

§ 99. Ограничения, налагаемые вторым началом термодинамики на циклические превращения тепла в работу

Второе начало термодинамики гласит ¹⁾: *невозможен процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты в работу.*

Здесь особое внимание надо обратить на слова «единственным результатом». Их смысл заключается в следующем.

Раз речь идет о превращении тепла в работу, значит, имеется по меньшей мере два тела: одно, которое отдает энергию в форме тепла и которое поэтому мы назовем *теплоотдающим*, и другое, которое получает энергию от первого тела в форме тепла, а отдает энергию в форме работы и которое поэтому мы назовем *рабочим телом*. Процесс превращения тепла в работу заключается, во-первых, в том, что в связи с теплоотдачей убывает внутренняя энергия теплоотдающего тела и соответственно изменяется его термодинамическое состояние (например, понижается температура), и, во-вторых, в том, что за счет работы, производимой рабочим телом, возрастает запас каких-либо видов энергии, присущей каким бы то ни было телам. Оба эти, и только эти, изменения, взятые совместно, и подразумеваются нами, когда мы хотим вообразить процесс, единственный результат которого заключался бы в превращении тепла в работу (рис. 205).

Второе начало указывает на то, что процесс, при котором происходит переход тепла в работу, в о з м о ж е н лишь в том случае, если переход тепла в работу (и, следовательно, охлаждение теплоотдающего тела) является не единственным результатом этого процесса; должны существовать еще какие-то д р у г и е р е з у л ь т а т ы. Это означает, что наряду с охлаждением теплоотдающего тела непременно должно происходить какое-то изменение термодинамического состояния еще по крайней мере одного, а то и нескольких тел, вовлеченных в процесс.

¹⁾ Различные авторы по-разному формулировали второе начало. Приводим некоторые формулировки.

Карно: Наибольший коэффициент полезного действия тепловой машины не зависит от рода посредствующего тела и вполне определяется предельными температурами, между которыми машина работает.

Клаузиус: Теплота не может переходить от холодного к теплему телу сама собой, д а р о в ы м процессом.

Клаузиус: Энтропия всякой изолированной системы стремится к максимуму. Томсон (Кельвин): Теплоту какого-либо тела невозможно превратить в работу, не производя никакого другого действия, кроме охлаждения этого тела.

Оствальд: Осуществление перпетуум мобиле второго рода невозможно.

Больцман: Природа стремится к переходу от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным.

Планк: Невозможно построить периодически действующую машину, которая не производит ничего другого, кроме поднятия груза и охлаждения резервуара теплоты.

Процессы, при которых происходит превращение тепла в работу, в природе встречаются столь же часто, как и процессы перехода работы в теплоту. На поверхности земного шара ветры, дожди, реки, водопады производят непрерывно работу за счет теплоты, которую доставляет Солнце. Нельзя поэтому рассматривать процессы перехода работы в теплоту как правило, а процессы превращения тепла в работу как исключение. Различие, которое устанавливает между этими процессами второе начало термодинамики, заключается не в этом. Выражаясь фигурально, природа имеет одинаковую склонность как к тем, так и к другим процессам. Но когда

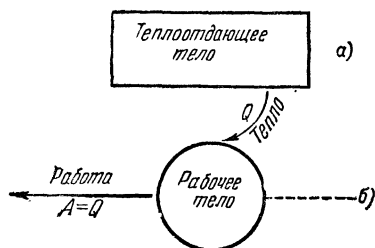


Рис. 205. Схема невозможного процесса превращения тепла в работу: а — термодинамическое состояние изменяется, б — термодинамическое состояние в конце процесса прежнее.

происходит преобразование работы в теплоту, то с точки зрения результатов этого процесса дело может ограничиваться изменением термодинамического состояния одного лишь теплополучающего тела (например, при нагревании путем трения); в противоположность этому *всегда, когда происходит преобразование теплоты в работу, наряду с охлаждением теплоотдающего тела непременно происходит изменение термодинамического состояния еще одного или нескольких тел.*

Имея в виду указанное обстоятельство, говорят, что переход тепла в работу возможен лишь в том случае, если переход этот компенсируется определенным изменением термодинамического состояния участвующих в этом процессе тел. *Некомпенсированный переход тепла в работу невозможен.*

Под компенсацией здесь подразумевают либо изменение состояния рабочего тела, либо изменения состояния какого-либо третьего тела или нескольких тел, вовлеченных в процесс.

Так, например, мы легко можем превратить теплоту в работу, если, нагревая рабочее тело, предоставим ему возможность расширяться и заставим его при этом преодолевать оказываемое на него давление. В этом случае переход тепла в работу компенсируется увеличением того объема, который занят рабочим веществом.

Самым важным для теплотехники примером служит следующий: рабочему телу сообщают теплоту и используют производимую им работу расширения, а затем возвращают рабочее тело в первоначальное термодинамическое состояние; далее вновь и вновь повторяют тот же самый цикл. Но, чтобы вернуть рабочее тело в первоначальное состояние, его надо сжать, а для этого надо затратить работу. Если бы мы стали сжимать рабочее тело при той же температуре, при которой оно расширилось, то на это потребовалось бы

затратить всю ту работу, которая была получена при расширении, и в результате никакого перехода тепла в работу мы не получили бы. Чтобы работа, потребная на сжатие, оказалась меньше работы, полученной при расширении, необходимо, чтобы процесс сжатия хотя бы в некоторой своей части протекал при температуре более низкой. Значит, надо, сжимая рабочее тело, охлаждать его, т. е. надо, следовательно, вовлечь в процесс (кроме теплопоглощающего рабочего тела) третье тело, служащее холодильником; мы будем называть его *теплоотходным телом*. В результате выполненного таким образом цикла (прямой цикл, рис. 181 на стр. 311) мы получим переход теплоты в работу, причем в работу перейдет только часть теплоты, полученной рабочим телом от теплоотдающего тела, другая же часть теплоты будет отдана рабочим телом теплоотходному телу. В данном случае компенсация перехода тепла в работу заключается в нагревании теплоотходного тела (рис. 206).

Мы видим, таким образом, что две единственно возможные формы передачи энергии — теплота и работа — являются равноценными формами передачи энергии.

Первое начало термодинамики устанавливает (и в этом заключается его сущность), что существуют две эквивалентные друг другу и единственно возможные формы передачи энергии — работа и теплота.

Второе начало термодинамики устанавливает (и в этом заключается его сущность), что теплота хотя и эквивалентна, но неравноценна работе.

Может ли тепловой двигатель превращать всю сообщаемую ему теплоту в работу? Может ли к. п. д.¹⁾ теплового двигателя быть равен единице?

Легко указать случай, когда все тепло превращается в работу. Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры; поэтому при изотермическом равновесном расширении идеального газа внутренняя энергия остается неизменной, вся сообщаемая газу теплота превращается в работу, производимую расширяющимся газом.

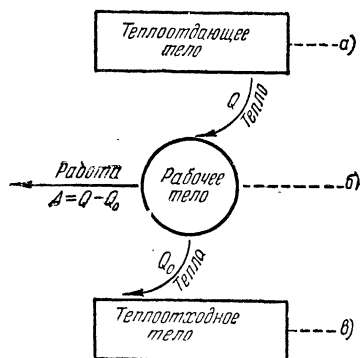


Рис. 206. Пример компенсированного превращения тепла в работу: а — термодинамическое состояние изменяется, б — термодинамическое состояние в конце процесса прежнее, в — термодинамическое состояние изменяется.

¹⁾ К. п. д. — общепринятое сокращение слов «коэффициент полезного действия». Под коэффициентом полезного действия двигателя понимают отношение производимой двигателем работы к энергии, которая за это время была сообщена двигателю.

Однако, желая использовать газ в качестве рабочего тела в тепловом двигателе, мы, после того как газ расширился, должны сжать его до первоначального объема. На это надо неизбежно затратить часть работы, выполненной газом. Надо при этом вовлечь в процесс третье теплоотходное тело, которому в форме тепла будет отдана работа, затраченная на сжатие газа. В результате часть отданного нагревателем тепла перейдет к теплоотходному телу, и только остальная (как мы убедимся ниже — сравнительно небольшая) часть тепла, отданного нагревателем, будет превращена в работу.

Всегда, когда с помощью теплового двигателя мы превращаем теплоту (например, теплоту сгорания каменного угля или нефти) в работу, мы вынуждены мириться с компенсированием этого процесса попутным нагреванием теплоотходного тела. Этим теплоотходным телом в некоторых случаях служит воздух (например, при выпуске отработавшего пара или газа в атмосферу), в иных случаях — вода, охлаждающая конденсатор, в котором сгущается отработавший пар.

Следовательно, *к. п. д. тепловой машины*, даже в том случае, если бы она была сконструирована идеально (без потерь на трение), *никогда не может быть равен единице, а всегда будет меньше.*

Тепловой двигатель должен быть приспособлен к длительной деятельности. Поэтому процессы, протекающие в тепловом двигателе, должны замыкаться в периодически повторяемый цикл. Говорят, что цикл имеет ту или иную форму, подразумевая под этим изображенную графически последовательность температурных, объемных и других изменений, претерпеваемых рабочим веществом двигателя (паром или газом). *К. п. д. тепловой машины* зависит от формы цикла, но более всего он зависит от тех пределов температур, внутри которых рабочее вещество машины выполняет цикл. Чем уже эти пределы температур при заданной температуре источника тепла, тем меньше *к. п. д.* Особенности физической и химической природы рабочего вещества не влияют на *к. п. д.* Для любого рабочего вещества наиболее выгодным для *к. п. д.* циклом является цикл, указанный впервые основателем термодинамики Сади Карно.

В *цикле Карно* (рис. 208, стр. 405) рабочее вещество сначала изотермически, потом адиабатно расширяется (в результате чего температура падает), а затем оно в той же последовательности — сначала изотермически, потом адиабатно — сжимается (в итоге оно приобретает исходную температуру и плотность). Термодинамический расчет (он будет приведен в следующих параграфах) показывает, что, работая по циклу Карно, тепловая машина имела бы *к. п. д., равный*

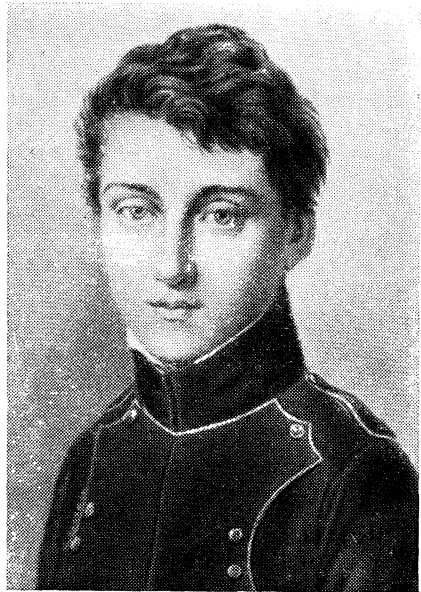
$$\eta = 1 - \frac{T_0}{T}, \quad (1)$$

где T — абсолютная температура, при которой происходит изотермическое расширение рабочего вещества (например, температура пара, подаваемого в цилиндр из котла), и T_0 — абсолютная температура, при которой происходит изотермическое сжатие рабочего вещества (например, температура конденсации пара в воду; значит, при выпуске пара в атмосферу $T_0 = 100 + 273,1 = 373,1^\circ \text{K}$)¹⁾. К. п. д. цикла Карно является максимальным для заданных пределов температур T и T_0 . На практике цикл Карно может быть осуществлен только приближенно. Поэтому в действительности термодинамический к. п. д. тепловых машин всегда меньше, чем $\frac{T-T_0}{T}$.

Значительные потери тепла в топке и потери на трение еще более понижают полный к. п. д. тепловых двигателей.

Следует иметь в виду, что низшая температура T_0 в формуле Карно только в исключительных случаях может совпадать с температурой среды; вообще же T_0 превышает температуру среды и определяется давлением, до которого производится расширение рабочего вещества (понятно, что это давление должно превышать противодействие среды или же, в предельном случае, оно может совпадать с противодействием среды); чем меньше это давление, тем ниже T_0 .

Очевидно, что температура T_0 в формуле Карно представляет собой температуру рабочего вещества в конце рабочего расширения. Для паровой машины это есть вместе с тем температура конденсации пара в воду (при атмосферном давлении 100°C , т. е. 373°K ;



Сади Карно (1796—1832).

¹⁾ В некоторых книгах, к сожалению, дана недопустимая трактовка формулы Карно: в примерах, поясняющих применение формулы (1), для случая выпуска отработавшего пара в атмосферу вместо T_0 ошибочно предлагается ставить не температуру конденсации пара при давлении среды, а температуру среды, что приводит к неверным, завышенным значениям к. п. д., не имеющим ничего общего с действительным верхним пределом к. п. д. идеальной паровой машины. Аналогичная ошибка допускается и в отношении двигателей внутреннего сгорания, когда T_0 означает температуру отработавших газов, а не температуру среды, в которую производится выхлоп.

при выбросе пара в конденсатор T_0 снижается соответственно давлению в конденсаторе). Оценивая посредством формулы Карно максимальный к. п. д. «идеального» двигателя внутреннего сгорания или газовой турбины, под температурой T_0 нужно понимать температуру продуктов сгорания при выхлопе, когда рабочее расширение должно до противодействия среды.

§ 100. Уравнение Пуассона. Адиабатная работа газа

Процессы адиабатного расширения и сжатия газов (или процессы близкие к ним) широко используются почти во всех термодинамических циклах тепловых и холодильных машин, а также в различных пневматических машинах и компрессорах. Эти процессы играют также существенную роль в атмосферных явлениях, в явлениях упругости (при быстрых изменениях напряжения), в звуковых явлениях и др.

Уравнение, связывающее параметры состояния газа при равновесном адиабатном расширении или сжатии, было дано Пуассоном (в 1823 г.). Уравнение Пуассона, как показано ниже, легко выводится из первого начала термодинамики; причем обнаруживается, что некоторая функция параметров состояния («энтропия») при равновесных адиабатных процессах остается постоянной. Физический смысл упомянутой функции (энтропии) в полной мере раскрывается на основе второго начала термодинамики в совокупности с выводами статистической механики (§ 102, 103, 104).

В общем случае теплота Q , сообщаемая телу, идет на увеличение внутренней энергии и на производство работы A . При бесконечно малом изменении состояния $\delta A = p \, dv$ и

$$\delta Q = dU + p \, dv.$$

Поскольку для идеальных газов $U = \nu C_v T$, то

$$\delta Q = \nu C_v \, dT + p \, dv.$$

Если равновесное расширение или сжатие газа происходит адиабатно, т. е. без притока или отнятия тепла, когда $\delta Q = 0$, то очевидно, что изменение температуры и объема в этом случае подчинено нижеследующему уравнению:

$$\delta Q = \nu C_v \, dT + p \, dv = 0.$$

Чтобы проинтегрировать это уравнение, нужно разделить переменные, что легко достигается подстановкой $p = \nu \frac{RT}{v}$ и почленным делением на T :

$$\frac{\delta Q}{T} = \nu C_v \frac{\delta T}{T} + \nu R \frac{\delta v}{v} = 0.$$