

КУРС ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ЛЕКЦИЯ 7

ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ



Соприкосновении тел или взаимодействие тел через излучение приводит к изменению их внутренней энергии, т.к. при этом происходит передача некоторого количества теплоты. Внутренняя энергия

термодинамической системы может изменяться и вследствие выполнения системой работы против внешних сил. Связь между переданным количеством теплоты, изменением внутренней энергии системы и произведенной работой выражается уравнением

$$\delta Q = dU + \delta A$$

где δQ – элементарное количество теплоты, передаваемой системе; dU – изменение внутренней энергии системы; δA – элементарная работа системы над внешними телами.

Это уравнение представляет собой закон сохранения энергии применительно к механической и тепловой энергии макроскопических тел, называемый **первым законом термодинамики**.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Теплоемкость тела – это величина, равная количеству теплоты, при получении которого температура тела повышается на один К. Теплоемкость тела определяется выражением

$$C = \delta Q / dT.$$

Теплоемкость одного моля вещества называется **молярной теплоемкостью**, а теплоемкость одного килограмма вещества называется **удельной теплоемкостью**. Теплоемкость зависит от того при каких условиях выполняется нагрев. Различают теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме. Используя 1^е начало термодинамики можно получить выражение для молярной теплоемкости идеального газа при постоянном объеме:

$$c_V = (i/2) \cdot R.$$

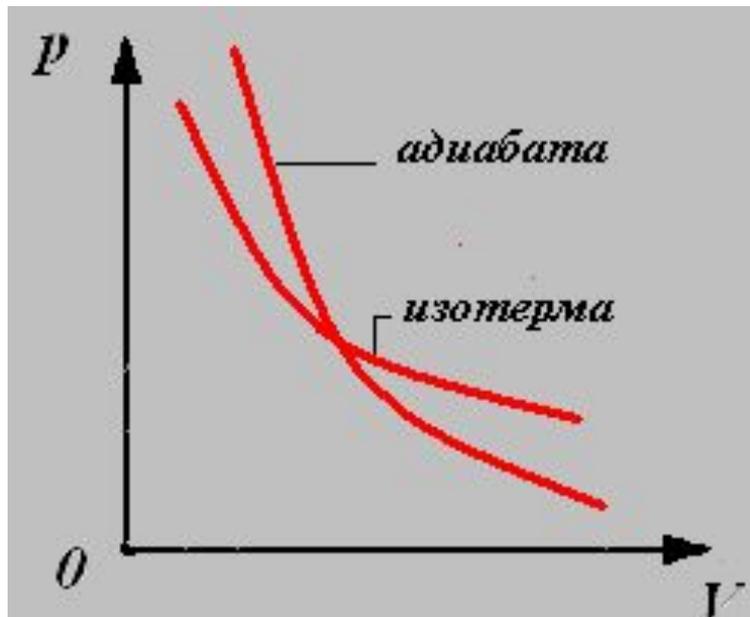
Пользуясь тем же законом получают, что молярные теплоемкости идеального газа при постоянном давлении и объеме связаны **соотношением Майера**

$$c_P = c_V + R.$$

АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Адиабатический процесс – это процесс, при котором отсутствует теплообмен между физической системой и окружающей средой. Из первого начала термодинамики для адиабатического процесса следует, что $Q=0$, т.е. работа совершается за счет убыли внутренней энергии системы. Используя первое начало термодинамики, получают **уравнение адиабатического процесса** (уравнение Пуассона):

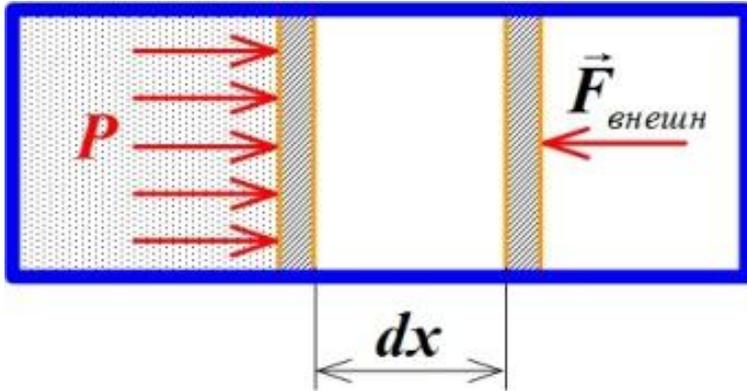
$$dU + pdV = \frac{m}{\mu} \cdot c_V \cdot dT + \frac{m}{\mu} \cdot RT \cdot \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} \cdot c_V T \left(\frac{dT}{T} + \frac{R}{c_V} \cdot \frac{dV}{V} \right) = 0, \quad \text{откуда}$$



$$pV^\gamma = \text{const}; \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}; \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const},$$

$$\text{где } \gamma = \frac{c_P}{c_V}.$$

РАБОТА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ИЗОПРОЦЕССАХ



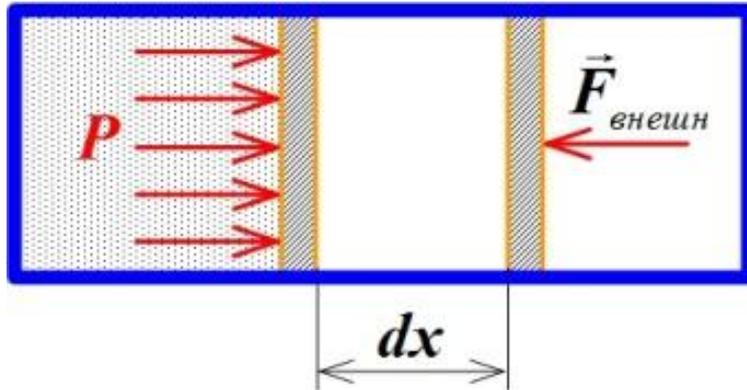
Рассмотрим газ, находящийся в равновесном состоянии в сосуде постоянного сечения площадью S под поршнем. За бесконечно малый промежуток времени при расширении газ сдвинет поршень на расстояние dx . При этом газ совершит элементарную работу, которая определяется выражением

$$\delta A = F \cdot dx = \frac{F}{S} \cdot S \cdot dx = P \cdot dV, \text{ где } dV \text{ – изменение объема газа.}$$

Полная работа A_{12} , совершаемая газом при изменении его объема от V_1 до V_2 :

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} P dV.$$

РАБОТА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ИЗОПРОЦЕССАХ



Работа газа при изопроцессах:

1. *изохорный процесс* ($V=const$) →

$$A_{12} = 0 ;$$

2. *изобарный процесс* ($P=const$) →

$$A_{12} = P \cdot (V_2 - V_1) ;$$

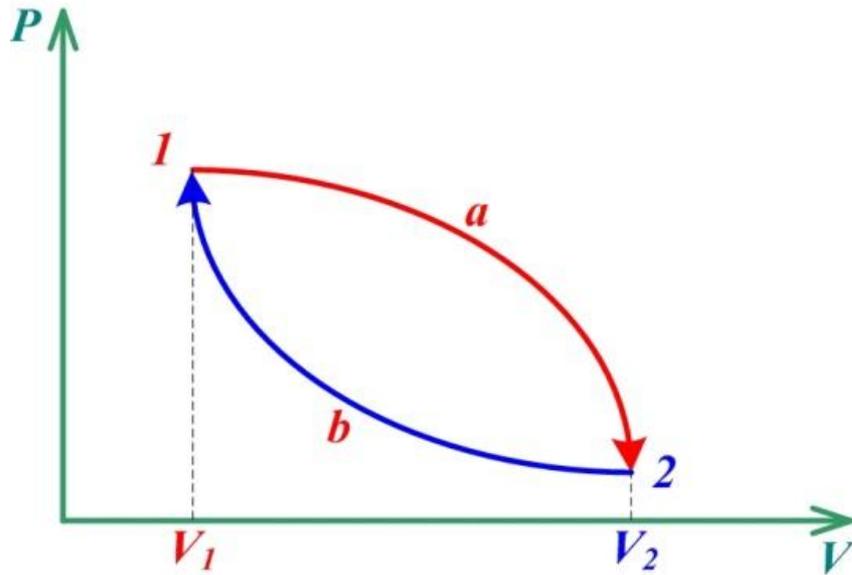
3. *изотермический процесс* ($T=const$) →

$$A_{12} = \frac{m}{\mu} RT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} ;$$

4. *адиабатический процесс* ($Q=0$) →

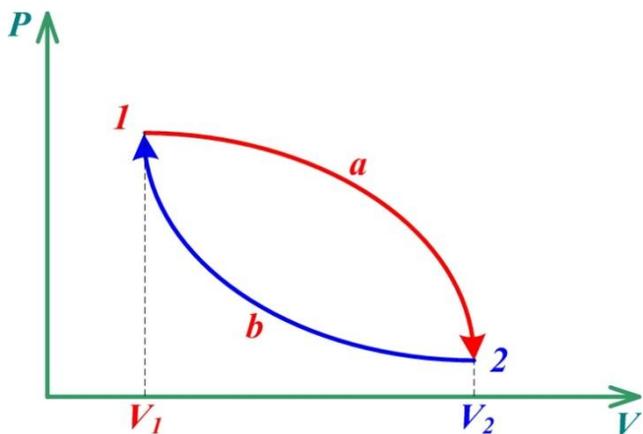
$$A_{12} = \frac{m}{\mu} \cdot c_V \cdot (T_1 - T_2) .$$

ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ



Обратимый процесс (равновесный) — термодинамический процесс, который может проходить как в прямом, так и в обратном направлении, проходя через одинаковые промежуточные состояния. При этом система возвращается в исходное состояние без затрат энергии, а в окружающей среде не остается макроскопических изменений. При необратимом процессе, после возвращения системы в исходное состояние, в окружающих систему телах остаются изменения (изменяются положения тел и их температуры).

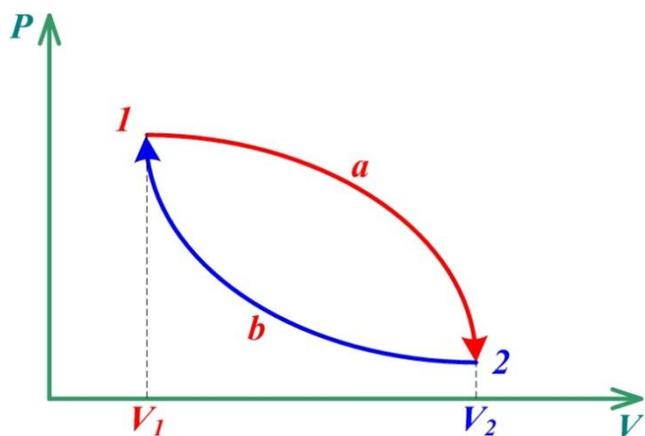
ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ



Тепловая машина – это устройство, использующее тепловую энергию для совершения механической работы. Она состоит из нагревателя, рабочего тела и охладителя рабочего тела. Тепловая машина работает по принципу замкнутого цикла, совершая круговой.

В ходе прямого цикла рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты Q_1 и расширяется от объема V_1 до объема V_2 . Это тепло расходуется на нагревание рабочего тела и на совершение механической работы $Q_1 = U_2 - U_1 + A_{12}$. При обратном цикле над рабочим телом выполняется работа и охладителю передается количество тепла $-Q_2 = U_1 - U_2 + A_{21}$. Сумма уравнений для Q_1 и Q_2 даст работу, совершенную рабочим телом за один цикл $A = Q_1 - Q_2$.

ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ



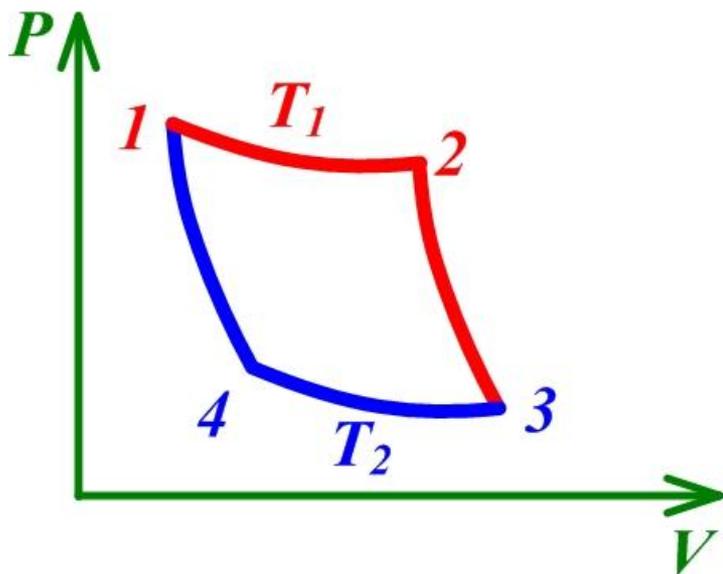
Отношение полезной работы к количеству полученного тепла равно КПД тепловой машины

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

Заметим, что работа A равна площади цикла $1a2b1$. Если работа за цикл $A > 0$, то цикл называется **прямым**, если $A < 0$ – **обратным**.

Прямой цикл используется в тепловом двигателе, совершающем работу за счет получения извне теплоты. Обратный цикл используется в холодильных машинах, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой.

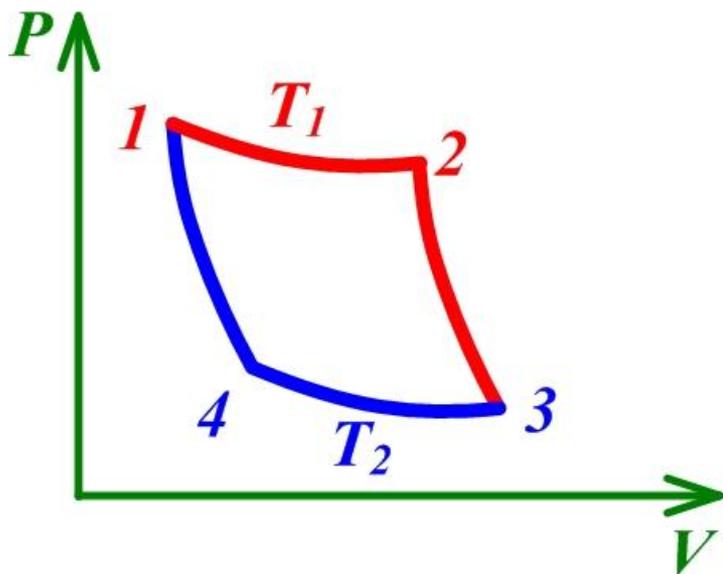
ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ



Максимальный КПД может быть получен, когда рабочий цикл образован обратимыми процессами. Этому требованию соответствует цикл, впервые предложенный Н. Карно в 1824 г. Рабочим телом в цикле был идеальный газ. Цикл состоит из двух изотерм (расширение $1 \rightarrow 2$ и сжатие $3 \rightarrow 4$) и двух адиабат (расширение $2 \rightarrow 3$ и сжатие $4 \rightarrow 1$). Рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты Q_1 , которое в процессе $1 \rightarrow 2$ полностью преобразуется в работу газа A_{12} :

$$A_{12} = \frac{M}{\mu} \cdot RT_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ



В процессе 3→4 над газом выполняется работа A_{34} , которая равна количеству теплоты Q_2 , передаваемому холодильнику:

$$A_{34} = -\frac{M}{\mu} \cdot RT_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}.$$

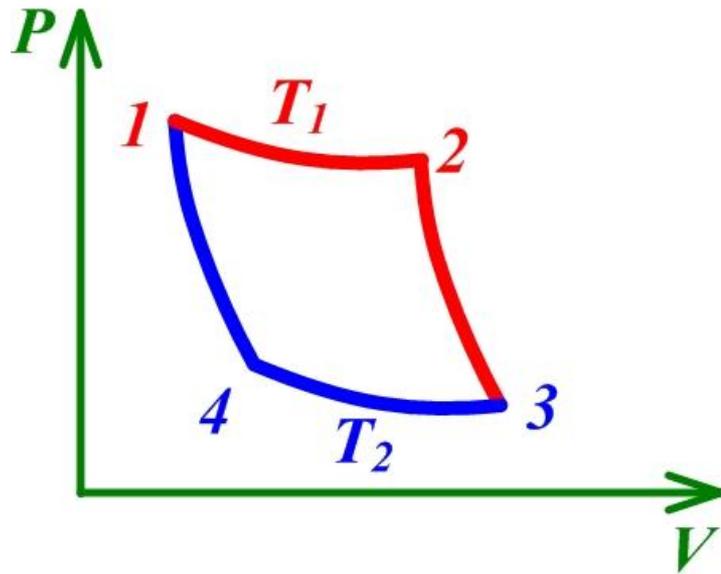
Применяя уравнение Пуассона для адиабатических процессов получим:

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1},$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}.$$

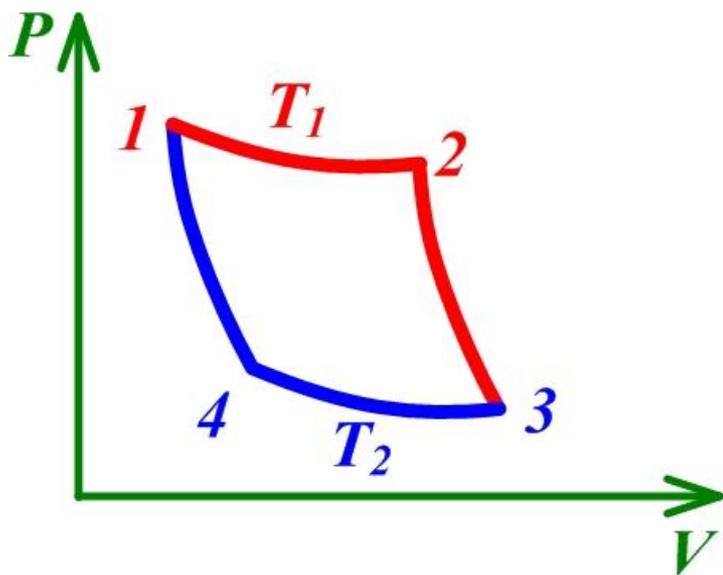
ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Отсюда $V_2/V_1 = V_3/V_4$. Используя полученные результаты получим, что для тепловой машины, работающей по циклу Карно



$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ



1^я теорема Карно

КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, зависит только от температур нагревателя T_1 и холодильника T_2 , но не зависит от устройства машины, а также от вида используемого рабочего вещества.

2^я теорема Карно

КПД всякой тепловой машины не может превосходить КПД идеальной машины, работающей по циклу Карно с теми же самыми температурами нагревателя и холодильника

НЕРАВЕНСТВО КЛАУЗИУСА. ЭНТРОПИЯ. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Р. Клаузиус сформулировал термодинамическое неравенство

Приведенное количество тепла, полученное системой в ходе произвольного кругового процесса, не может быть больше нуля

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int \frac{\delta Q_1}{T_1} + \int \frac{\delta Q'_2}{T_2} \leq 0,$$

где Q – количество тепла, полученное системой при температуре T ; Q_1 - количество тепла, получаемое системой от областей среды с температурой T_1 , Q_2 – количество тепла, отдаваемое системой областям среды при температуре T_2 .

НЕРАВЕНСТВО КЛАУЗИУСА. ЭНТРОПИЯ. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Приведенное количество тепла, полученное системой в ходе обратимого процесса, не зависит от вида процесса, а определяется только начальным и конечным состояниями системы. Значит приведенное количество тепла, полученное системой в ходе обратимого процесса, является мерой изменения некоторой функции состояния системы определенной с точностью до произвольной постоянной и называется **энтропия (S)**. Приращение энтропии равно приведенному количеству тепла, которое нужно сообщить системе, чтобы перевести ее из начального состояния в конечное по любому обратимому процессу:

$$S_2 - S_1 = \Delta S_{12} = \left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{обр}}, \quad dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{обр}}.$$

Отсюда приращение энтропии идеального газа при переходе из состояния с параметрами T_1, V_1 в состояние с параметрами T_2, V_2 :

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + PdV}{T} = \frac{M}{\mu} \cdot \frac{R}{\gamma - 1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{M}{\mu} \cdot R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

НЕРАВЕНСТВО КЛАУЗИУСА. ЭНТРОПИЯ. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Понимание сути энтропии привело к формулировке 2^{го} начала термодинамики:

В изолированной системе возможны лишь те процессы, при которых энтропия системы возрастает, т.е. система переходит от менее вероятных состояний к более вероятным.

1^е и 2^е начала термодинамики объединяются **основным уравнением термодинамики:**

$$T dS \geq dU + pdV$$

Больцман установил, что энтропия связана с термодинамической вероятностью ω (ω – это количество способов, которыми может быть реализовано состояние физической системы) соотношением

$$S = k \cdot \ln \omega .$$

НЕРАВЕНСТВО КЛАУЗИУСА. ЭНТРОПИЯ. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

В 1906 г. В. Нернст сформулировал *теорему Нернста*:

При понижении температуры до 0 К энтропия каждого химически однородного вещества также стремится к 0.