

Лекция 5

Второй закон термодинамики. Прямой и обратный цикл Карно

Обозначим первоначальную цель разработки и создания тепловой машины: обеспечить превращения тепловой энергии в механическую работу. Первый закон термодинамики указывает только распределение энергии подводимой к рабочему телу. Она будет использована на повышение внутренней энергии и для совершения работы. Так при совершении изохорного процесса вся энергия будет использована для повышения внутренней энергии с повышением температурного состояния рабочего тела. Работа в данном случае равна нулю. В изобарном процессе, первая часть энергии будет использована на повышения внутренней энергии с повышением температурного состояния рабочего тела (газа) и вторая часть на совершения работы рабочим телом против внешних сил, сил давления окружающей среды термодинамической системы или сил механического сопротивления. В изотермическом процессе, при сохранении температурного состояния рабочего тела, изменение внутренней составляющей (внутренней энергии) не происходит, и вся энергия будет использована для совершения работы.

Однако, первый закон не указывает каким образом должны протекать процессы, какие условия должны выполняться чтобы обеспечить эффективное превращение тепловой энергии в механическую работу. Вместе с тем, процесс изобарного или изотермического расширения не может длиться до бесконечности. В конце концов наступит момент термического или силового равновесия и процесс прекратится.

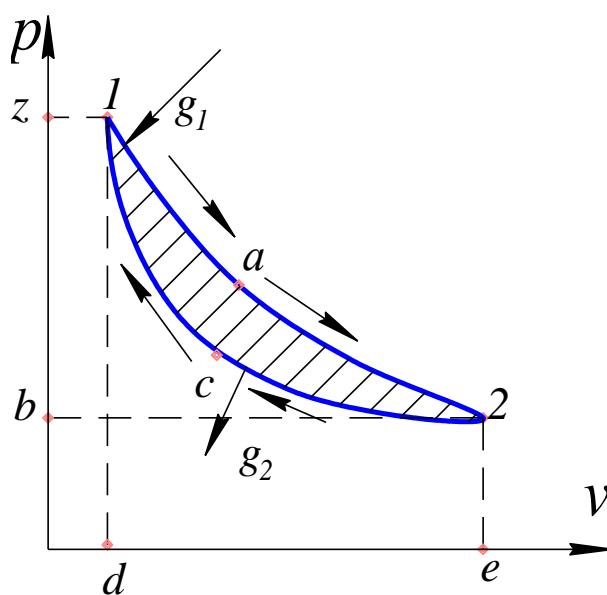


Рисунок 8 – Прямой цикл тепловой машины

Для того чтобы продолжит процесс перевода тепловой энергии в механическую работу необходимо вернуться в исходную точку, где должен быть источник энергии с более высокой температурой, откуда будет подведена новая порция тепловой энергии и процесс повторится. Такая совокупность процессов образует замкнутый цикл.

Однако, если возврат в исходную точку будет протекать по тому же пути, как и расширение, тогда работа расширения будет равна работе обратного сжатия, а полезная работа для совершения привода агрегата будет равна нулю. При ускоренном процессе, работа сжатия будет больше работы расширения, процесс можно совершить только за счет использования дополнительной работы. Если ее нет, процесс сжатия не будет происходить.

Остается третий вариант, уменьшить работу сжатия, путем дополнительного отвода теплоты от рабочего тела к холодному источнику, например в окружающую среду. Этот процесс будет протекать самопроизвольно и не требует дополнительной работы. Необходим холодный источник. Тогда линия сжатия пройдет ниже линии расширения. Работа расширения, рисунок 7, Q_1 будет больше работы сжатия Q_2 , часть работы расширения можно использовать для работы сжатия, по минимуму, вторую избыточную часть можно использовать для своих целей, совершения полезной механической работы перемещения, заштрихованная площадь $Q_1 - Q_2$.

Цикл, при котором работа расширения больше работы сжатия называют прямым циклом тепловой машины.

Эффективность тепловой установки оценивается термическим КПД цикла с учетом количества тепловой энергии переведенной в механическую работу

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 -- количество подведенной теплоты; Q_2 - количество отведенной теплоты перед или на участке процесса сжатия.

Существует и обратный цикл. Это когда процесс расширения происходит при более низкой температуре, чем процесс сжатия. В этом случае, при достаточно низкой температуре рабочего тела можно забрать часть теплоты от холодного источника, теплоту Q_2 .

С использованием дополнительной внешней работы, можно сжать рабочее тело с повышением температуры выше чем температура горячего источника и передать теплоту Q_1 равную сумме подведенной теплоты от охлаждаемого холодного источника Q_2 плюс механическая энергия от работы на сжатия l , превращенная в теплоту, $Q_1 = Q_2 + l$.

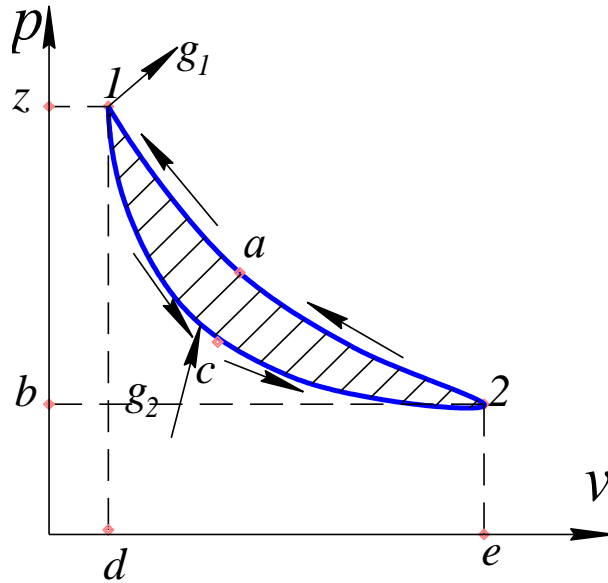


Рисунок9 – Обратный цикл тепловой машины (холодильная машина)

Эффективность тепловой установки, работающей по обратному циклу оценивается холодильным коэффициентом цикла

$$\varepsilon_x = \frac{q_2}{l},$$

холодильный коэффициент оценивает, какое количество теплоты отнимается от холодного источника при затрате единицы работы, один джоуль.

Отсюда основная формулировка второго закона термодинамики: невозможно создать постоянно действующую тепловую машину, где обеспечивалось бы полное превращение тепловой энергии в механическую работу, часть тепловой энергии необходимо передавать холодному источнику.

К. п. д. прямого цикла тепловой машины не может быть равен единице, потому что для реализации цикла и обеспечения получения свободной полезной работы, необходимо, на определенном участке цикла, часть теплоты отвести от рабочего тела и передать более холодному источнику, холодному теплоприемнику.

Прямой и обратный цикл Карно. Первый и оптимальный вариант реализации рабочего цикла тепловой машины для превращения тепловой энергии в механическую работу был предложен Саади Карно.

На первом участке расширения использовался изотермический процесс, как процесс полного превращения теплоты, подведенной на участке изотермического расширения, в работу.

Процесс последующего расширения в целом должен протекать с минимальными тепловыми потерями и по возможности с более низкими конечными значениями температур. Этому соответствует адиабатный процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой и возможностью глубокого снижения температурного состояния при адиабатном расширении. Процесс расширения завершен.

Теперь основной задачей необходимо считать обеспечить возврат рабочего тела в исходное состояние в процессе сжатия при минимальных затратах механической работы.

Для этого оптимальным вариантом является процесс изотермического сжатия с отводом части теплоты появляющейся в результате совершения механической работы над рабочим телом в процессе сжатия. Процесс изотермического сжатия необходимо продолжать до определенного момента. После его завершения будет продолжен процесс эффективного сжатия до достижения параметров состояния в первой исходной точке.

На данном этапе, оптимальным и эффективным процессом следует принять процесс адиабатного сжатия.

Таким образом, весь предложенный цикл складывается из двух изотермических процессов : 1-2 – процесс изотермического расширения и 3-4 – процесс изотермического сжатия, двух адиабат: 2-3 – процесс адиабатного расширения и 4-1 – процесс адиабатного сжатия.

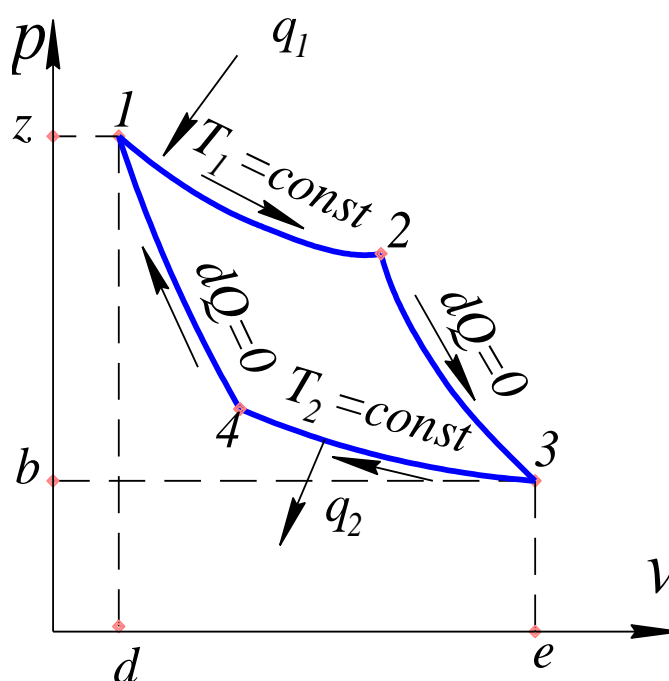


Рисунок 9 – Прямой цикл Карно

К. п. д. такого цикла определится из общего выражения для определения эффективности организованного цикла:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1},$$

$$q_1 = RT_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1},$$

$$q_2 = RT_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}.$$

Подставляем зависимости для определения q_1 и q_2 в уравнение для определения к п д цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{RT_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}}{RT_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

Для адиабатных процессов расширения 1-2 и сжатия 3-4 можно записать

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{V_2}{V_3} \quad \text{и} \quad \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{V_1}{V_4},$$

соответственно,

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_4} \quad \text{или} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}.$$

Вернемся к зависимости по определению термического к. п. д. цикла Карно с учетом приведенных зависимостей, получаем

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} .$$

Согласно анализа полученной зависимости, термический к п д цикла Карно определяется перепадом (градиентом) абсолютных температур между источником энергии (горячий источник) – T_1 и абсолютной температурой холодного источника – T_2 , не зависит от рода рабочего тела, повышается при повышении температуры горячего источника и при понижении температуры холодного источника, отдельно.

К.п.д. цикла Карно всегда ниже единицы, т.к. температура – T_2 не может быть равной нулю и температура – T_1 не может быть равной бесконечности. При равенстве температур $T_2 = T_1$ к. п. д. цикла равен нулю.

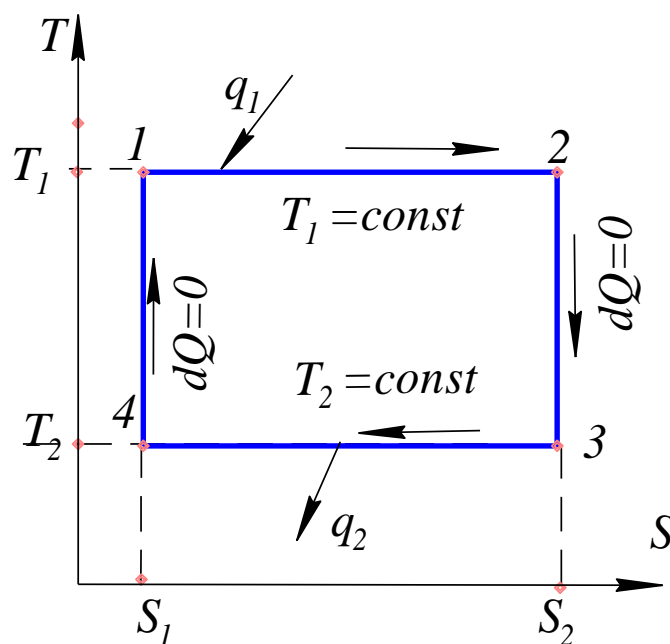


Рисунок 10 – Прямой цикл Карно в координатах T-S

Рассматривая цикл Карно в координатах $T - S$ прозрачно видно, что для определенной термодинамической системы с горячим источником с максимальной температурой T_1 и холодным источником с минимальной температурой T_2 , к. п. д. цикла по схеме Карно, будет иметь самый высокий термический к. п. д., по сравнению с любым циклом в интервале заданных температур.

Сравнение термического к п д любого предлагаемого цикла с к. п. д. цикла Карно в заданном интервале температур, позволяет выполнить оценку степени совершенства предложенного теплового цикла.

Обратимый цикл Карно может протекать не только в прямом направлении, но и в обратном.

Рабочее тело от начальной точки 1 расширяется адиабатно, с глубоким понижением температуры, ниже температуры T_2 .

В дальнейшем процессе изотермического расширения и температуре несколько ниже T_2 происходит отвод теплоты от холодного источника и подвод этой части теплоты – q_2 к рабочему телу.

На участке 3-2 адиабатного сжатия достигается повышение температуры рабочего тела чуть выше температуры горячего источника T_1 .

На участке изотермического сжатия, работа адиабатного сжатия, переведенная в теплоту и плюс теплота, полученная от холодного источника, передается горячему источнику, например в окружающую среду, в среду бытового помещения. Такой цикл тепловой машины называют циклом холодильной машины.

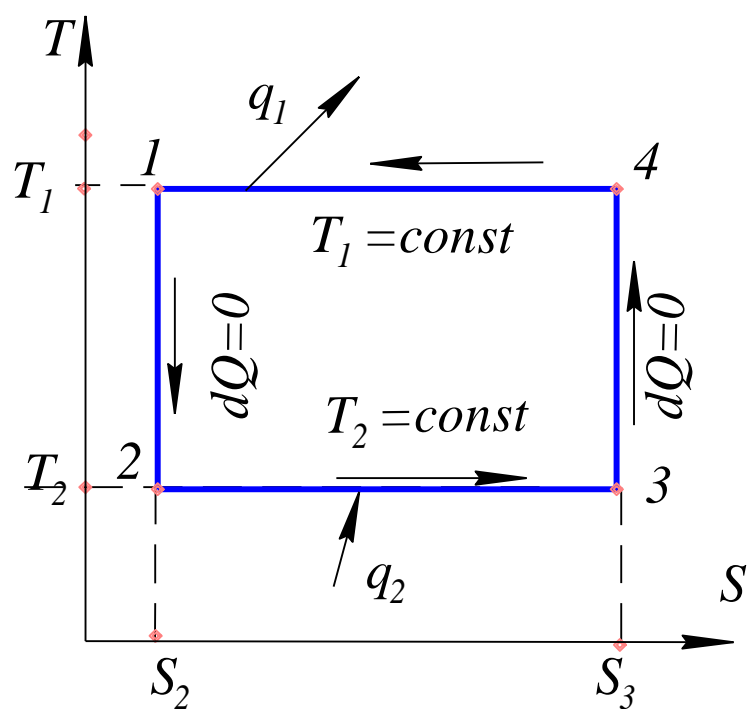


Рисунок 11 – Обратный цикл Карно в координатах T-S

Согласно теореме Карно, термический к.п.д. обратимого цикла Карно не зависит от свойств рабочего тела и является только функцией максимального значения температуры горячего источника теплоты и минимальной температуры холодного источника.