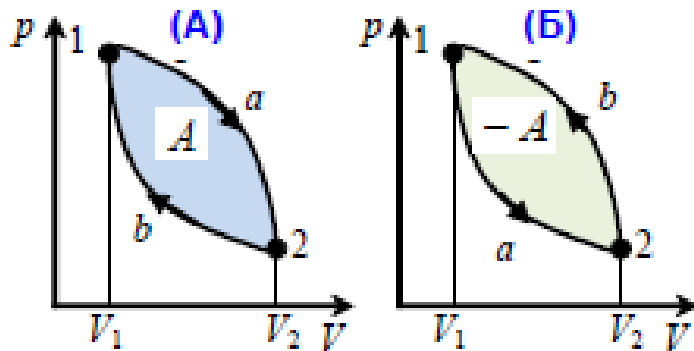


## КРУГОВОЙ ПРОЦЕСС (ЦИКЛ) (1)



**Круговым процессом** (или **циклом**) называется процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние.

На  $(p, V)$ -диаграмме цикл изображается замкнутой кривой, где участок 1–2 соответствует расширению, а 2–1 – сжатию газа.

**Работа расширения**  $A_1$  (площадь фигуры 1a2V<sub>2</sub>V<sub>1</sub>1) положительна:  $A_1 > 0$ .

**Работа сжатия**  $A_2$  (площадь фигуры 2b1V<sub>1</sub>V<sub>2</sub>2) отрицательна:  $A_2 < 0$ .

**Работа за цикл**  $A$  определяется площадью, охватываемой замкнутой кривой:

$$A = A_1 + A_2$$

Таким образом, **работа** – это **функция** не только состояния термодинамической системы, но и вида процесса, который происходит. Поэтому **работа не является однозначной функцией состояния** (такой, как внутренняя энергия). Из первого начала термодинамики следует, что **теплота**  $Q$ , так же как и работа  $A$ , является функцией процесса, который происходит с системой.

## КРУГОВОЙ ПРОЦЕСС (ЦИКЛ) (2)

Цикл называется **прямым**, если за цикл совершается положительная работа  $A = \oint p dV > 0$  (цикл протекает по часовой стрелке – рисунок (А)).

Цикл называется **обратным**, если за цикл совершается отрицательная работа  $A = \oint p dV < 0$  (цикл протекает против часовой стрелки – рисунок (Б)).

Прямой цикл используется в **тепловых двигателях** (совершают работу за счёт полученной извне теплоты). Обратный цикл используется в **холодильных машинах** (за счёт работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой).

### 39. КПД кругового процесса

В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние, следовательно, полное изменение внутренней энергии равно нулю. Поэтому  $Q = \Delta U + A = A$ , т. е. работа, совершаемая за цикл, равна количеству полученной извне теплоты. Если в ходе кругового процесса система не только получает количество теплоты  $Q_1$ , но и теряет (отдаёт) количество теплоты  $Q_2$ , то  $Q = Q_1 - Q_2$ .

**Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса** – это величина, равная отношению работы, совершенной системой, к количеству теплоты, полученному в этом цикле системой:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

## ОБРАТИМЫЙ И НЕОБРАТИМЫЙ ПРОЦЕССЫ. ЭНТРОПИЯ.

Термодинамический процесс называется *обратимым*, если он может происходить как в *прямом*, так и в *обратном* направлении. Причём, если такой процесс происходит сначала в *прямом*, а затем в *обратном* направлении и система возвращается в исходное состояние, то в окружающей среде и в этой системе не происходит никаких изменений. Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, является *необратимым*.

Реальные процессы необратимы, в них всегда происходит диссипация (потеря) энергии (из-за трения, теплопроводности и т. д.). *Обратимые процессы* – это физическая модель – это идеализация реальных процессов.

Количество тепла  $\delta Q$ , которое должно быть доставлено системе или отнято у неё при переходе от одного состояния в другое, не определяется однозначно начальным и конечным состояниями, но существенно зависит от способа осуществления этого перехода ( $\delta Q$  не является функцией состояния системы).

Однако *приведённое количество теплоты* – отношение теплоты  $\delta Q$  к температуре  $T$  системы при бесконечно малых изменениях состояния системы – есть функция состояния системы. В любом обратимом круговом процессе

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0.$$

## ОБРАТИМЫЙ И НЕОБРАТИМЫЙ ПРОЦЕССЫ. ЭНТРОПИЯ

Следовательно, подынтегральное выражение есть полный дифференциал некоторой функции, которая определяется только начальным и конечным состояниями системы и не зависит от пути, каким система пришла в это состояние.

Энтропией  $S$  называется функция состояния системы, дифференциалом которой является  $\delta Q/T$ :

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

Т. о. первое начало термодинамики  $\delta Q = dU + \delta A$  можно записать в виде

$$T dS = dU + \delta A,$$

откуда  $\delta A = T dS - dU = d(TS) - S dT - dU = -d(U - TS) - S dT = -dF - S dT$ .

Функция  $F = U - TS$  является функцией состояния системы и называется *энергией Гельмгольца* или *свободной энергией*.

## ИЗМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ (1)

В замкнутой системе для обратимых процессов  $\Delta S = 0$ ; для необратимых циклов  $\Delta S > 0$ .

**Неравенство Клаузиуса:** энтропия замкнутой системы может либо *возрастать* (в случае необратимых процессов) либо *оставаться постоянной* (в случае обратимых процессов).  $\Delta S \geq 0$

Поскольку  $dS$  и  $\delta Q$  имеют один и тот же знак, то по характеру изменения энтропии можно судить о направлении процесса теплообмена. При нагревании тела  $\delta Q > 0$  и его энтропия возрастает  $dS > 0$ , при охлаждении  $\delta Q < 0$  и энтропия тела убывает  $dS < 0$ .

**Изоэнтропийным** называется процесс, протекающий при *постоянной энтропии* ( $S = \text{const}$ ).

В обратимом адиабатическом процессе  $\delta Q = T dS = 0$ , так что  $dS = 0$  и  $S = \text{const}$ , поэтому *адиабатический процесс является изоэнтропийным*.

Рассмотрим для примера идеальный газ, который совершает равновесный переход из состояния 1 в состояние 2. Изменение его энтропии

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + \delta A}{T}.$$

## ИЗМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ (2)

Используя  $dU = \frac{m}{\mu} C_V dT$ ;  $\delta A = p dV = \frac{m}{\mu} RT \frac{dV}{V}$ ;  $R = C_p - C_V$  и  $\frac{T_2 V_1}{T_1 V_2} = \frac{p_2}{p_1}$ ,

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = \frac{m}{\mu} C_V \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + \frac{m}{\mu} R \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} \left( C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right) = \frac{m}{\mu} \left( C_V \ln \frac{p_2}{p_1} + C_p \ln \frac{V_2}{V_1} \right)$$

*Изменение энтропии в процессах идеального газа*

| Изохорный<br>( $V = \text{const}$ )                | Изобарический<br>( $p = \text{const}$ )            | Изотермический<br>( $T = \text{const}$ )         | Адиабатический<br>( $S = \text{const}$ ) |
|--|--|--|--|
| $\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}$ | $\Delta S = \frac{m}{\mu} C_p \ln \frac{V_2}{V_1}$ | $\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}$ | $\Delta S = 0$                           |

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ТОЛКОВАНИЕ ЭНТРОПИИ. ПРИНЦИП ВОЗРАСТАНИЯ ЭНТРОПИИ.

*Термодинамическая вероятность  $W$  состояния тела или системы – это число способов, которыми может быть реализовано данное конкретное термодинамическое состояние (макросостояние). Иначе говоря, это число всевозможных микрораспределений частиц по координатам и скоростям (микросостояний), которыми может быть осуществлено данное макросостояние.*

**Формула Больцмана**

$$S = k \ln W,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Энтропия системы определяется логарифмом числа микросостояний, с помощью которых может быть реализовано данное макросостояние.

*Энтропия является мерой неупорядоченности системы, – чем больше число микросостояний, реализующих данное макросостояние, тем больше энтропия.*

### 44. Принцип возрастания энтропии

*Все процессы в замкнутой системе ведут к увеличению её энтропии. В замкнутой системе идут в направлении от менее вероятных состояний к более вероятным, до тех пор, пока вероятность состояния не станет максимальной. В состоянии равновесия – наиболее вероятного состояния системы – число микросостояний максимально, при этом максимальна и энтропия.*

## ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Любой необратимый процесс в замкнутой системе происходит так, что энтропия системы при этом возрастает (закон возрастания энтропии).

*Первое начало* термодинамики выражает закон сохранения и превращения энергии применительно к термодинамическим процессам.

*Второе начало* термодинамики определяет *направление* протекания термодинамических процессов, указывая, какие процессы в природе возможны, а какие – нет.

Существуют ещё две формулировки второго начала термодинамики, эквивалентных закону возрастания энтропии:

- 1) *по Кельвину*: невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;
- 2) *по Клаузиусу*: невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к телу более нагретому.



## ТРЕТЬЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

*Третье начало термодинамики – теорема Нернста–Планка* – постулирует поведение термодинамических систем при нуле Кельвина (абсолютном нуле): энтропия всех тел в состоянии равновесия стремится к нулю по мере приближения температуры к нулю Кельвина.

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

Теплоёмкости  $C_V$  и  $C_p$  при  $T = 0 \text{ K}$  равны нулю, поскольку

$$dS = \frac{\delta Q}{T}; C = \frac{dQ}{dT}; S(p = \text{const}, T) = \int_0^T \frac{C_p(T) dT}{T}; S(V = \text{const}, T) = \int_0^T \frac{C_V(T) dT}{T}.$$

## ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ (1)

**Тепловой двигатель** – это периодически действующий двигатель, совершающий работу за счёт полученной извне теплоты.

**Термостатом** называется термодинамическая система, которая может обмениваться теплотой с телами практически без изменения собственной температуры.

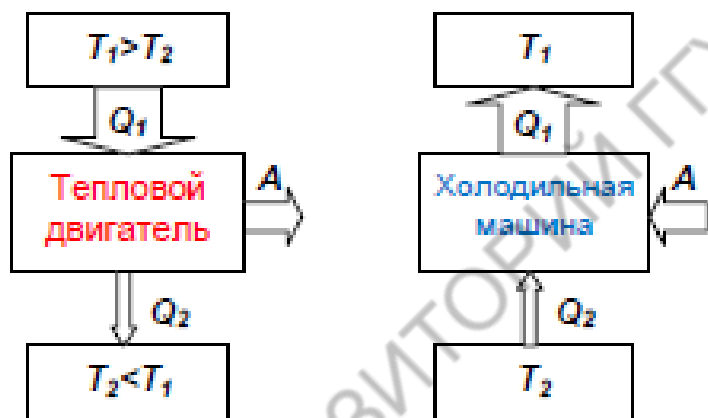
**Рабочее тело** – это тело, совершающее круговой процесс и обменивающееся энергией с другими телами.

*Принцип работы теплового двигателя:* от термостата с более высокой температурой  $T_1$ , называемого **нагревателем**, за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а термостату с более

низкой температурой  $T_2$ , называемому **холодильником**, за цикл передаётся количество теплоты  $Q_2$ , при этом совершается работа  $A = Q_1 - Q_2$ .

**Термический КПД двигателя:**

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$



## ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ (2)

Чтобы КПД был равен 1, необходимо, чтобы  $Q_2 = 0$ , а это запрещено вторым началом термодинамики.

Процесс, обратный происходящему в тепловом двигателе, *используется в холодильной машине*: от термостата с более низкой температурой  $T_2$  за цикл отнимается количество теплоты  $Q_2$  и отдаётся термостату с более высокой температурой  $T_1 > T_2$ . При этом  $Q = Q_1 - Q_2 = A$  или  $Q_1 = Q_2 + A$ .

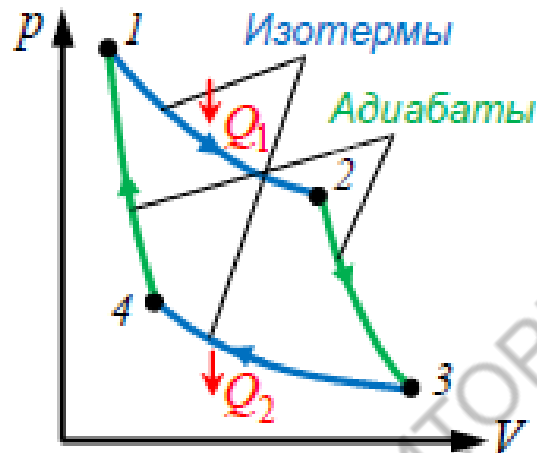
*Количество теплоты  $Q_1$ , отданное системой термостату  $T_1$ , больше количества теплоты  $Q_2$ , полученного от термостата  $T_2$  на величину работы, совершенной над системой.*

*Эффективность* холодильной машины характеризует *холодильный коэффициент*  $\eta'$  – отношение отнятой от термостата с более низкой температурой количества теплоты  $Q_2$  к работе  $A$ , которая затрачивается на приведение холодильной машины в действие:

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

## ТЕОРЕМА КАРНО (ЦИКЛ КАРНО) (1)

Из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей  $T_1$  и холодильников  $T_2$ , наибольшим КПД обладают обратимые машины. При этом КПД обратимых машин, работающих при одинаковых температурах нагревателей и холодильников, равны друг другу и не зависят от природы рабочего тела, а определяются только температурами нагревателя и холодильника.



**Наиболее экономичный обратимый круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат.**

Рассмотрим **прямой цикл Карно**, в котором в качестве рабочего тела используется идеальный газ, заключённый в сосуд с подвижным поршнем.

**Последовательные термодинамические процессы в цикле Карно**

**1-изотерма-2-адиабата-3-изотерма-4-адиабата-1:**

## ТЕОРЕМА КАРНО (ЦИКЛ КАРНО) (2)

|  |  |
|--|--|
| Изотермическое расширение 1→2<br>$T = \text{const}; V_2 > V_1$ | $A_{12} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1$  |
| Адиабатическое расширение 2→3<br>$\delta Q = 0; T_2 < T_1$     | $A_{23} = -\frac{m}{\mu} C_V (T_2 - T_1)$                |
| Изотермическое сжатие 3→4<br>$T = \text{const}; V_4 < V_3$     | $A_{34} = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2$ |
| Адиабатическое сжатие 4→1<br>$\delta Q = 0; T_1 > T_2$         | $A_{41} = -\frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2) = -A_{23}$      |

Работа, совершаемая в результате кругового процесса

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + A_{23} - Q_2 + A_{23} = Q_1 - Q_2.$$

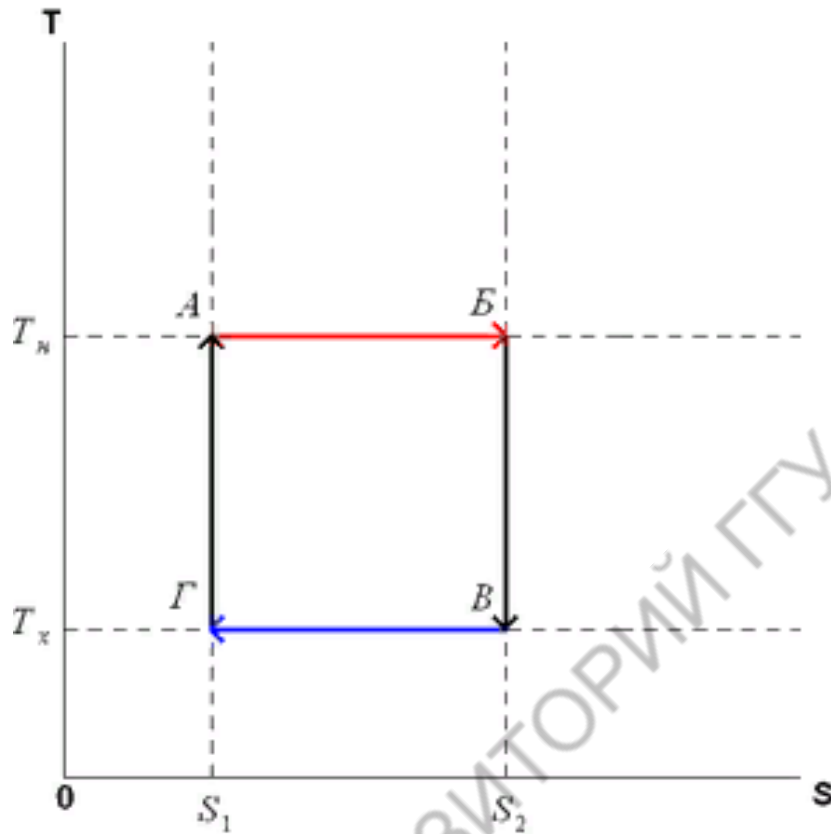
Для адиабат 2–3 и 4–1 уравнения Пуассона  $T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$ ,  $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$ ,  
откуда  $V_1/V_2 = V_3/V_4$ .

Используя это, **термический КПД цикла Карно**

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

действительно определяется только температурами нагревателя и холодильника.

## ЦИКЛ КАРНО В КООРДИНАТАХ $T$ — $S$ (1)



Пусть тепловая машина состоит из нагревателя с температурой  $T_H$ , холодильника с температурой  $T_C$  и рабочего тела.

Цикл Карно состоит из четырёх обратимых стадий, две из которых осуществляются при постоянной температуре (изотермически), а две — при постоянной энтропии (адиабатически). Поэтому цикл Карно удобно представить в координатах  $T$  (температура) и  $S$  (энтропия).

## ЦИКЛ КАРНО В КООРДИНАТАХ $T-S$ (2)

1. **Изотермическое расширение** (на рис. 1 — процесс  $A \rightarrow B$ ) В начале процесса рабочее тело имеет температуру  $T_H$ , то есть температуру нагревателя. Затем тело приводится в контакт с нагревателем, который изотермически (при постоянной температуре) передаёт ему количество теплоты  $Q_H$ . При этом объём рабочего тела увеличивается, оно совершает механическую работу, а его энтропия возрастает.  $\Delta S = (S_2 - S_1) \geq 0$

2. **Адиабатическое расширение** (на рис. 1 — процесс  $B \rightarrow B'$ ) Рабочее тело отсоединяется от нагревателя и продолжает расширяться без теплообмена с окружающей средой. При этом температура тела уменьшается до температуры холодильника  $T_X$ , тело совершает механическую работу, а энтропия остаётся постоянной.  $\Delta S = 0$

3. **Изотермическое сжатие** (на рис. 1 — процесс  $B' \rightarrow A'$ ) Рабочее тело, имеющее температуру  $T_X$ , приводится в контакт с холодильником и начинает изотермически сжиматься под действием внешней силы, отдавая холодильнику количество теплоты  $Q_X$ . Над телом совершается работа, его энтропия уменьшается.  $\Delta S = (S_1 - S_2) \leq 0$

4. **Адиабатическое сжатие** (на рис. 1 — процесс  $A' \rightarrow A$ ) Рабочее тело отсоединяется от холодильника и сжимается под действием внешней силы без теплообмена с окружающей средой. При этом его температура увеличивается до температуры нагревателя, над телом совершается работа, его энтропия остаётся постоянной.  $\Delta S = 0$

## ОБРАТНЫЙ ЦИКЛ КАРНО ПРИ РАБОТЕ ХОЛОДИЛЬНИКА

Основная идея домашнего холодильника проста: он использует испарение хладагента для поглощения тепла от охлаждаемого пространства в холодильнике.

Есть четыре основные части в любом холодильнике: Компрессор. Трубчатый радиатор вне холодильника. Расширительный клапан. Теплообменные трубы внутри холодильника.

Обратный цикл Карно при работе холодильника выполняется в следующем порядке:

**АДИАБАТИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ.** Компрессор сжимает пары хладагента, повышая их температуру и давление.  $\Delta S = 0$

**ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ.** Высокотемпературный и сжатый компрессором пар хладагента рассеивает тепло в окружающую среду (высокотемпературный резервуар) при протекании через радиатор вне холодильника. Пары хладагента конденсируются (сжимаются) в жидкую фазу.

$$\Delta S = (S_1 - S_2) \leq 0$$

**АДИАБАТИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ.** Жидкий хладагент протекает через расширительный клапан, чтобы уменьшить его давление.  $\Delta S = 0$

**ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ.** Холодный жидкий хладагент испаряется, когда он проходит через теплообменные трубы внутри холодильника. В процессе испарения его внутренняя энергия растет, и этот рост обеспечивается отбором тепла от внутреннего пространства холодильника (низкотемпературный резервуар), в результате чего оно охлаждается. Затем газ поступает в компрессор для сжатия снова. Обратный цикл Карно повторяется.  $\Delta S = (S_2 - S_1) \geq 0$