

силу», вышедшем в 1824 г. (т. е. значительно ранее открытия первого начала Р. Майером, Джоулем и Гельмгольцем), Сади Карно исследовал условия превращения теплоты в работу. Однако тогда Карно стоял на точке зрения теории теплорода (позднее он от нее отказался), а поэтому ему не удалось дать ясную и четкую формулировку второго начала термодинамики. Это было сделано только в 1850—51 гг. независимо друг от друга немецким физиком Рудольфом Клаузиусом и шотландским физиком Вильямом Томсоном (лордом Кельвином). Они сформулировали основной постулат, выражающий второе начало термодинамики, и вывели из него главные следствия.

§ 28. Различные формулировки основного постулата, выражающего второе начало термодинамики

1. Чтобы прийти к формулировке постулата второго начала термодинамики, следуя историческому ходу идей, рассмотрим схематически работу тепловой машины. В цилиндре машины (рис. 23) помещается газ или какое-либо другое вещество, называемое *рабочим телом*. Для определенности будем считать, что рабочим телом является газ. Пусть на диаграмме VP начальное состояние рабочего

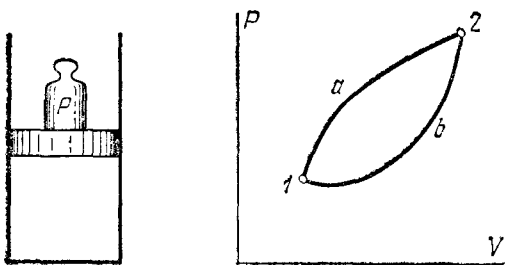


Рис. 23.

тела изображается точкой 1. Приведем дно цилиндра в тепловой контакт с *нагревателем*, т. е. телом, температура которого выше температуры газа в цилиндре. Газ будет нагреваться и расширяться — этот процесс изображен кривой $1a2$. Рабочее вещество получит от нагревателя тепло Q_1 и совершит положительную работу A_1 . По первому началу

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1. \quad (28.1)$$

Теперь надо вернуть поршень в исходное положение, т. е. сжать газ. Это надо сделать так, чтобы работа A_2 , затраченная на сжатие, была меньше A_1 . С этой целью приведем дно цилиндра в тепловой контакт с *холодильником*, т. е. телом, температура которого ниже

температуры газа в цилиндре, и сожмем газ по пути $2b1$. В результате газ вернется в исходное состояние 1 . При этом он отдаст холодильнику тепло Q_2 . По первому началу

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2. \quad (28.2)$$

Отсюда в комбинации с (28.1)

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2. \quad (28.3)$$

Таким образом, тепловая машина совершила круговой процесс, в результате которого нагреватель отдал тепло Q_1 , холодильник получил тепло Q_2 , тепло $Q = Q_1 - Q_2$ пошло на производство работы $A_1 - A_2$. Отношение

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (28.4)$$

называется *коэффициентом* или *экономическим коэффициентом полезного действия* тепловой машины.

2. Возникает вопрос, нельзя ли построить периодически действующую тепловую машину без холодильника, т. е. добиться того, чтобы $Q_2 = 0$, и следовательно, $\eta = 1$? Такая машина могла бы превращать в работу всю теплоту, заимствованную от одного теплового резервуара. Возможность ее построения не противоречит закону сохранения энергии. По своему практическому значению она почти не уступала бы перпетуум мобиле, так как с ее помощью можно было бы производить работу за счет практически неисчерпаемых запасов внутренней энергии, содержащихся в воде океанов и морей, воздушной атмосфере и недрах Земли. Такую машину Вильгельм Оствальд (1853—1932) назвал *перпетуум мобиле второго рода* в отличие от *перпетуум мобиле первого рода*, т. е. вечного двигателя, производящего работу из ничего, возможность которого отрицается законом сохранения энергии.

Но уже Сади Карно понял, что такая машина принципиально невозможна. Работу тепловых двигателей он сравнивал с работой двигателей водяных. Производство работы в последних двигателях связано с падением воды с более высокого на более низкий уровень. Так и возможность производства работы тепловыми двигателями обусловлена по Карно переходом тепла от тела более нагретого к телу менее нагретому. Исходя из этой аналогии, Карно вывел ряд правильных положений, с которыми мы ознакомимся в дальнейшем. Ошибка Карно состояла лишь в том, что он вместе со своими современниками считал, что во всех процессах теплота не может создаваться и уничтожаться.

Опытные факты говорят против возможности построения перпетуум мобиле второго рода. Поэтому невозможность построения такого перпетуум мобиле была возведена в постулат. Он называется

постулатом второго начала термодинамики и является обобщением опытных фактов. Доказательством этого постулата является согласие всех вытекающих из него следствий с опытом. До сих пор, применяя этот постулат к макроскопическим системам, размеры которых не очень малы, физика нигде не натолкнулась на противоречия. Поэтому постулат второго начала термодинамики покоится на надежной экспериментальной основе. Приведем три точных формулировки постулата.

3. Вильям Томсон (получивший позднее за научные заслуги титул лорда Кельвина) в 1851 г. дал такую формулировку постулата второго начала термодинамики: *«Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара»*.

Напомним, что под тепловым резервуаром понимают тело или систему тел, находящуюся в состоянии термодинамического равновесия и обладающую запасом внутренней энергии. Но тепловой резервуар сам макроскопической работы не совершает, а может только передавать внутреннюю энергию другому телу или системе тел. Если последняя система производит работу за счет внутренней энергии теплового резервуара, то она называется в термодинамике *рабочим телом*. Таким образом, согласно Томсону, *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет уменьшения внутренней энергии теплового резервуара*.

4. Можно конкретизировать, в чем должно выражаться производство внешней работы, и таким путем получить множество разнообразных формулировок основного постулата. Одна из них принадлежит Планку (1858—1947). Она состоит в следующем: *«Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом которой было бы поднятие груза за счет охлаждения теплового резервуара»*.

Указание на периодичность действия машины в формулировке Планка существенно. Точно так же в формулировке Томсона существенно, что процесс должен быть круговым. Действительно, возможен процесс (но не круговой), единственным результатом которого было бы поднятие груза за счет внутренней энергии, заимствованной от теплового резервуара. Планк приводит следующий пример. Допустим, что в цилиндре с поршнем (см. рис. 7) находится идеальный газ. На поршне лежит груз P . Приведем дно цилиндра в тепловой контакт с достаточно большим тепловым резервуаром, температура которого превышает температуру газа на бесконечно малую величину. Затем будем бесконечно малыми порциями разгружать поршень. Тогда газ будет изотермически расширяться, производя работу A по поднятию груза. По первому началу

$$Q = U_2 - U_1 + A.$$

Так как внутренняя энергия идеального газа U зависит только от температуры, которая в описанном процессе не меняется, то $U_2 - U_1 = 0$, и следовательно

$$Q = A.$$

Таким образом, теплота Q , заимствованная у теплового резервуара, полностью перешла в работу поднятия груза. Это не противоречит постулату второго начала термодинамики, так как описанный процесс не круговой, т. е. машина не является периодически действующей. Вот если бы удалось каким угодно способом, оставляя груз в поднятом положении, сжать газ, приведя его в начальное состояние, и вернуть поршень в исходное положение таким образом, чтобы во всех остальных телах (за исключением теплового резервуара, часть внутренней энергии которого пошла на производство работы) *не произошло никаких изменений*, то тогда получилось бы противоречие с постулатом второго начала термодинамики, ибо постулат второго начала термодинамики утверждает, что сделать это невозможно никакими способами.

Формулировка Планка отличается от формулировки Томсона лишь по форме. Для удобства условимся называть *процессом Томсона — Планка* воображаемый круговой процесс, единственным результатом которого является производство работы за счет охлаждения теплового резервуара. Тогда постулат сводится к утверждению, что *процесс Томсона — Планка невозможен*.

5. Клаузиус (1822—1888) в 1850 г. дал существенно иную формулировку основного постулата. Он выдвинул следующее положение: «Теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к телу более нагретому». Под теплотой здесь надо понимать внутреннюю энергию тела. Постулат Клаузиуса никоим образом не сводится к утверждению, что при непосредственном тепловом контакте двух тел теплота всегда переходит от тела более нагретого к телу менее нагретому. Это утверждение вообще не составляет содержания физического закона, а является просто определением того, какое из двух тел условились называть более, а какое менее нагретым (см. § 4, п. 4). Передачу тепла (точнее, внутренней энергии) можно осуществить не только тепловым контактом, но и бесчисленным множеством других способов. Например, все тела излучают и поглощают видимые или невидимые лучи (электромагнитные волны). Излучение одного тела можно с помощью линзы или сферического зеркала сконцентрировать на другом теле и таким путем передать ему тепло. Однако не всякая передача возможна. Содержание постулата Клаузиуса как раз и состоит в том, что невозможно *каким бы то ни было способом* забрать тепло от тела менее нагретого, целиком передать его телу более нагретому и притом так, чтобы в природе больше не произошло никаких изменений. Любой воспринимаемый процесс, в котором осуществляется такая передача

тепла, называется *процессом Клаузиуса*. Таким образом, постулат утверждает, что *процесс Клаузиуса невозможен*.

Но постулат Клаузиуса не утверждает, что передача тепла от тела менее нагретого к телу более нагретому вообще невозможна. Она невозможна при условии, что во всех остальных телах *никаких изменений не должно произойти*. В этом смысл слова «самопроизвольно», употребленного при формулировке второго начала термодинамики. Если же допустить другие процессы, то передача тепла от тела менее нагретого к телу более нагретому становится возможной. Такие процессы называются *компенсирующими процессами* или, короче, *компенсациями*. Так, в холодильных машинах тепло, заимствованное от менее нагретого тела, передается более нагретому телу. Это не противоречит постулату Клаузиуса, так как такой переход происходит здесь не самопроизвольно, а сопровождается работой электрического мотора. Электрический холодильник перестает действовать, если выключить питающий его ток. Простейшая тепловая машина, о которой говорилось в начале этого параграфа (см. рис. 23), может работать как *холодильная машина*. Для этого расширение рабочего вещества следует производить по кривой $1b2$, а сжатие — по кривой $2a1$, лежащей выше. Совершая расширение $1b2$, машина будет заимствовать от холодильника тепло Q_2 ; при сжатии по кривой $2a1$ она передаст нагревателю тепло $Q_1 > Q_2$. При этом над машиной будет произведена положительная работа $A' = Q_1 - Q_2$. Производство этой работы и является здесь компенсирующим процессом.

6. Из невозможности процесса Томсона — Планка следует невозможность процесса Клаузиуса.

Для доказательства предположим противное, т. е. что процесс Клаузиуса возможен. Взяв простейшую тепловую машину, произведем круговой процесс, в результате которого машина отнимет от нагревателя тепло Q_1 , передаст холодильнику тепло Q_2 и совершит положительную работу $A = Q_1 - Q_2$. Затем с помощью процесса Клаузиуса тепло Q_2 вернем от холодильника к нагревателю. Тогда получится круговой процесс, единственным результатом которого является производство работы A за счет эквивалентного ей количества тепла $Q_1 - Q_2$, отнятого от нагревателя; никаких других изменений в природе не произойдет. Но это есть процесс Томсона — Планка, а он по предположению невозможен. Получившееся противоречие и доказывает наше утверждение.

7. Обратно, из невозможности процесса Клаузиуса вытекает невозможность и процесса Томсона — Планка. Для доказательства предположим противное, т. е. что процесс Томсона — Планка возможен. Тогда, пользуясь этим круговым процессом, отнимем от менее нагретого тела тепло Q и за счет этого тепла произведем механическую работу, например, подняв груз. Затем используем энергию поднятого груза для нагревания, например путем трения, более

нагретого тела. В результате тепло Q перейдет от менее нагретого тела к телу более нагретому, и никаких других изменений не произойдет. Но это есть процесс Клаузиуса, а он невозможен. Получившееся противоречие и доказывает высказанное утверждение. При доказательстве мы использовали не только постулат Клаузиуса, но воспользовались также утверждением, что потенциальная энергия поднятого груза может быть целиком превращена в тепло. Это утверждение является следствием повседневных наблюдений, которые показывают, что при столкновении падающего груза с препятствием он в конце концов останавливается. Потенциальная энергия груза пропадает, зато появляется тепло. По первому принципу термодинамики количество этого тепла точно равно потерянной потенциальной энергии груза.

Таким образом, *постулаты Клаузиуса и Томсона — Планка эквивалентны.*

§ 29. Обратимые и необратимые процессы

1. Если в результате какого-либо процесса система переходит из состояния A в другое состояние B и если возможно вернуть ее хотя бы одним способом в исходное состояние A и притом так, чтобы во всех остальных телах не произошло никаких изменений, то этот процесс называется *обратимым*. Если же это сделать невозможно, то процесс называется *необратимым*. Примером необратимого процесса может служить переход тепла от более нагретого тела к телу менее нагретому при тепловом контакте этих тел. Необратимость такого процесса непосредственно следует из постулата Клаузиуса. Необратимым является процесс получения тепла путем трения. Его необратимость является непосредственным следствием постулата Томсона — Планка.

Если систему из конечного состояния B можно вернуть в исходное состояние A *безразлично каким способом*, не требуя, чтобы она обязательно проходила через ту же последовательность состояний, что и в прямом процессе $A \rightarrow B$, то такой процесс называют *обратимым в широком смысле слова*. Если же возможен обратный процесс $B \rightarrow A$, переводящий систему в исходное состояние A через ту же последовательность состояний, через которую прошла система в прямом процессе $A \rightarrow B$, то процесс $A \rightarrow B$ называется *обратимым в узком смысле слова*. Всякий процесс, обратимый в узком смысле, очевидно, обратим и в широком смысле слова.

2. *Все квазистатические процессы обратимы и притом в узком смысле слова.* В самом деле, квазистатический процесс есть бесконечно медленный процесс, состоящий из последовательности состояний равновесия, точнее, состояний, бесконечно мало отличающихся от равновесных. Если взять какое-либо равновесное состояние, то по самому определению равновесия в отсутствие внешних воздей-