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,

$$Tv_2^{\varkappa-1} = T_0 v_3^{\varkappa-1}.$$

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

$$Tv_1^{\varkappa-1} = T_0 v_4^{\varkappa-1}.$$

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

$$\eta = \frac{T - T_0}{T}, \tag{3.3'}$$

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 бóльшую, чем вторая машина, часть тепла, забираемого

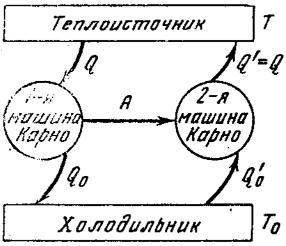

Рис. 8. Термодинамическая схема двух сопряженных машин Карно

у теплоисточника, и, следовательно, отдает холодильнику меньше тепла, чем вторая: $Q_0 < Q_0'$. Поступим так: направим работу, производимую первой машиной, на то, чтобы заставить рабочее тело второй машины описывать цикл Карно в обратном направлении (причем оно будет вследствие расширения при температуре T_0 забирать у холодильника тепло Q_0 и вследствие сжатия при T отдавать теплоисточнику тепло Q). Иначе говоря, используем первую машину как двигатель и заставим вторую работать как холодильную машину, потребляющую на каждый цикл работу A' и переносящую тепло Q_0' от холодного тела к нагретому, причем это нагретое тело, являющееся для первой машины теплоисточником, получает сверх теплоты Q_0 еще теплоту за счет подводимой работы; всего за цикл оно получает тепло $Q' = Q$. На рис. 8 представлена схема двух сопряженных указанным образом машин Карно. Согласно сделанному нами допущению $A > A'$, и, стало быть, в итоге совокупность обеих машин за каждый цикл даст работу, равную положительной разности $A - A'$, а холодильник потеряет теплоту, эквивалентную этой работе $A - A'$ (действительно, от первой машины холодильник получает тепло Q_0, а второй отдает большее количество тепла Q_0', т. е. в итоге холодильник теряет тепло $Q_0' - Q_0$; но $A = Q - Q_0$ и $A' = Q' - Q_0'$, и поскольку $Q = Q'$, то $Q_0' - Q_0 = A - A'$). Что же касается теплоисточника, то его состояние не изменяется, так как первой машине он отдает столько же тепла, сколько получает от второй. Таким образом, никакой компенсации превращения тепла в работу здесь нет, т. е. указанное сочетание двух машин Карно представляло бы собой перпетуум-мобиле второго рода. Мы пришли к противоречию со вторым началом термодинамики, что указывает на неправильность сделанного допущения о неравенстве к.п.д. рассмотренных машин. Строго говоря, мы убедились пока только в том, что к.п.д. первой машины, с идеальным газом в качестве рабочего тела, не может быть больше (как мы это сначала допустили), чем к.п.д. второй машины. Но не может ли он оказаться меньше, чем у второй машины? Допустим, что это так. Тогда машину с идеальным газом в качестве рабочего тела мы заставим работать как холодильную, а машину с произвольным рабочим телом используем как двигатель. Все приведенные рассуждения остаются в силе, только вторую машину мы будем теперь именовать первой, а машину, работающую на идеальном газе, второй. Мы опять придем к противоречию со вторым началом. Стало быть, *к.п.д. машины Карно с идеальным газом в качестве рабочего тела не может быть ни больше, ни меньше, чем к.п.д. аналогичной машины, работающей между теми же пределами температур, но имеющей в качестве рабочего тела не идеальный газ, а любое вещество.*

3.4. Коэффициент полезного действия любого обратимого цикла

Принцип Карно сыграл ведущую роль в развитии научных основ теплотехники. На основе этого принципа стало ясно, что для повышения к.п.д тепловых машин важно идти по пути расширения температурных пределов, между которыми происходит цикл рабочего тела, тогда как замена одного