

этого тела Здесь также указывается на невозможность превращения тепла в работу без компенсации.

Оствальд предложил следующую (пятую) формулировку: *осуществление перпетуум-мобиле второго рода невозможно*. Вспомним, что двигатель, который был бы способен производить работу в количестве, большем по сравнению с тем количеством энергии, которое он поглощает извне, другими словами, двигатель, который сам бы рождал энергию, называется *перпетуум-мобиле первого рода*. Под *перпетуум-мобиле второго рода* подразумевают такой тепловой двигатель, который, повторяя произвольное число раз один и тот же процесс, был бы способен целиком превращать в работу все тепло, черпаемое им у какого-нибудь тела или тел, играющих роль источников тепла (не нуждаясь, таким образом, в других телах, служащих для «стока» теплоты, не превращенной в работу). Например, если бы можно было изобрести такую паровую машину, которая все тепло, заимствуемое у котла, полностью превращала бы в работу и не нуждалась бы, следовательно, ни в холодильнике, ни в каком-либо теле, заменяющем холодильник, то эта машина была бы перпетуум-мобиле второго рода (у паровых машин холодильником служит конденсатор или, в менее экономичных машинах, атмосферный воздух).

Обе эти машины с точки зрения нужд человека являются особо привлекательными. Будь построено перпетуум-мобиле первого рода, человечеству уже не надо было бы больше заботиться о топливе, химическая энергия которого преобразуется в двигателях внутреннего сгорания и в паровых машинах в энергию механическую, не надо было бы сооружать плотины на реках для гидросиловых установок. Будь построено перпетуум-мобиле второго рода, мы овладели бы неисчерпаемыми природными запасами внутренней энергии тел. Простой расчет показывает, что посредством перпетуум-мобиле второго рода мы могли бы, преобразуя заимствованную у воды океанов теплоту в работу, приводить в движение машины всех заводов, существующих во всех странах света, и только через 1700 лет заметили бы, что температура воды в океанах понизилась на одну сотую градуса.

Планк формулирует второе начало так (шестая формулировка): *невозможно построить периодически действующую машину, которая не производит ничего другого, кроме поднятия груза и охлаждения резервуара теплоты*. Это есть повторение формулировки Оствальда, в которой расшифрованы слова «перпетуум-мобиле второго рода».

3.2. Цикл Карно

Основатель термодинамики Сади Карно установил второе начало, изучая проблему возможного повышения коэффициента полезного действия тепловых машин.

По Карно, *наибольший коэффициент полезного действия тепловой машины не зависит от природы рабочего тела и вполне определяется предельными температурами, между которыми машина работает* (это в нашем обзоре — седьмая формулировка второго начала).

Приведенное утверждение можно рассматривать как следствие невозможности перпетуум-мобиле второго рода. Схема рассуждений такова. Вначале берем в качестве рабочего тела идеальный газ. Пользуясь уравнениями Клапейрона — Менделеева и Пуассона, подсчитываем коэффициент полезного действия тепловой машины, в которой идеальный газ в качестве рабочего тела совершает обратимый цикл, ограниченный двумя адиабатами и двумя изотермами (цикл Карно, рис. 7). Подсчет показывает, что коэффициент полезного действия равен разности температур теплоисточника и холодильника, деленной на абсолютную температуру теплоисточника. Выполним этот подсчет. Идеальный газ, содержащийся в цилиндре машины, расширяясь, выталкивает поршень и производит работу. При этом в первой изотермиче-

ской стадии расширения (рис. 7, кривая 1—2) теплоисточник отдает, а идеальный газ получает теплоту Q , равную работе расширения газа. Действительно, внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры; следовательно, поскольку температура неизменна, то и внутренняя энергия газа неизменна и, стало быть, по первому началу термодинамики теплота, изотермически сообщаемая газу, равна работе, которую производит газ; из уравнения $Q = \Delta U + A$, если $\Delta U = 0$, то $Q = A$.

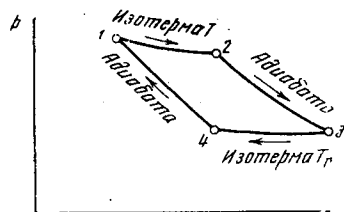


Рис. 7. Цикл Карно

Допустим в цилиндре содержится ν молей газа. По уравнению Клапейрона — Менделеева (1.7)

$$pv = \nu RT.$$

Расширяясь изотермически при температуре T теплоисточника от объема v_1 до объема v_2 , газ произведет работу, равную теплоте Q , которую газ забирает у теплоисточника:

$$Q = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{\nu RT}{v} dv = \nu RT \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (3.1)$$

Во второй адиабатной стадии расширения (рис. 7, кривая 2—3) работа производится за счет убыли внутренней энергии газа, т. е. за счет падения температуры газа от уровня теплоисточника (T) до уровня холодильника (T_0). При этом газ не получает и не отдает тепла. Затем идеальный газ сжимается изотермически от объема v_3 до объема v_4 , определяемого пересечением изотермы холодильника с начальной адиабатой. На это сжатие газа (рис. 7, кривая 3—4) должна быть затрачена работа, которая вследствие изотермичности процесса окажется целиком превращенной в теплоту Q_0 , отдаваемую газом холодильнику:

$$Q_0 = \int_{v_4}^{v_3} p dv = \int_{v_4}^{v_3} \frac{\nu RT_0}{v} dv = \nu RT_0 \ln \frac{v_3}{v_4}. \quad (3.2)$$

Цикл завершается адиабатной стадией сжатия газа до исходного объема v_1 , когда затрачиваемая работа идет на повышение температуры газа до первоначального значения, т. е. до уровня теплоисточника; при этом газ не получает и не отдает тепла.

За цикл газ получает теплоту Q и отдает теплоту Q_0 . Поскольку к концу цикла газ возвращен к своему исходному состоянию, то, стало быть, разность теплот $Q - Q_0$ превращена в работу A , произведенную газом как рабочим телом за один цикл. По определению, коэффициент полезного действия есть отношение этой работы к теплоте, полученной рабочим телом от теплоисточника, т. е.

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{Q - Q_0}{Q}. \quad (3.3)$$

Заметим теперь, что по уравнению Пуассона (1.19) произведение pv^κ остается неизменным при равновесном адиабатном расширении или сжатии. Если в этом произведении заменить давление его выражением из уравнения $p = \nu RT/v$, то легко видеть, что закон Пуассона преобразуется к следующему виду:

$$Tv^{\kappa-1} = \text{const}, \quad (3.4)$$

т. е. адиабата идеального газа характеризуется неизменностью произведения $Tv^{\kappa-1}$.

Объемы v_2 и v_3 лежат на одной адиабате, причем объем v_2 соответствует температуре T , а объем v_3 — температуре T_0 . Следовательно,

$$T v_2^{\kappa-1} = T_0 v_3^{\kappa-1}.$$

Так как объемы v_1 и v_4 также лежат на одной адиабате и отвечают тем же температурам T и T_0 , то и для них можно написать аналогичное уравнение

$$T v_1^{\kappa-1} = T_0 v_4^{\kappa-1}.$$

Разделив первое из этих уравнений на второе и извлекая из обоих полученных отношений корень степени $\kappa - 1$, находим, что

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}.$$

Учитывая это обстоятельство, подставим (3.1) и (3.2) в (3.3) и, сократив числитель и знаменатель на равные величины

$$\nu R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \text{и} \quad \nu R \ln \frac{v_3}{v_4},$$

находим, что

$$\eta = \frac{T - T_0}{T}. \quad (3.3')$$

т. е., как было сказано выше, *к.п.д. цикла Карно для машины, работающей на идеальном газе, равен отношению разности температур теплоисточника и холодильника к абсолютной температуре теплоисточника.*

Теперь мы должны обратиться к рассуждению о двух «сопряженных» друг с другом машинах Карно, из которых одна работает на идеальном газе, а другая — на произвольном веществе. Следуя Клаузиусу, мы покажем, что если к.п.д. у одной из этих машин был бы больше, чем у другой, то это привело бы к перпетуум-мобиле второго рода.

3.3. Рассуждение Клаузиуса о двух сопряженных машинах Карно

Итак, наряду с машиной, у которой рабочим телом является идеальный газ (первая машина), возьмем вторую машину, у которой рабочим телом является произвольное вещество, например какой-либо пар или жидкость. Обе машины имеют общий теплоисточник и холодильник. Пусть первая машина забирает у теплоисточника тепло Q , отдает холодильнику тепло Q_0 , производит работу $A = Q - Q_0$ и имеет к.п.д.

$$\eta = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T}.$$

Что касается второй машины, то пусть ее размеры позволяют подчинить режим ее работы тому условию, чтобы теплота Q' , забираемая второй машиной за каждый цикл у теплоисточника, была равна теплоте, забираемой у теплоисточника первой машиной: $Q' = Q$. Если при этом условии работа, производимая за один цикл второй машиной, равна работе, выполняемой за один цикл первой машиной ($A' = A$), то тогда, очевидно, равны и их к.п.д. ($\eta' = \eta$) и равны теплоты, отдаваемые машинами холодильнику ($Q'_0 = Q_0$). Но допустим, что к.п.д. наших машин не равны, и, стало быть, не равны работы, производимые ими за один цикл, а также и теплоты, отдаваемые ими холодильнику. Например, допустим, что к.п.д. первой машины больше, чем второй: $\eta > \eta'$ и, следовательно, $A > A'$. Это означает, что первая машина превращает работу в большую, чем вторая машина, часть тепла, забираемого