

Глава 2. Второе начало термодинамики. Энтропия

§ 7. Второе начало термодинамики. Цикл Карно.

При количественной эквивалентности теплоты, как меры изменения внутренней энергии системы, и работы между ними существует качественное отличие, обусловленное статистической природой теплоты. Механическая работа может быть нацело превращена в теплоту (например, за счет трения) так, что единственным результатом совершения работы будет увеличение внутренней энергии системы, выражающееся в ее нагреве. Превращение же теплоты в работу связано с определенными ограничениями, делающими невозможным существование вечно-го двигателя второго рода. Эти ограничения выражены **вторым началом термодинамики**, которое исторически было сформулировано раньше первого.

Существует большое число эквивалентных формулировок второго начала термодинамики. Мы рассмотрим две из них, а именно, постулат Кельвина и постулат Клаузиуса.

Постулат Кельвина гласит. Невозможен процесс, **единственным** конечным результатом которого будет превращение в работу теплоты, взятой от **одного источника**. Важной частью данного постулата является условие, что превращение теплоты в работу является единственным конечным результатом процесса. В § 5 мы рассмотрели, например, изотермическое расширение газа в цилиндре с подвижным поршнем. В этом процессе газ совершает работу за счет теплоты, взятой от одного источника. Однако совершение работы не является здесь единственным результатом. Для того чтобы совершать работу, газ должен увеличивать свой объем.

Постулат Клаузиуса предполагает существование двух тел с разными температурами и утверждает следующее. Невозможен процесс, **единственным** конечным результатом которого был бы переход теплоты **от менее** нагретого тела **к более** нагретому. Докажем эквивалентность постулатов Кельвина и Клаузиуса.

Предположим, что постулат Кельвина может не выполняться. Это означает, что существует некоторый процесс, **единственным** конечным результатом кото-

рого является полное превращение в работу теплоты, взятой от одного источника. Пусть T_1 – температура этого источника. Тогда путем трения можно снова превратить эту работу в теплоту, увеличивая температуру другого тела, имевшего первоначально температуру T_2 , которая вполне могла быть и больше, чем T_1 . Таким образом, единственным конечным результатом данного процесса был бы переход теплоты от менее нагретого тела к более нагретому телу, что нарушает постулат Клаузиуса.

Для доказательства, что нарушение постулата Клаузиуса влечет за собой и нарушение постулата Кельвина, нам потребуется специальный «инструмент» – **цикл Карно**. Этот цикл интересен и сам по себе, поскольку является одним из важнейших элементов рассуждений, проводимых в термодинамике.

Согласно постулату Кельвина, невозможно превратить в работу теплоту, полученную системой от одного источника, так чтобы по окончании процесса система вернулась в исходное состояние. Последнее важно для практики. Если мы хотим сделать двигатель, работающий за счет какого-либо источника теплоты, то желательно (или даже необходимо), чтобы по завершении работы двигатель был таким же, как и в начале работы.

Естественно допустить, что система, совершившая положительную работу за счет теплоты, взятой от некоторого источника теплоты с температурой T_2 , сможет вернуться в исходное состояние, лишь отдав определенное количество теплоты другому источнику теплоты (холодильнику), имеющему температуру $T_1 < T_2$. Важнейшим вариантом процесса, в ходе которого система совершает работу, обмениваясь теплотой с источниками теплоты с температурами T_2 и T_1 , является цикл Карно. Следует также отметить, что цикл Карно представляет собой единственно возможный обратимый цикл, в котором совершение работы происходит при использовании двух источников теплоты с фиксированными температурами.

Рассмотрим некоторое количество газа, помещенного в цилиндр с подвижным поршнем. Газ в цилиндре обычно называют рабочим телом. Газ может приводиться в тепловой контакт с одним из двух источников теплоты – с нагревателем,

имеющим температуру T_2 , и холодильником, имеющим температуру T_1 . Исключим из рассмотрения те изменения, которые по ходу процесса будут происходить с веществом цилиндра и поршня. Считая, что процесс изменения состояния газа происходит квазистатически, изобразим его наглядно на диаграмме (p, V) на рис 3.

Пусть в начальном состоянии a цилиндр с газом при температуре T_2 находится в тепловом контакте с нагревателем. При сохранении этого контакта газу предоставляется возможность изотермического расширения до состояния b (например, понемногу уменьшается груз, лежащий на поршне и уравнивающий давление газа). В состоянии b исключается тепловой контакт с нагревателем, цилиндр с газом изолируется от источников теплоты, и газ продолжает расширяться уже адиабатически. По достижении температурой газа при адиабатическом расширении значения T_1 в состоянии c газ приводится в тепловой контакт с холодильником, имеющим температуру T_1 .

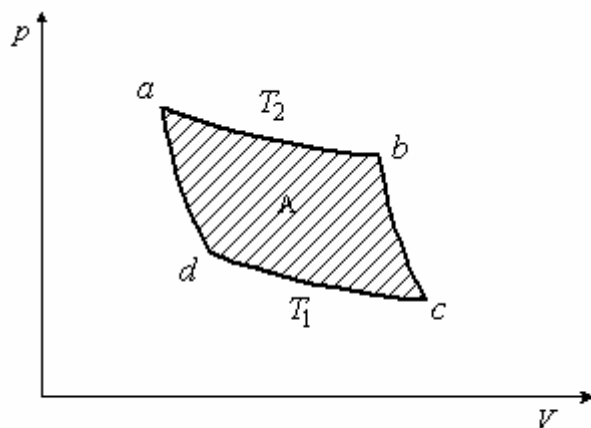


Рис. 3. Диаграмма состояний газа в цикле Карно

Поднимая поршень с грузом при переходе из состояния a в состояние c , газ совершает некоторую положительную работу, которая геометрически изображается площадью под кривой abc . Возвращение газа в исходное состояние a начинается с изотермического сжатия газа (например, путем постепенного увеличения груза, лежащего на поршне) при температуре холодильника T_1 до такого состояния d , из которого газ может быть переведен в состояние a уже путем дальней-

шего адиабатического сжатия. На этом отрезке цикла совершает работу внешняя сила, сжимающая газ сначала изотермически, а затем адиабатически. Эта работа геометрически изображается площадью под кривой adc . Полезная работа A , произведенная рабочим телом (газом) представлена площадью цикл $abcd$. Отличие этой работы от нуля геометрически связано, очевидно, с разным наклоном изотерм и адиабат.

Во время изотермического расширения от состояния a до состояния b рабочее тело получает от нагревателя с температурой T_2 количество теплоты Q_2 . При изотермическом сжатии от состояния c до состояния d рабочее тело отдает количество теплоты Q_1 (поглощает количество теплоты $-Q_1$) холодильнику с температурой T_1 . Общее количество теплоты Q , полученной рабочим телом за время цикла, равно разности этих величин:

$$Q = Q_2 - Q_1. \quad (7.1)$$

Поскольку рабочее тело по окончании цикла возвращается в исходное состояние, то результирующее изменение его внутренней энергии равно нулю. Из первого начала термодинамики заключаем тогда, что работа A , совершенная рабочим телом за время цикла, равна

$$A = Q = Q_2 - Q_1. \quad (7.2)$$

Видно, таким образом, что только часть количества теплоты Q_2 , полученной рабочим телом от нагревателя, переходит в цикле Карно в работу. Количество теплоты Q_1 из общего количества Q_2 с необходимостью передается холодильнику, без чего рабочее тело не может вернуться в исходное состояние.

Идеализированная тепловая машина, в которой реализуется цикл Карно, может быть охарактеризована коэффициентом полезного действия (к.п.д. цикла Карно). Поскольку теплота, отданная холодильнику, в этом цикле считается безвозвратно потерянной, то под к.п.д. η понимается отношение совершенной рабочим телом работы A к количеству теплоты Q_2 , взятой от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}. \quad (7.3)$$

В силу обратимости всех, составляющих цикл Карно процессов, он может быть проведен в обратном направлении. При этом на отрезке цикла dc при изотермическом расширении газа от холодильника будет получено количество теплоты Q_1 , а при изотермическом сжатии газа на отрезке цикла ba нагревателю будет передано количество теплоты Q_2 . Для реализации обратного цикла над рабочим телом должна быть совершена положительная внешняя работа:

$$-A = Q_2 - Q_1. \quad (7.4)$$

С помощью обратного цикла Карно можно, таким образом, совершая работу, передавать некоторое количество теплоты от менее нагретого тела (дополнительно охлаждая его) к более нагретому телу. При использовании цикла Карно для охлаждения (в холодильной машине) естественно понимать под эффективностью машины χ отношение взятой в цикле от охлаждаемого источника теплоты Q_1 к совершенной при реализации цикла внешней работе $-A$:

$$\chi = \frac{Q_1}{-A} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{1 - \eta}{\eta}, \quad (7.5)$$

где учтены (7.3), (7.4).

Применим цикл Карно для окончательного доказательства эквивалентности постулатов Кельвина и Клаузиуса.

Допустим, что постулат Клаузиуса не верен и возможен процесс, единственным конечным результатом которого стала передача некоторого количества теплоты Q_2 от менее нагретого тела с температурой T_1 более нагретому телу с температурой T_2 . Дополним этот процесс циклом Карно, использующим данные тела с температурами T_2 и T_1 в качестве нагревателя и холодильника, соответственно. Пусть цикл, действуя в прямом направлении, получает от нагревателя количество теплоты Q_2 . Часть этой теплоты превращается в работу цикла A , а часть в количестве Q_1 возвращается телу с температурой T_1 . В результате реализации описанного сложного процесса состояние тела с температурой T_2 не изменится. Сколько теплоты это тело получило в нарушение постулата Клаузиуса от менее нагретого тела с температурой T_1 , столько же оно отдало рабочему телу в цикле Карно.

Единственным результатом сложного процесса будет, таким образом, совершение в цикле Карно работы A за счет количества теплоты $Q_2 - Q_1$, взятой от одного источника. Это противоречит постулату Кельвина.