

2.3 Круговые процессы или циклы

Процесс, в результате которого рабочее тело возвращается в исходное состояние, называется круговым процессом или *циклом*. Для цикла, изображенного в p, v – диаграмме на рис.2.4 очевидно, что положительная работа расширения – площадь $1a2bc1$ под кривой $dV > 0$, больше, чем работа сжатия при $dV < 0$. Этот цикл есть цикл двигателя. Представив этот же цикл в T, s – диаграмме (рис.2.5), можно заключить, что он будет обратимым только при использовании бесконечно большого числа источников теплоты. В самом деле, температура рабочего тела в этом цикле непрерывно изменяется и обратимый теплообмен между ним и источниками теплоты возможен лишь при бесконечно большом их количестве.

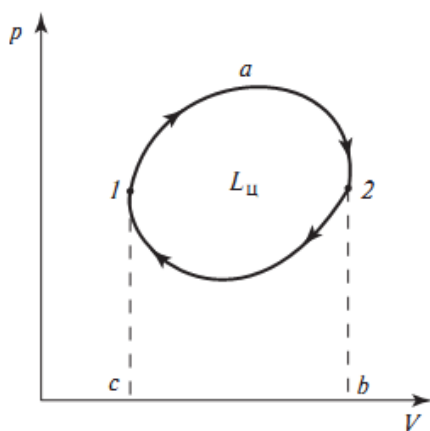


Рис. 2.4

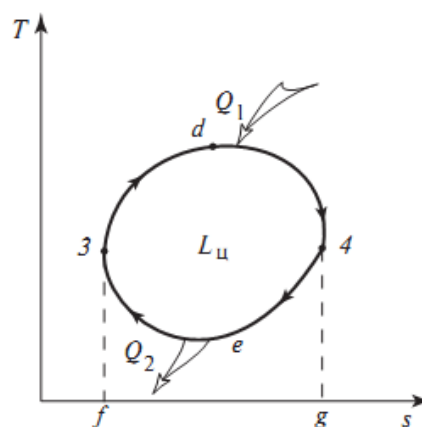


Рис. 2.5

Функционирование цикла подчиняется двум законам термодинамики:

- так как изменение внутренней энергии рабочего тела за цикл равно нулю, то по первому закону термодинамики (1.10) работа цикла равна суммарной теплоте за цикл

$$L_{\text{ц}} = Q_{\text{ц}} ; \quad (2.8)$$

- второй же закон утверждает, что теплота Q_1 должна быть получена от источников на одних участках цикла и в количестве Q_2 отдаваться другим источникам и, следовательно,

$$L_{\text{ц}} = Q_1 - Q_2 \quad (2.9)$$

В цикле, изображенном на рис.2.5, площадь под кривой, где подводится теплота ($dS > 0$) –пл. 3-d-4-g-f-3, больше, чем под кривой, где она отводится ($dS < 0$) –пл. 4-3-f-g-4. Поэтому $L_{\text{ц}} > 0$ и цикл действительно является циклом двигателя. Заметим, что еще одно достоинство T, s – диаграммы состоит в том, что в ней можно показать площадь, эквивалентную работе обратимого цикла. На рис.2.5 это площадь 3-d-4-e-3.

Цикл, представляемый в диаграммах p, v или T, s последовательностью линий, следующих по часовой стрелке, называется *прямым циклом* или циклом двигателя. Показателем эффективности

прямого обратимого цикла –полноты преобразования подводимой теплоты в работу –служит *термический коэффициент полезного действия цикла.*

$$\eta_T = L_{ц}/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 \quad (2.10)$$

или, переходя к удельным величинам,

$$\eta_T = 1 - q_2/q_1 \quad (2.11)$$

При минимальном числе источников теплоты – двух –прямой цикл может быть обратимым, если теплообмен происходит при постоянных температурах и бесконечно малой разности температур между рабочим телом и источниками теплоты, переход от одного источника к другому осуществляется без теплообмена (адиабатно) и во всех процессах отсутствует трение. Такой цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, называется *прямым обратимым циклом Карно.* В диаграмме T,s (рис. 2.6) он изображается контуром 1-2-3-4-1, поскольку адиабатный обратимый процесс ($dq = 0$), согласно (2.2), является *изоэнтропным* ($s = \text{constant}$).

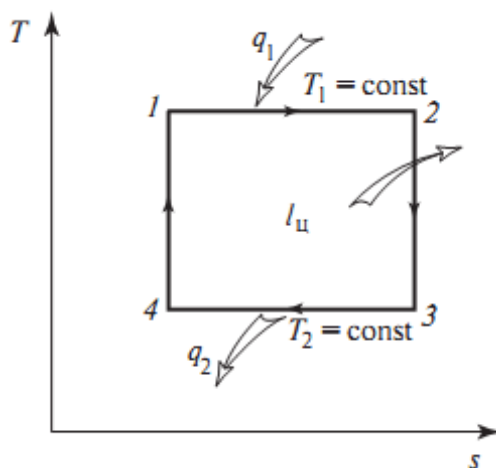


Рис. 2.6

Термический КПД цикла Карно определим, выразив теплоту, подводимую и отводимую в изотермических процессах, по (2.1)

$$\eta_T = 1 - T_2(s_3 - s_4)/T_1(s_2 - s_1)$$

откуда

$$\eta_T = 1 - T_2/T_1 \quad (2.12)$$

Таким образом, термический КПД цикла Карно зависит только от температур источников теплоты.

Сравнение степени влияния этих температур на термический КПД можно провести, сопоставив результаты дифференцирования (2.12) вначале по T_1 , затем по T_2 . Это дает

$$\left(\frac{\partial \eta_T}{\partial T_1}\right)_{T_2} = -\frac{T_2}{T_1} \left(\frac{\partial \eta_T}{\partial T_2}\right)_{T_1} \text{ и } \left|\left(\frac{\partial \eta_T}{\partial T_1}\right)_{T_2}\right| < \left|\left(\frac{\partial \eta_T}{\partial T_2}\right)_{T_1}\right|$$

Следовательно, влияние температуры нижнего источника теплоты противоположно по знаку и существенно (в отношении T_2/T_1) больше влияния температуры верхнего источника теплоты.

Термический КПД цикла Карно является пределом возможности преобразования теплоты в работу с помощью теплового двигателя в заданных условиях. В определенном интервале температур T_1 и T_2 любой произвольный обратимый цикл имеет термический КПД ниже, чем КПД цикла Карно.

Действительно, представим в T,s – диаграмме (рис. 2.7) совместно цикл Карно 1-2-3-4 и произвольный обратимый цикл a-b-c-d. Для этого цикла на участке подвода теплоты a-b-c найдем среднеинтегральную (в дальнейшем называемую просто средней) температуру подвода теплоты $T_{1,ср}$, а на участке отвода теплоты c-d-a – среднюю температуру отвода теплоты $T_{2,ср}$. Термический КПД обратимого цикла запишем как

$$\eta_T = 1 - T_{2,ср}(s_c - s_a) / T_{1,ср}(s_c - s_a)$$

Тогда

$$\eta_T = 1 - T_{2,ср} / T_{1,ср} \quad (2.13)$$

Таким образом, термический КПД произвольного обратимого цикла можно представить в таком же виде, как и КПД цикла Карно, но только в нем фигурируют средние температуры подвода и отвода теплоты. На рис. 2.7 видно, что $T_{1,ср} < T_1$, $T_{2,ср} > T_2$. Следовательно, $\eta_T < \eta_T^k$, где η_T^k – термический КПД цикла Карно.

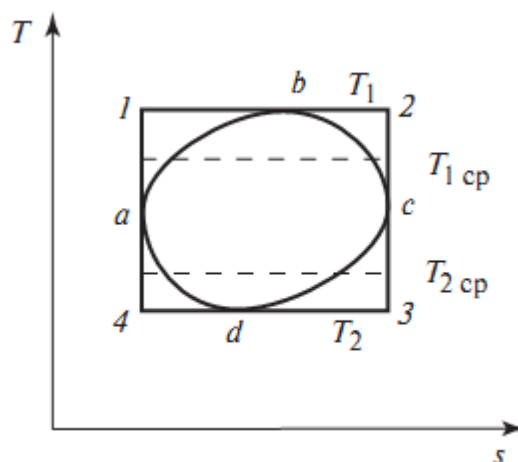


Рис. 2.7

Можно представить и несколько иную модификацию цикла Карно (рис. 2.8). В этом цикле – обобщенном цикле Карно – теплота, отбираемая от рабочего тела на участке 1-2, полностью

используется для нагревания его на участке 3-4. Для этого необходимо, чтобы линии 1-2 и 3-4 были в T,s -диаграмме эквидистантны, для чего теплоемкости рабочего тела при каждой температуре в этих процессах должны быть одинаковы, а теплообмен должен происходить при бесконечно малой разности температур. Этот процесс, называемый *регенерацией*, является адиабатным по отношению к внешней среде, а подвод и отвод теплоты от тепловых источников осуществляется только по изотермам как и в основном цикле Карно. Поэтому и термический КПД обобщенного цикла Карно равен таковому цикла Карно.

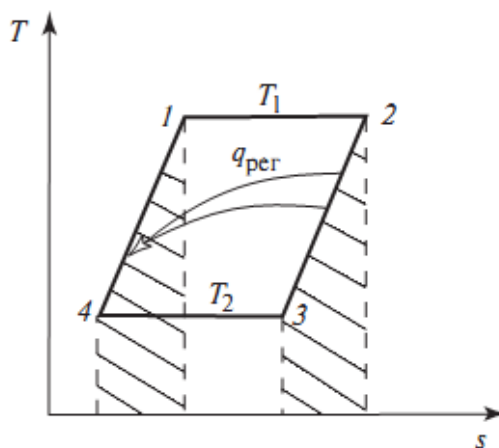


Рис. 2.8

Обратимый цикл Карно можно осуществить и при противоположном направлении чередования процессов –против часовой стрелки (рис. 2.9). В этом случае он называется *обратным обратимым циклом Карно*. В нем за счет затраты работы осуществляется передача теплоты низкотемпературного источника источнику, имеющему более высокую температуру. В зависимости от назначения и используемого диапазона температур различают *цикл холодильной машины* и *цикл теплового насоса*.

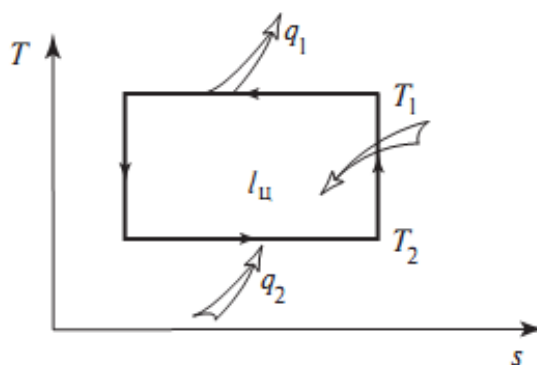


Рис. 2.9

Назначение холодильной машины - отводить теплоту q_2 от холодильной камеры, поддерживая в ней температуру T_2 более низкую, чем температура окружающей среды T_1 , и, подняв температуру хладагента за счет затраты работы, отдать теплоту q_1 в окружающую среду. Показатель эффективности этого цикла – *холодильный коэффициент* – равен отношению отведенной теплоты к затраченной работе

$$\varepsilon = q_2 / l_{\text{ц}} \quad (2.14)$$

Выразив эти величины через температуры и разность энтропии, для цикла Карно получим

$$\varepsilon = T_2 / (T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

В зависимости от интервала температур значения холодильного коэффициента могут быть и больше и меньше единицы

В тепловом насосе используют даровую теплоту q_2 при температуре T_2 (теплота от окружающей среды, сбросные промышленные воды, обратная вода конденсатора и т.д.) и, увеличив температуру рабочего тела за счет затраты работы до уровня T_1 , приемлемого для системы отопления ($70 - 80^\circ\text{C}$), отдают теплоту q_1 для нужд отопления. Здесь полезный результат – теплота q_1 и эффективность цикла характеризуется *отопительным коэффициентом*, равным отношению полученной теплоты к затраченной работе

$$\mu = q_1 / l_{\text{ц}} \quad (2.16)$$

Для цикла Карно эта величина принимает вид

$$\mu = T_1 / (T_1 - T_2) \quad (2.17)$$

Значение отопительного коэффициента всегда больше единицы. Это означает, что при использовании электроэнергии для нужд отопления применение теплового насоса обеспечивает более высокую экономичность (в 3–4 раза!), чем применение электронагревателей.

В заключение заметим, что в обоих вариантах использования обратного цикла по существу происходит преобразование теплоты низкого потенциала (температуры) в теплоту высокого потенциала. Поэтому для холодильного коэффициента и отопительного коэффициента часто применяют обобщенное название – *коэффициент термотрансформации*