

Билет №12

Необратимость процессов в природе. Тепловые машины, принцип их действия. Цикл Карно. КПД тепловой машины. КПД идеальной машины. Второе начало термодинамики.

Необратимость процессов в природе

Согласно первому закону термодинамики энергия (  $Q = \Delta U + A$  ) не может быть создана или уничтожена, она может только передаваться от одной системы к другой. Но этот закон не устанавливает направления происходящих процессов.

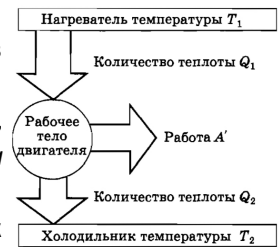
**Необратимые процесс** — процесс, который может протекать только в одном направлении. То есть обратный процесс не может самопроизвольно протекать (без внешнего воздействия). Например, передача теплоты от горячего тела к холодному происходит, а самопроизвольное нагревание горячего тела и охлаждение холодного не происходит; падение стекла и разбиение — тоже необратимый процесс.

**Обратимый процесс** — процесс перехода системы из одного равновесного состояния в другое, который можно провести в обратном направлении через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний. Например, механическое движение без трения, изотермические сжатие\расширение.

Тепловые машины

**Тепловой двигатель** — устройство, в котором происходит преобразование внутренней энергии в механическую.

Тепловой двигатель состоит из *нагревателя* (устройство, передающее теплоту рабочему телу, т. е. газу), *рабочего тела* (газ, расширение которого влечет совершение работы) и *холодильника* (тело, поглощающее неиспользованную рабочим телом теплоту, обычно — внешняя среда, атмосфера). Температура холодильника должна быть меньше температуры рабочего тела, так как иначе он не будет поглощать теплоту.



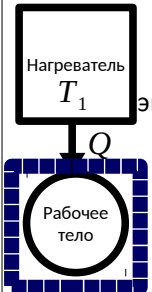
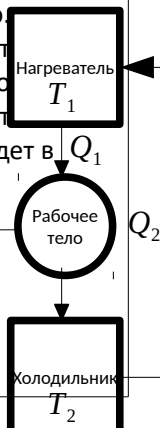
| Тепловые машины                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Прямого цикла                  | Обратного цикла |
|                                |                 |
| Двигатели                      |                 |
| Поршневой внутреннего сгорания |                 |
| Карбюраторный                  |                 |
| Дизельный                      |                 |
| Паровая турбина                |                 |
| Газовая турбина                |                 |
| Турбореактивный двигатель      |                 |
| Реактивный двигатель           |                 |

**Коэффициент полезного действия** (КПД,  $\eta$  ) — скалярная физическая величина, численно равная отношению работы, совершенной рабочим телом, к количеству теплоты полученному от нагревателя. КПД часто выражается в процентах.

$$\eta = \frac{A_{газа}}{Q_{нагр}} = \frac{Q_{нагр} - |Q_{хол}|}{Q_{нагр}} = 1 - \frac{|Q_{хол}|}{Q_{нагр}}$$

Второй закон (второе начало) термодинамики

|              | Р. Клаузиус  | У. Кельвин   |
|--------------|--|--|
| Формулировка | <p>Невозможно такое устройство, единственным конечным результатом которого была бы передача тепла от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой.</p> <p><math>T_1 &gt; T_2</math></p> | <p>Невозможно такое устройство, работающее циклами, единственным результатом которого было бы полное превращение энергии от источника в механическую работу.</p> |

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Равновесность</b></p>  <p>Пусть утверждение Клаузиуса верно, а утверждение Кельвина — нет. Поместим рабочее тело в адиабатическую рубашку, чтобы энергия от нагревателя шла лишь на совершение работы и не отдавалась холодильнику. Тогда температура внутри рубашки увеличивается, и, когда она станет больше <math>T_1</math>, более холодное тело будет нагревать более горячее.</p> | <p>Пусть утверждение Клаузиуса неверно, а утверждение Кельвина — верно.</p>  <p>Рассмотрим устройство, передающее теплоту от холодильника к нагревателю, рабочее тело получает теплоту от нагревателя и совершает работу, неиспользованная теплота идет в холодильник. Работает циклами. <math>A = Q_1 - Q_2</math> — единственный результат, противоречащий утверждению Кельвина.</p> |
|--|--|

## Цикл Карно

Рассмотрим цикл из обратимых процессов: двух изотерм и двух адиабат. (12, 34 — изотермы, 23, 41 — адиабаты)

Для изотерм первый закон термодинамики

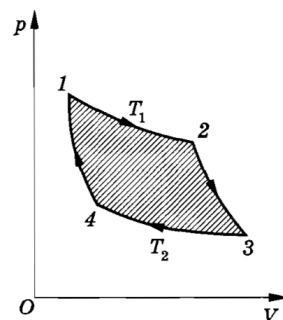
$$Q_{12} = A_{12} + \Delta U = A_{12} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad . \quad \eta = 1 - \frac{|Q_{34}|}{Q_{12}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\ln \frac{V_4}{V_3}}{\ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\ln \frac{V_3}{V_4}}{\ln \frac{V_2}{V_1}}$$

$$Q_{34} = A_{34} + \Delta U = A_{34} = \nu R T_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

Для адиабат уравнение Пуассона

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1} \Rightarrow \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \Rightarrow \ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{V_3}{V_4}$$

Подставляем в формулу КПД:  $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_{хол}}{T_{нагр}}$



**Теорема Карно** — любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем температуры  $T_1$  и холодильником температуры  $T_2$  не может иметь коэффициент полезного действия, превышающий КПД идеальной машины.

Доказательство:

Пусть  $\eta' > \eta$  — КПД другой тепловой машины. Рассмотрим устройство, в котором работают эта машина и машина Карно (по обратному циклу в качестве холодильной машины) с общим нагревателем и холодильником.

Тепловая машина совершает работу  $A' = \eta' Q_1'$ .  $A' = Q_1' - |Q_2'| = \eta' Q_1'$

$$Q_1' - \eta' Q_1' = |Q_2'| \Rightarrow Q_1' (1 - \eta') = |Q_2'| \Rightarrow \eta' Q_1' = \frac{|Q_2'|}{1 - \eta'}. \text{ Тогда } A = \frac{\eta'}{1 - \eta'} |Q_2'|$$

Пусть холодильная машина забирает  $Q_2 = |Q_2'|$ . Тогда над ней совершается работа  $A = \frac{\eta}{1 - \eta} |Q_2'|$ .

Так как  $\eta' > \eta$ ,  $A' > A$ . То есть при действии такого циклического устройства остается избыточная работа, что противоречит второму закону ТД.

