-

¹⁾ Клапейрон принимал коэффициент расширения газов равным $1/267$.

²⁾ Clapeyron E. *Abhandlungen über die bewegende Kraft der Wärme. Ostwald's Klassiker, Leipzig, 1926, S. 3.*

³⁾ Второе начало термодинамики. М.—Л., Гостехиздат, 1934, с. 62—63.

щения «сил». Он даже определил впервые механический эквивалент теплоты. В тех же записках сказано:

«По некоторым представлениям, которые у меня сложились относительно теории тепла, создание единицы движущей силы требует затраты 2,70 единиц тепла»¹⁾.

Если перевести эту величину в современные единицы, то значение механического эквивалента, как его определил Карно, равно примерно 370 кГм на 1 большую калорию.

Рассмотрим кратко историю исследований процессов превращения работы в теплоту. В конце XVIII в. американец Бенджамин Томпсон, получивший в Европе титул графа Румфорда, работая на пушечных заводах, обнаружил, что при сверлении пушечных стволов выделяется большое количество теплоты, особенно если сверло тупое. Он проделал опыт, заключающийся в рассверливании тупым сверлом круглого канала в металлической болванке, помещенной в воду. Вода при этом сильно нагревалась и даже закипала и превращалась в пар. Румфорд сделал вывод, что теория теплового вещества является неверной и что теплота есть движение. Однако результаты опытов Румфорда не поколебали веру большинства физиков в теплородную теорию. Они попытались объяснить полученные результаты изменением теплоемкости железа при его сверлении и превращении в стружку.

Дэви также показал, что при трении можно выделить значительное количество теплоты (простым трением он доводил два куска льда до таяния, расплавлял воск и т. д.). Дэви также считал, что эти опыты опровергают теорию теплорода и подтверждают гипотезу о том, что теплота есть движение. Однако и результаты его опытов не поколебали общего мнения о существовании теплового вещества.

Были и другие физики, которые уже не верили в существование теплорода и рассматривали теплоту как движение. Таких взглядов придерживались, как уже отмечалось, Юнг, Френель, Ампер и др. Однако они не занимались специально исследованием процесса взаимного превращения теплоты в работу и наоборот. Этих ученых было меньшинство и теплородная теория продолжала господствовать.

§ 46. ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Изучение процесса превращения теплоты в работу и обратно и установление механического эквивалента теплоты сыграли основную роль в открытии закона сохранения и превращения энергии. Однако это открытие было подготовлено всем ходом развития физики в первой половине XIX в. Все большее и большее место в физических исследованиях занимали исследования явлений, в которых имело место превращение различных форм движения друг в друга. Исследования химических, тепловых, световых действий электрического тока, изучение его пондермоторного действия,

¹⁾ Второе начало термодинамики, с. 63.