

План лекции:

1. Обратимые и необратимые процессы
2. Основные положения второго закона
3. Цикл Карно

1. ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ

Одним из важнейших понятий термодинамики является понятие об **обратимых и необратимых процессах**.

Термодинамический процесс представляет собой совокупность непрерывно изменяющихся состояний термодинамической системы. Между двумя состояниями 1 и 2 системы можно представить себе два процесса, проходящих по одному и тому же пути: от состояния 1 к состоянию 2 и, наоборот, от состояния 2 к состоянию так называемые прямой и обратный процессы.

Обратимыми называют процессы, в результате совершения которых в прямом и обратном направлениях термодинамическая система возвращается в исходное состояние; таким образом, **совокупность прямого и обратного процессов не вызывает в окружающей среде никаких изменений**.

Можно определить понятие обратимого процесса следующим образом: **обратимый процесс** - это такой процесс, который можно провести в обратном направлении, затрачивая работу, произведенную в прямом процессе.

Необратимыми называют процессы, при проведении которых в прямом и затем в обратном направлении система не возвращается в исходное состояние.

Из повседневной практики известно, что **все естественные самопроизвольные процессы, происходящие в природе, являются необратимыми**; обратимых процессов в природе не существует.

Рассмотрим некоторые примеры необратимых процессов.

Типичным примером необратимого процесса, сопровождающего многие процессы в природе, является **процесс трения**. Работа, затрачиваемая на преодоление трения, необратимо превращается в теплоту, выделяющуюся при трении.

Другим типичным примером необратимого процесса является **падение жидкости с некоторой высоты** (слив воды через плотину ГЭС). Очевидно, что обратный процесс - подъем воды из нижнего резервуара в верхний - сам собой происходить не может.

Процесс **расширения газа в вакуум**, также является типично необратимым процессом: очевидно, что газ, занимавший ранее объем V_1 и занявший после расширения объем V_2 , сам собой, без затраты работы извне, не сожмётся и не соберётся вновь в объеме V_1 освободив объем V_2 .

Необратим **процесс образования любого раствора или смеси**. Например, если смешать спирт с водой, то сами собой компоненты этого раствора не отделятся друг от друга.

Необратимыми потерями сопровождается **течение электрического тока по проводнику** - это Джоулевы потери электроэнергии на преодоление сопротивления проводника, в результате которых электроэнергия переходит в теплоту. Джоулевы потери

подобно потерям на трение в механических процессах не зависят от того, в каком направлении течет ток по проводнику.

Часто встречающимся в повседневной практике необратимым процессом является **процесс перехода теплоты от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой**. Известно, что если обеспечить контакт двух тел, имеющих различные температуры, то теплота будет переходить от более нагретого тела к менее нагретому, причем этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока температуры тел не сравняются (т.е. пока между телами не установится тепловое равновесие). Многовековая практика человечества показывает, что сама собой, без затраты работы извне, теплота не будет переходить от более холодного тела к более горячему.

Важно отметить, что **степень необратимости того или иного необратимого процесса может быть различной**. Например, работа на преодоление сил трения будет затрачиваться и при движении полированного тела по полированной поверхности, и в случае, когда тело движется по грубо обработанной, шероховатой поверхности, но работа, переходящая в теплоту трения, во втором случае будет больше, чем в первом. Следовательно, во втором случае (шероховатая поверхность) процесс будет более "необратим", чем в первом (полированная поверхность).

Каждый из рассмотренных нами необратимых процессов можно осуществить и в обратном направлении, возвратив систему в исходное состояние, но для проведения такого обратного процесса **среда, окружающая систему, должна совершить компенсирующий процесс** (с затратой теплоты или работы). Важно подчеркнуть, что необратимый процесс полностью обратить нельзя - возвращение системы в исходное состояние осуществляется **за счет необратимых изменений в окружающей системе среде**.

Важно отметить также, что любой самопроизвольный процесс, происходящий в системе, продолжается до тех пор, пока в системе не установится **равновесие**.

Вода будет переливаться из одного резервуара в другой до тех пор, пока уровни воды в этих резервуарах не сравняются.

Расширение газа в вакуум будет продолжаться до тех пор, пока давления в обоих сосудах не сравняются и движение газа при этом прекратится.

Процесс растворения спирта в воде будет происходить до тех пор, пока концентрация раствора не выровняется по всему объему, занимаемому раствором.

Процесс перехода теплоты от более нагретого тела к менее нагретому будет происходить до тех пор, пока первое тело не охладится, а второе не нагреется настолько, что их температуры сравняются. При достижении равенства температур процесс теплообмена между телами прекращается.

Как показывает практика, система, достигшая равновесия, в дальнейшем в этом состоянии и пребывает, т.е. является неспособной к дальнейшему самопроизвольному изменению состояния, это соответствует сформулированному ранее утверждению о том, что всякий самопроизвольный процесс необратим.

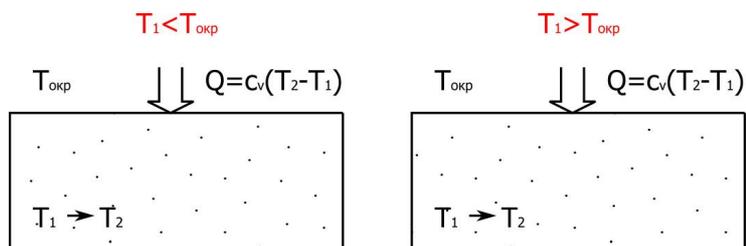
Другими словами, работа может производиться системой только до тех пор, пока система не придет в состояние равновесия. В любом тепловом двигателе **работа может**

быть получена только тогда, когда имеются минимум два источника теплоты - горячий и холодный. Если же температуры горячего и холодного источников сравняются, т.е. система, включающая в себя горячий источник, рабочее тело и холодный источник, придет в тепловое равновесие, то перенос рабочим телом теплоты от горячего источника к холодному прекратится и работа производиться не будет.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВТОРОГО ЗАКОНА

Первый закон термодинамики представляет собой математическое выражение общего закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы.

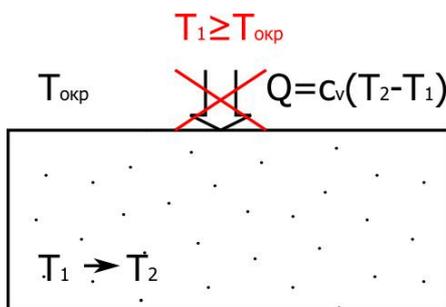
Он определяет любые взаимные превращения энергии (работы) и позволяет рассчитать параметры состояния системы при протекании различных термодинамических процессов. Но этот закон **не накладывает ограничений на направление протекания процессов**. В частности согласно первому закону термодинамики равновозможен процесс переноса тепла от горячего тела к холодному и от холодного тела к горячему.



в ходе термодинамического процесса и в том и в другом случае температура системы увеличивается за счёт энергии взятой из окружающей среды

Опыт показывает, что все процессы идут в направлении установления в любой системе равновесия, т. е. выравнивания в ней давлений, температур, концентраций и др.

Основное положение второго закона термодинамики (постулат) составляет утверждение о **невозможности получения работы за счёт энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии**.



такой термодинамический процесс невозможен

Существует много эквивалентных друг другу словесных формулировок второго закона, например:

«Тепло не может самопроизвольно переходить от менее нагретого тела к более нагретому телу» (Клаузиус).

«Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом действия которой было бы совершение механической работы за счёт охлаждения теплового резервуара» (Планк, Томсон (лорд Кельвин)).

Под периодически действующей машиной следует понимать двигатель, непрерывно (в циклическом процессе) превращающий теплоту в работу. Если бы удалось построить

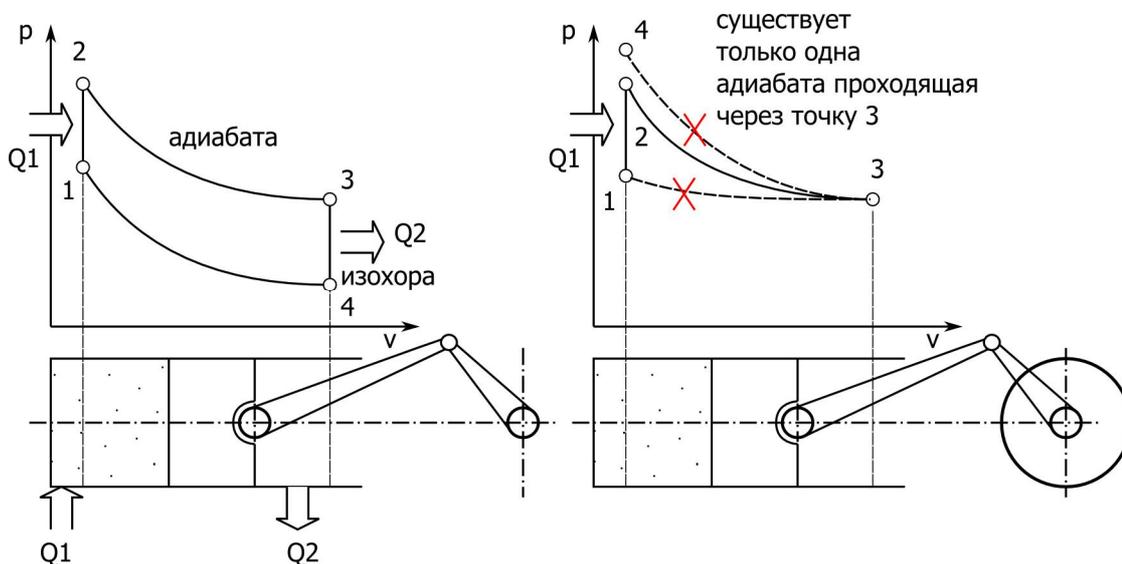
тепловой двигатель, который просто отбирал бы теплоту от некоторого источника и непрерывно превращал его в работу, то это противоречило бы сформулированному ранее положению о том, что работа может производиться системой только тогда, когда в этой системе отсутствует равновесие (когда в системе имеется разность температур горячего и холодного источников).

Если бы второй закон термодинамики был не справедлив, и можно было бы построить тепловой двигатель при наличии одного лишь источника теплоты, то такой двигатель мог бы действовать за счет охлаждения, например, воды в океане. Этот процесс мог бы продолжаться до тех пор, пока вся внутренняя энергия океана не была бы превращена в работу.

Такой гипотетический двигатель называется **вечным двигателем второго рода** (в отличие от вечного двигателя первого рода, работающего вопреки закону сохранения энергии). Отсюда можно получить другую формулировку второго начала термодинамики: **Невозможно построить вечный двигатель второго рода.**

Продemonстрируем эквивалентность формулировок второго закона термодинамики на примере работы теплового двигателя.

Тепловые двигатели работают таким образом, что газ (**рабочее тело**) расширяется в результате получения теплоты Q_1 от источника, имеющего высокую температуру. Для того чтобы вернуться в первоначальное состояние, можно снова сжать рабочее тело, но при этом полезная работа получена не будет. Для получения полезной работы необходимо в процессе расширения понизить давление газа путем отвода от него части теплоты Q_2 к источнику с более низкой температурой.

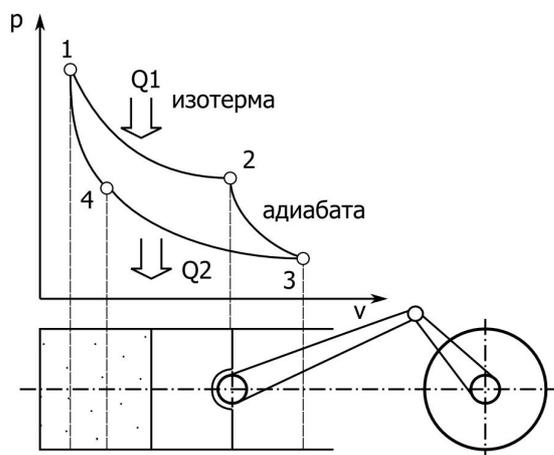


Согласно формулировке Планка нельзя, получив теплоту из некоторого резервуара, превратить её в работу и, не отдавая часть полученной теплоты в резервуар с более низкой температурой, вернуться к исходным параметрам рабочего тела (**не существует адиабатного процесса 3-1**). Из формулировки Клаузиуса следует, что невозможно передать теплоту к высокотемпературному источнику, без каких-либо дополнительных условий (**не существует адиабатного процесса 3-4**).

Для получения полезной работы от двигателя, или переноса теплоты от холодного источника к горячему необходимы компенсирующие процессы: отвод теплоты в холодильник или же затрата работы.

3. ЦИКЛ КАРНО

Цикл, дающий максимальное значение термического КПД (при определенных температурах нагревателя и охладителя), предложенный французским ученым – инженером Сади Карно, носит название цикла Карно. Карно в 1824 году опубликовал работу «Размышление о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу». В этом труде Карно впервые сформулировал положения второго закона термодинамики о возможностях превращения теплоты в работу.



Цикл Карно представлен на рисунке в виде кругового процесса 1-2-3-4-1. Этот цикл состоит из адиабат 2-3 и 4-1 и изотерм 1-2 и 3-4. Физическая картина явлений может быть представлена следующим образом.

В точке 1 находится рабочее тело (газ) с давлением p_1 , удельным объемом v_1 и температурой T_1 , равной температуре нагревателя, заключающего в себе большой запас энергии. Поршень двигателя под влиянием высокого давления начинает двигаться вправо, при этом внутреннее пространство цилиндра сообщено с нагревателем, поддерживающим в расширяющемся газе постоянную температуру T_1 посредством передачи ему соответствующей энергии в виде теплоты. Таким образом, расширение газа идет изотермически по кривой 1-2. В точке 2 цилиндр изолируется от нагревателя, но газ продолжает расширяться, двигая поршень в том же направлении; процесс расширения идет без подвода теплоты, т. е. адиабатно по кривой 2-3. В этом процессе газ в работу расширения превращает часть внутренней энергии и, следовательно, понижает свою температуру до T_2 , равной температуре охладителя. В этот момент поршень достигает своего крайнего правого положения.

Обратное движение поршня происходит под воздействием энергии, накопленной в маховике и передаваемой посредством кривошипно-шатунного механизма; газ сжимается сначала изотермически, для этого внутреннее пространство цилиндра сообщается с охладителем, поддерживающим температуру T_2 , а в точке 4 цилиндр изолируется от охладителя и дальнейшее сжатие идет по адиабате 4-1. Сжатие кончается в точке 1, где газ приходит к своему начальному состоянию.

Цикл закончен и возможно повторение его сколько угодно раз.

Проследим процессы, происходящие с рабочим телом в этом цикле. Рабочее тело обладает свойствами идеального газа.

Процесс 1-2 (Изотермическое расширение)

Газ совершает работу, вся теплота, подводимая к газу, расходуется на совершение этой работы:

$$L_{12} = Q_1 = mRT_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (1)$$

Процесс 2-3 (Адиабатическое расширение)

Газ совершает работу за счёт убыли внутренней энергии, температура понижается:

$$L_{23} = \frac{mR(T_1 - T_2)}{k-1}; Q_{23} = 0 \quad (2)$$

Процесс 3-4 (Изотермическое сжатие)

Над газом совершается работа, в холодильник отводится теплота эквивалентная работе сжатия:

$$L_{34} = Q_2 = -mRT_2 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right) \quad (3)$$

Процесс 4-1 (Адиабатическое сжатие)

Газ сжимается, температура повышается:

$$L_{41} = -\frac{mR(T_1 - T_2)}{k-1}; Q_{41} = 0 \quad (4)$$

Работа цикла определяется суммой работ на всех участках:

$$L_{\text{ц}} = mRT_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + \frac{mR(T_1 - T_2)}{k-1} - mRT_2 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right) - \frac{mR(T_1 - T_2)}{k-1} \quad (5)$$

$$L_{\text{ц}} = mR \left(T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) - T_2 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right) \right) = Q_1 - Q_2$$

Из полученного выражения для работы и формулы (1) следует, что термический КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) - T_2 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right)}{T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)} \quad (6)$$

Из свойств адиабатных участков следует, что:

$$\left. \begin{aligned} T_{r1} V_1^{k-1} = T_{r4} V_4^{k-1} &\Rightarrow T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_4^{k-1} \\ T_{r2} V_2^{k-1} = T_{r3} V_3^{k-1} &\Rightarrow T_1 V_2^{k-1} = T_2 V_3^{k-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right), \quad (7)$$

тогда:

$$\boxed{\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}} \quad (8)$$

Термический КПД цикла Карно зависит только от температуры горячего и холодного источника, при этом КПД тем выше, чем больше разность температур $T_1 - T_2$. $\eta = 1$ в практически недостижимых случаях $T_2 = 0$ или $T_1 = \infty$.