

3.5. Циклы. Тепловые машины.

3.5.1. Циклические процессы.

Циклическим называется процесс совершаемый системой, начало и конец которого совпадают. Иначе говоря, система совершает процессы, в результате которых она возвращается в свое первоначальное состояние. Пример такого процесса в переменных (p, V) , состоящего из двух частей 1-2 и 2-1, изображен на рис. 5.1, где стрелками показан обход общего контура. Цикл может состоять из большого числа отдельных частей, относящихся к каким-либо определенным процессам в газе, и может быть также пройден и в обратную сторону.

Работа газа, совершаемая при изменении объема от V_1 до V_2 , определяется площадью под кривой 1-2:

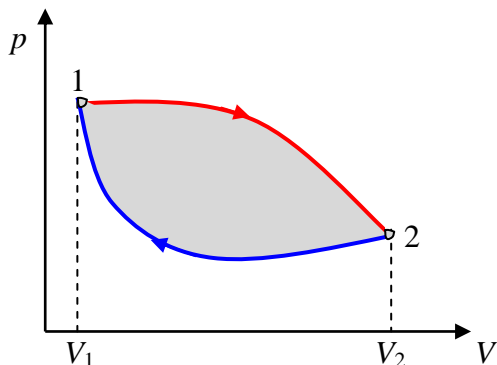


Рис. 5.1.

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV \quad (3.5.1)$$

Эта работа положительная, если идем по стрелке на участке 1-2 на рис. 5.1. Работа при переходе от точки 2 до точки 1 отрицательна и записывается аналогично:

$$A_{21} = \int_{V_2}^{V_1} p(V) dV \quad (3.5.2)$$

Полная работа, совершаемая в циклическом процессе, равна площади внутри замкнутой кривой, изображающей замкнутый цикл:

$$A = A_{12} + A_{21} \quad (3.5.3)$$

Если воспользоваться первым началом термодинамики (3.2.13) и пройти по всему замкнутому циклу 1-2-1, то можно проинтегрировать по рассматриваемому контуру:

$$\oint_{1-2-1} dQ = \oint_{1-2-1} dU + A \quad (3.5.4)$$

Интеграл по замкнутому контуру от внутренней энергии равен нулю, поскольку внутренняя энергия – функция состояния (полный дифференциал):

$$\oint_{1-2-1} dU = U_1 - U_1 = 0 \quad (3.5.5)$$

Тогда получаем, что вся работа, совершенная за цикл, получается за счет количества теплоты, которое поступило в систему:

$$\oint_{1-2-1} dQ = \oint_{1-2-1} p dV = A \quad (3.5.6)$$

Таким образом, можно преобразовать количество теплоты, проходящее через систему, в работу этой системы: при обходе цикла по часовой стрелке в систему поступает большее количество теплоты, чем отдается, поэтому система совершает положительную работу.

Если осуществлять цикл против часовой стрелки, то работа отрицательная. В этом случае система не совершает сама работу, а работа совершается над системой. Система преобразует эту работу в теплоту, передаваемую более нагретому телу.

3.5.2. Принципиальная схема тепловой машины.

Термодинамика возникла как наука, исследующая принципиальные возможности получения полезной механической работы за счет внутренней энергии тела. Устройства, предназначенные для получения работы за счет тепловой энергии, называются *тепловыми машинами*.

В XIX веке была надежда изобрести машину, которая бы отбирала тепловую энергию от окружающей среды и всю ее превращала в работу. *Вечный двигатель второго рода* – передача тепла от холодного тела к горячему без затрат внешней работы.

С микроскопической (статистической) точки зрения перенос тепла от холодного тела к более горячему сопровождается уменьшением энтропии (т.к. уменьшается беспорядок). Такие процессы запрещены вторым началом термодинамики. Вспомним закон возрастания энтропии: на основании закона о возрастании энтропии тепло всегда переходит от более горячего тела к холодному. Первое начало (закон сохранения энергии) не ограничивает эти процессы: перевод тепла в работу и обратно. Запрет на превращение тепла в работу, налагаемый вторым началом (закон возрастания энтропии), относится к замкнутой системе, состоящей из находящихся в непрерывном контакте тел с различной температурой.

Однако если между горячим и холодным телом поместить разъединяющее их *третье тело*, то за счет компенсирующих процессов в этом третьем теле можно осуществить и превращение тепла в работу и перенос тепла от холодного к горячему. На это обратил внимание С. Карно (1824), который разработал принципиальную схему тепловой машины.

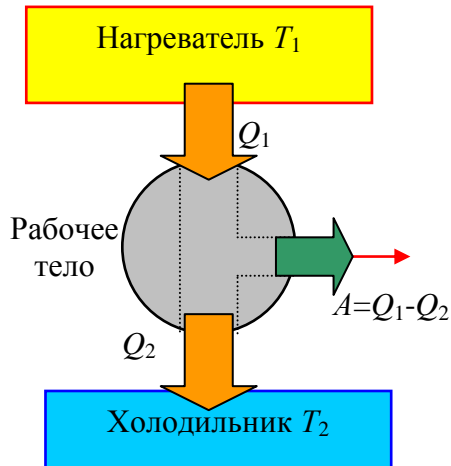


Рис. 5.2.

Итак, рассмотрим принципиальную схему тепловой машины: горячее тело – *нагреватель*, холодное тело – *холодильник*, третье тело – *рабочее тело*. Принципиальная схема тепловой машины изображена на рисунке 5.2. Температура нагревателя больше температуры холодильника $T_1 > T_2$. В рабочем теле за счет процессов, происходящих в нем, часть тепла Q_1 , взятого у нагревателя, превращается в работу A , а остаток Q_2 отдается холодильнику. При этом получаемая работа равна:

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (3.5.7)$$

Примерно в той же схеме можно рассмотреть *холодильную машину*, предназначенную для охлаждения тела (принципиальная схема холодильника). Здесь процессы (см рис. 5.3) идут в обратном порядке: за счет совершения работы A некоторое количество тепла Q_2 отнимается у холодильника и передается нагревателю вместе с работой:

$$Q_1 = Q_2 + A \quad (3.5.8)$$

Основной вопрос при создании тепловой машины: какие процессы лучше выбрать для получения максимальной работы в тепловой машине? Рассмотрим переход тела из одного состояния в другое для обратимого и необратимого процесса. Для обратимого процесса имеем:

$$dQ = TdS = dE + dA_{обр} \quad (3.5.9)$$

Для необратимого процесса имеем:

$$dQ_n = dE + dA_n. \quad (3.5.10)$$

Вычитая из первого уравнения (3.5.9) второе (3.5.10) и учитывая неравенство Р. Клаузиуса $dQ \leq TdS$, получаем следующее:

$$TdS - dQ_n = dA_{обр} - dA_n \geq 0 \quad (3.5.11)$$

Итак, $dA_{обр} \geq dA_n$, максимальная работа получается при обратимом переходе рабочего тела из одного равновесного состояния в другое.

Чтобы в работе тепловой машины природа вспомогательного рабочего тела не была существенна, оно должно выполнять *круговой процесс*, в результате которого тело переходит в начальное состояние. При этом внутренняя энергия не изменяется. Это и есть *цикл*.

Обычно в качестве рабочего тела рассматривают идеальный газ, помещенный в цилиндрический сосуд с поршнем.

3.5.2. Цикл Карно.

Рассмотрим в качестве рабочего тела идеальный газ, помещенный в цилиндрический сосуд с поршнем. Очень важным с точки зрения определения наших возможностей по превращению тепла в механическую работу является *цикл Карно*, состоящий из 2-х адиабат и 2-х изотерм. Этот цикл определяет предел наших возможностей в эффективности получения работы.

Итак, рассмотрим 4 процесса-этапа цикла Карно (рис. 5.4).

1). Изотермическое расширение происходит при контакте с нагревателем при температуре T_1 от объема V_1 до объема V_2 . При этом газ получает энергию от нагревателя dQ_1 и превращает ее в работу dA :

$$dQ_1 = dE_1 = T_1 dS = dA \quad (3.5.12)$$

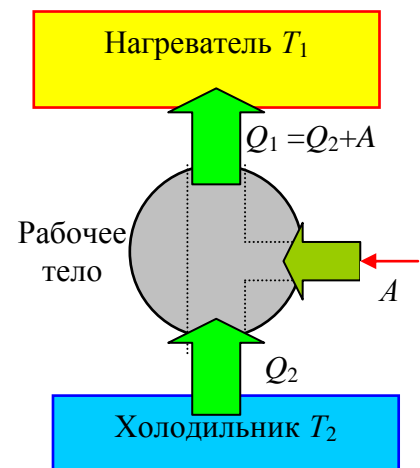


Рис. 5.3.

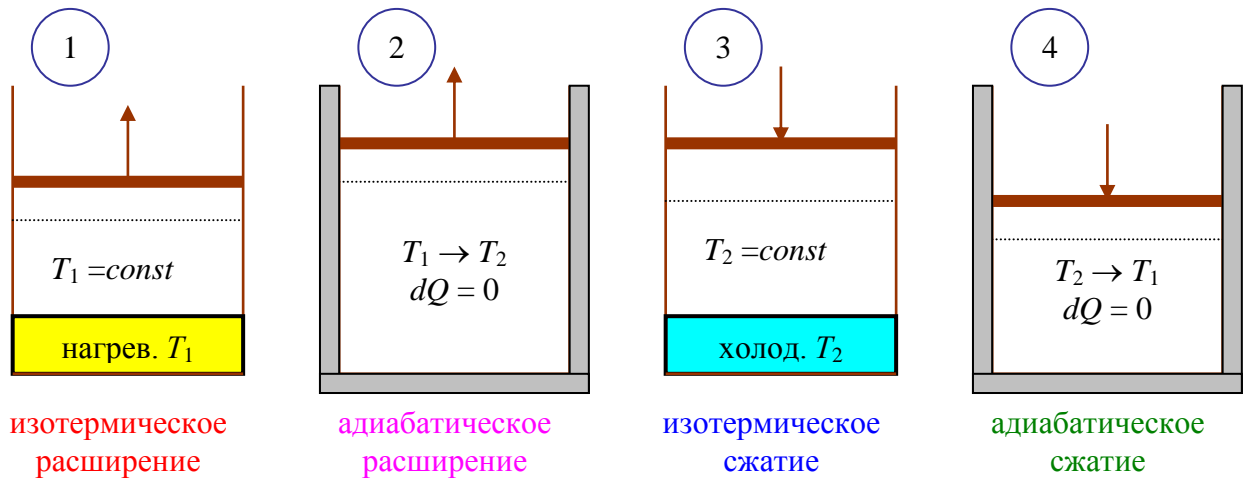


Рис. 5.4.

2). Рабочее тело теплоизолируется (второй фрагмент на рис. 5.4) и происходит его расширение по адиабате ($dQ = 0$) от объема V_2 до объема V_3 . В процессе расширения газ тратит свою внутреннюю энергию на работу по расширению, и его температура падает $T_1 \rightarrow T_2$.

3). На третьем этапе рабочее тело приводится в контакт с холодильником при температуре T_2 . Происходит изотермическое сжатие от объема V_3 до объема V_4 . При этом чтобы газ при этом не нагревался, он отдает часть тепла холодильнику:

$$-dE_2 = -dQ_2 = -T_2 dS \quad (3.5.13)$$

4). На четвертом этапе рабочее тело снова теплоизолируют, происходит адиабатическое сжатие от объема V_4 до начального объема V_1 , при этом газ нагревается до начальной температуры $T_2 \rightarrow T_1$.

Итак, совершается круговой процесс – цикл Карно, при котором изменения внутренней энергии и энтропии равны нулю: $\Delta E = 0$, $\Delta S = 0$ и это позволяет рабочее тело вообще не рассматривать, поскольку за цикл с ним ничего не произошло. Нас интересует полученная работа при данных параметрах нагревателя и холодильника, а также *коэффициент полезного действия* (кпд), который определяется как отношение полученной работы к полученному (затраченному) теплу ΔQ_1 :

$$\eta = \frac{A}{\Delta Q_1} \quad (3.5.14)$$

В координатах p и V цикл Карно изображен на рисунке 5.5, где каждый этап приведен в соответствие с этапами на рис. 5.4. Можно вычислить работу и переданное (отданное) тепло на каждом этапе и затем определить кпд. На изотермическом участке 1-2 рабочее тело получает тепло:

$$\Delta Q_1 = \int_1^2 p dV = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0 \quad (3.5.15)$$

На участке 3-4 рабочее тело отдает тепло

$$\Delta Q_2 = \int_3^4 p dV = \nu R T_2 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0 \quad (3.5.16)$$

На участках 2-3 и 4-1, тепло не принимается и не отдается. Однако на этих участках – адиабатах, – можно почитать связь между объемами:

$$\begin{aligned} T_1 V_2^{\gamma-1} &= T_2 V_3^{\gamma-1} \\ T_2 V_4^{\gamma-1} &= T_1 V_1^{\gamma-1} \end{aligned} \quad (3.5.17)$$

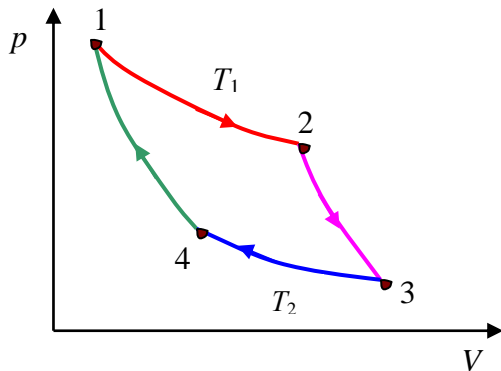


Рис. 5.5.

Из этих соотношений (3.5.17) нетрудно получить соотношение для объемов:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (3.5.18)$$

В итоге, пользуясь (3.5.15)- (3.5.16) и (3.5.18), получаем коэффициент полезного действия – *кпд цикла Карно*:

$$\eta = \frac{A}{\Delta Q_1} = \frac{\Delta Q_1 + \Delta Q_2}{\Delta Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3.5.19)$$

Приведем также другой вывод КПД цикла Карно. Часто для вычисления получаемой работы в цикле Карно удобнее пользоваться изображением цикла в координатах температуры T и энтропии S , где он представляет собой прямоугольник (рис. 5.6).

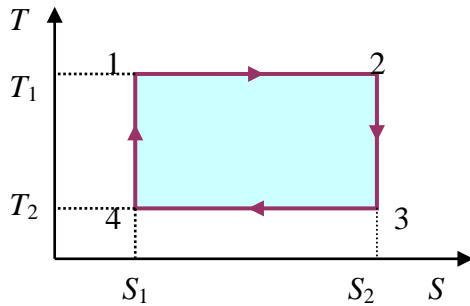


Рис. 5.6.

Итак, по соотношениям (3.5.12) и (3.5.13) полученное тепло от нагревателя (изотермический процесс расширения на участке 1-2 рис.5.5) равно:

$$\Delta E_1 = \Delta Q_1 = T_1 \Delta S_1 = T_1 (S_2 - S_1).$$

Тепло, отданное холодильнику (участок 3-4 на рис. 5.6), соответственно равно:

$$\Delta E_2 = \Delta Q_2 = T_2 \Delta S_2 = T_2 (S_1 - S_2).$$

На участках 2-3 и 4-1 тепло не принимается и не отдается. Так как процессы обратимые, то суммарная энтропия нагревателя и холодильника постоянна:

$$S_1 + S_2 = \text{const} \quad \text{и} \quad \Delta S_1 = -\Delta S_2,$$

что, вообще говоря, видно непосредственно из графика цикла Карно на рис. 5.6. Производимая газом (рабочим телом) работа определяется балансом теплоты:

$$A = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = T_1 \Delta S_1 + T_2 \Delta S_2 = (T_1 - T_2) \frac{\Delta Q_1}{T_1} \quad (3.5.20)$$

Откуда получаем *кпд цикла Карно*:

$$\eta = \frac{A}{\Delta Q_1} = \frac{A}{\Delta E_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3.5.21)$$

Отметим важность цикла Карно. Согласно *теореме Карно* КПД этого цикла – *есть максимально возможный коэффициент полезного действия среди всех круговых циклов с данными нагревателем и холодильником*. Он определяется только их температурами. Циклом Карно часто пользуются в термодинамике для выводов многих соотношений и теорем.

Примечание 1. Никола Леонард Сади Карно, французский физик и инженер, 1796-1832
