

3.5. Тепловые машины.

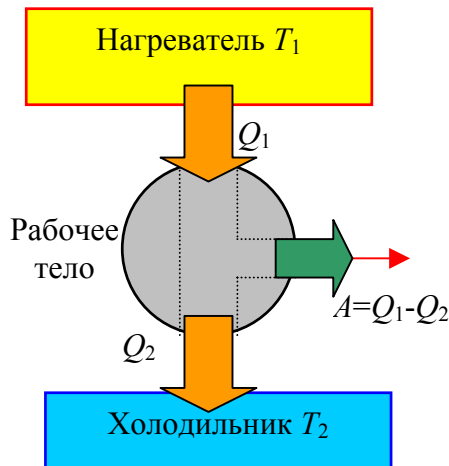
3.5.1. Принципиальная схема тепловой машины.

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.



Итак, рассмотрим принципиальную схему тепловой машины: горячее тело - *нагреватель*, холодное тело - *холодильник*, третье тело - *рабочее тело*.

Принципиальная схема тепловой машины изображена на рисунке слева. Температура нагревателя больше температуры холодильника $T_1 > T_2$. В рабочем теле за счет процессов, происходящих в нем, часть тепла Q_1 превращается в работу A , а остаток Q_2 отдается холодильнику. При этом получаемая работа равна:

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (3.5.1)$$

Примерно в той же схеме можно рассмотреть *холодильную машину*, предназначенную для охлаждения тела (принципиальная схема холодильника). Здесь процессы (см рисунок ниже) идут в обратном порядке: за счет совершения

работы A некоторое количество тепла Q_2 отнимается у холодильника и передается нагревателю вместе с работой:

$$Q_1 = Q_2 + A \quad (3.5.2)$$

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:

$$dQ = TdS = dE + dA_{обр} \quad (3.5.3)$$

Для необратимого процесса имеем:

$$dQ_n = dE + dA_n. \quad (3.5.4)$$

Вычитая из первого уравнения (3.5.3) второе (3.5.4) и учитывая неравенство Р.Клаузиуса $dQ \leq TdS$, получаем следующее:

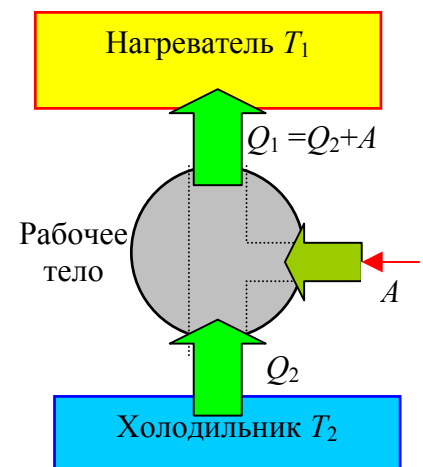
$$TdS - dQ_n = dA_{обр} - dA_n \geq 0 \quad (3.5.5)$$

Т.е. $dA_{обр} \geq dA_n$, 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 (1796-1832).



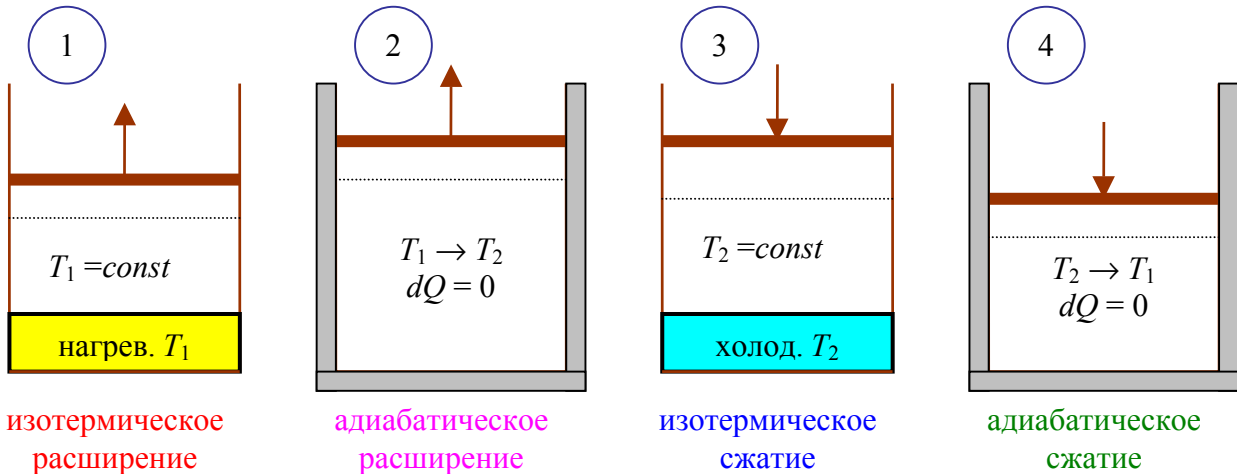
Рассмотрим в качестве рабочего тела идеальный газ, помещенный в цилиндрический сосуд с поршнем. Очень важным с точки зрения определения наших возможностей по превращению тепла в механическую работу является *цикл Карно*, состоящий из 2-х адиабат и 2-х изотерм. Этот цикл определяет предел наших возможностей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

Итак, имеем 4 процесса-этапа.

1). Изотермическое расширение при контакте с нагревателем с температурой 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 :

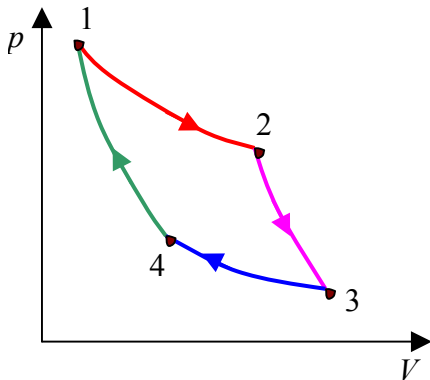
$$dQ_1 = dE_1 = T_1 dS = dA \quad (3.5.6)$$

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



3). На третьем этапе рабочее тело приводится в контакт с холодильником 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:

$$-dE_2 = -dQ_2 = -T_2 dS \quad (3.5.7)$$

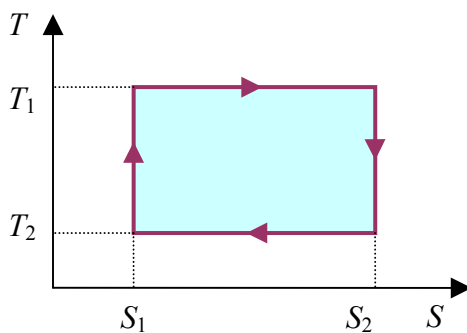


4). Рабочее тело снова теплоизолируют, происходит адиабатическое сжатие от объема V_4 до объема V_1 , при этом газ нагревается до начальной температуры $T_2 \rightarrow T_1$.

Итак, совершается круговой процесс: $\Delta E = 0$, $\Delta S = 0$ и рабочее тело можно вообще не рассматривать. Нас интересует полученная работа при данных нагревателя и холодильника, а также *коэффициент полезного действия* (кпд), который определяется как отношение полученной работы и затраченного тепла:

$$\eta = \frac{A}{\Delta Q_1} \quad (3.5.8)$$

В координатах p и V цикл Карно изображен на рисунке слева. Однако для вычисления получаемой работы удобнее пользоваться изображением цикла в координатах температуры T и энтропии S , где он представляет собой прямоугольник.



Итак, по соотношениям (3.5.6) и (3.5.7) полученное тепло от нагревателя равно: $\Delta E_1 = \Delta Q_1 = T_1 \Delta S_1 = T_1 (S_2 - S_1)$, а тепло, отданное холодильнику, соответственно равно: $\Delta E_2 = \Delta Q_2 = T_2 \Delta S_2 = T_2 (S_1 - S_2)$. Так как процессы обратимые, то суммарная энтропия нагревателя и холодильника постоянна: $S_1 + S_2 = const$ и $\Delta S_1 = -\Delta S_2$, что, вообще говоря, видно непосредственно из графика цикла.

Производимая газом (рабочим телом) работа определяется балансом теплоты:

$$A = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = T_1 \Delta S_1 + T_2 \Delta S_2 = (T_1 - T_2) \frac{\Delta Q_1}{T_1} \quad (3.5.9)$$

Откуда получаем кпд цикла Карно:

$$\eta = \frac{A}{\Delta Q_1} = \frac{A}{\Delta E_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3.5.10)$$

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.