

# Термодинамик а.

Выполнили:  
Любимова Маргарита  
и  
Исаенко Анна.

# Содержание:

- **Определение.**
- **Внутренняя энергия.**
- **Теплоемкость.**
- **Первый закон термодинамики.**
- **Работа в термодинамике.**
- **Количество теплоты.**
- **Уравнение теплового баланса.**
- **Второй и третий законы термодинамики.**
- **Круговой процесс. Обратимые и необратимые процессы.**
- **Тепловые двигатели и холодильные машины.**
- **Задачи.**

# **Определение:**

**Термодинамика** – это раздел физики, в котором изучаются общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.



# Внутренняя энергия.

Внутренняя энергия - это энергия движения и взаимодействия частиц, из которых состоит тело.

$$U = K_{\text{всех частиц}} + P_{\text{всех частиц}}.$$

**Идеальный газ** – идеализированная модель, согласно которой считают, что:

1. Собственный объём молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объёмом сосуда.
2. Между молекулами отсутствуют силы взаимодействия.
3. Столкновения молекул газа между собой и стенками сосуда абсолютно упругие.

Для идеального газа:

$$P_{\text{всех частиц}} = 0 \longrightarrow U = K_{\text{всех частиц}} = N * k_0 \quad (1)$$

$$N = \nu * N_a \quad (2) \quad \nu = \frac{N}{N_a}$$

На каждую степень свободы приходится энергии  $= \frac{KT}{2}$

$$k_0 = i * \frac{KT}{2} = \frac{i}{2} * KT \quad (3)$$

(2) и (3)  $\rightarrow$  (1)

$$U = \nu N_a \cdot \frac{i}{2} KT = \frac{i}{2} \nu RT = \frac{i}{2} pV$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \nu R(T_2 - T_1) = \\ &= \frac{i}{2} \nu R \Delta T = \frac{i}{2} p_2 V_2 - \frac{i}{2} p_1 V_1 \end{aligned}$$

# Способы изменения внутренней энергии:

Совершение работы

Теплообмен

**!** Если над телом совершается работа, то его внутренняя энергия увеличивается. Если само тело совершает работу, то внутренняя энергия тела уменьшается

**Теплопроводность** – это вид теплопередачи, осуществляющийся за счёт движения и взаимодействия частиц, из которых состоит тело

**Конвекция** – вид теплопередачи, осуществляющийся за счет движения слоев жидкости или газа.

**Излучение** - вид теплопередачи, осуществляющийся за счёт энергии электромагнитных волн.

**Количественная характеристика** – количество теплоты  $Q$

**$Q$**  – это энергия, которую тело получает или отдает в процессе теплопередачи.

# Теплоемкости

● Теплоемкость :

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, [C] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right]$$

Физический смысл : если  $\Delta T = 1\text{К}$   
то  $C$  численно равна  $Q$

$C$  – это энергия , которую нужно сообщить телу, чтобы изменить  $T$  на  $1\text{К}$

● Удельная теплоемкость:

$$c = \frac{Q}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}, [c] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} \right]$$

Физический смысл: если  $\Delta T = 1\text{К}$ ,  $m = 1\text{кг}$ , то численно равно  $Q$ .

● Молярная теплоемкость:

$$c_{\mu} = \frac{Q}{\nu\Delta T}; [c_{\mu}] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}} \right]$$

Физический смысл: если  $\nu = 1\text{моль}$ ,  $\Delta T = 1\text{К}$ , то  $c_{\mu}$  численно равен  $Q$ .

● Связь между молярной теплоемкостью и удельной:

$$c_{\mu} = \frac{Q}{\nu\Delta T} = \frac{Q}{\frac{m}{\mu}\Delta T} = \frac{\mu Q}{m\Delta T} = c_{\mu}$$

# Первое начало термодинамики

- Опытным путем установлено:

$$\Delta U = Q + A$$

, где  $Q$ -количество теплоты, переданное системе  
 $A'$  – работа внешних сил.

Но и III закона Ньютона:  $A' = -A$ , где  $A$ - работа самого газа.

$$\Delta U = Q - A \Rightarrow Q = A + \Delta U$$

- Первое начало термодинамики запрещает создание вечного двигателя первого рода (воображаемая машина, которая будучи раз пущена в ход совершала бы работу неограниченно долго, не потребляя энергию извне).

$$Q = 0$$

$$0 = A + \Delta U$$

$$A = -\Delta U$$

no wall

Указывает на убыль внутренней энергии.



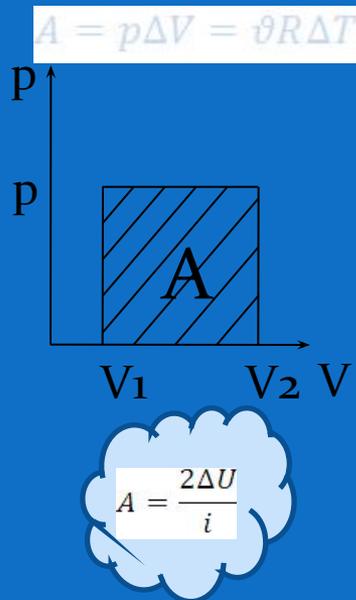
Как только исчерпается внутренняя энергия, тело прекратит работу.

# Применение первого начала термодинамики к изопроцессам

Название	A	$\Delta U$	Q
Изотермический $T = \text{const.}$	$A = Q$ <p><math>V \uparrow \rightarrow A &gt; 0</math>  <math>V \downarrow \rightarrow A &lt; 0</math></p>	<b>0</b>	$A = Q$ $A > 0 \Rightarrow Q > 0$ $A < 0 \Rightarrow Q < 0$  Энергетически выгодный процесс.
Изохорный $V = \text{const.}$	<b>0</b>	$\Delta U = Q$ $T \uparrow \Rightarrow \Delta U > 0$ $T \downarrow \Rightarrow \Delta U < 0$ $p \uparrow \Rightarrow \Delta U > 0$ $p \downarrow \Rightarrow \Delta U < 0$	$Q_V = \Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T =$ $= \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) =$ $= \frac{i}{2} V_2 (p_2 - p_1)$

# Изобарный

$p = \text{const.}$



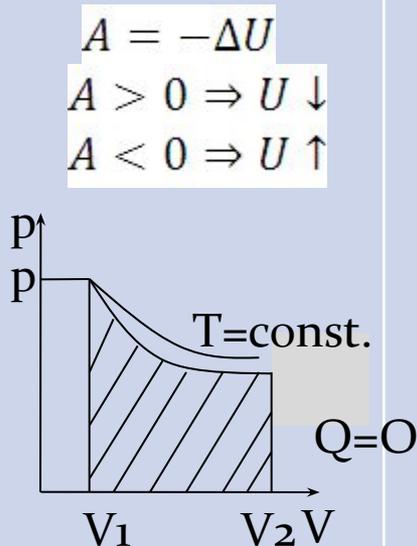
$$\Delta U = \frac{i}{2}\nu R\Delta T = \frac{i}{2}A$$

$$\Delta U = \frac{i}{2}p\Delta V$$

$$\begin{aligned} Q_p &= A + \Delta U = \\ &= \nu R\Delta T + \frac{i}{2}\nu R\Delta T = \\ &= \nu R\Delta T \frac{2+i}{2} \\ Q_p &= \frac{2+i}{2}A = \\ &= \frac{2+i}{2} * \frac{2\Delta U}{2} = \\ &= \frac{2+i}{2}\Delta U \end{aligned}$$

# Адиабатный

(процесс, протекающий в теплоизолированной системе).



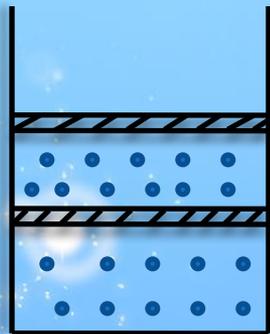
$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{i}{2}\nu R\Delta T = \\ &= \frac{i}{2}(p_2V_2 - p_1V_1) \end{aligned}$$

0

# Работа в термодинамике:

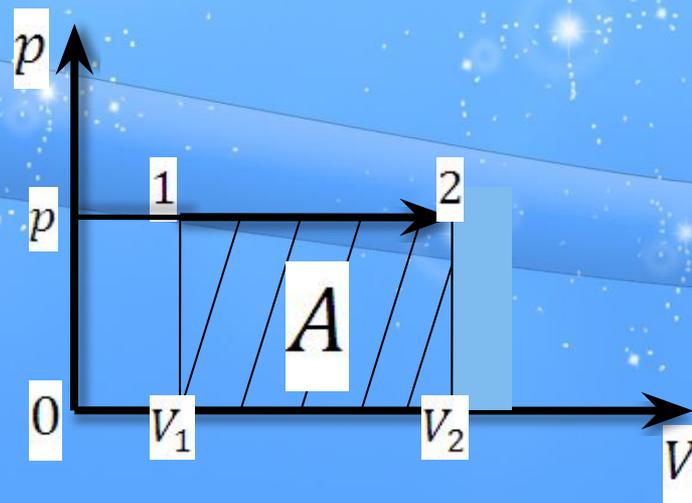
- *Необходимым условием совершения работы является перемещение тела под действием силы.*
- *A - есть функция процесса, результатом совершения работы может быть как изменение внутренней энергии, так и изменение его механической энергии .*

# Работа газа в изобарном процессе.



$m_{\text{поршня}} \neq 0$

$$A = h \cdot F = p \cdot \frac{\Delta V}{sh} = p \cdot \Delta V = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1 = \nu RT_2 - \nu RT_1 = \nu R\Delta T$$



# Работа в любом процессе:

- Как узнать работу в любом процессе.

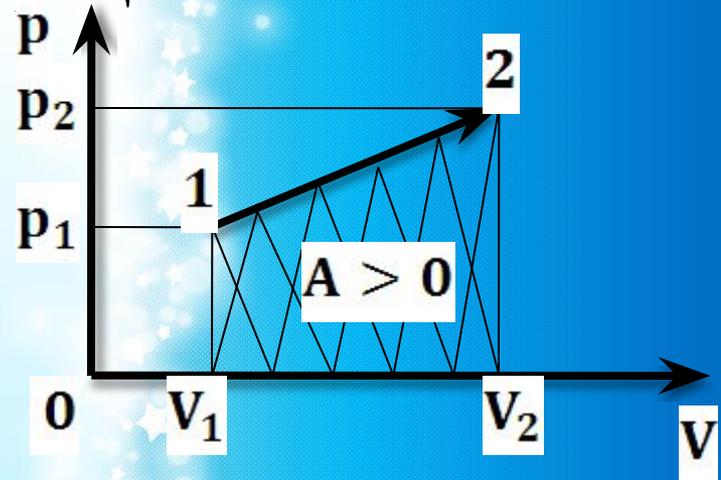
графически

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \Delta V$$

через первое начало термодинамики



$A < 0$  т. к. над газом совершают работу.

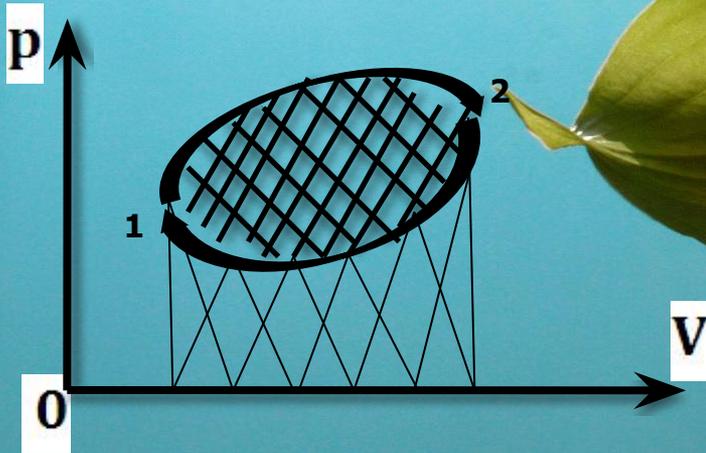


Если  $V \uparrow$  то  $A > 0$

$$A = S \frac{p_1 + p_2}{2} (V_1 + V_2)$$

# Работа в круговом процессе:

*Круговой процесс – это процесс, в результате которого газ, выйдя из какого-либо состояния, вновь к нему возвращается.*



$$A_{12} = S_{V_1 12} v_2 > 0$$

$$A_{21} = S_{V_1 12} v_2 > 0$$

$$A = A_{12} + A_{21} = A_{\phi}$$

# Количество теплоты.

- Количество теплоты есть функция процесса.
- Результатом передачи количества теплоты является только изменение внутренней энергии этой системы.
- Тепловые процессы : нагревание и охлаждение
- Парообразование и конденсация

$$Q = cm\Delta t$$

$$Q = \pm Lm$$

, где L – удельная теплота парообразования

$$L = \frac{Q}{m}$$

- Если  $m=1$  кг , тогда  $L=Q$ (численно) . L – показывает какое количество теплоты необходимо сообщить телу  $m=1$  кг , взятому при температуре кипения, чтобы его полностью испарить.

- Плавление и кристаллизация

$$Q = \pm \lambda m$$

$$\lambda = \frac{Q}{m}$$

- Сгорание топлива

$$Q = qm$$

$$q = \frac{Q}{m}$$

q – удельная теплота сгорания топлива.

# Уравнение теплового баланса.

1)



Условия необходимые для процесса плавления:  
(аналогичные условия необходимы для кипения)

Плавление  
(кристаллизация)

$$t_m = t_{пл} = const$$

$$Q = \pm \lambda m, \text{ удельная теплота плавления}$$

Наличие центров кристаллизации

2)

# Кипение Конденсация

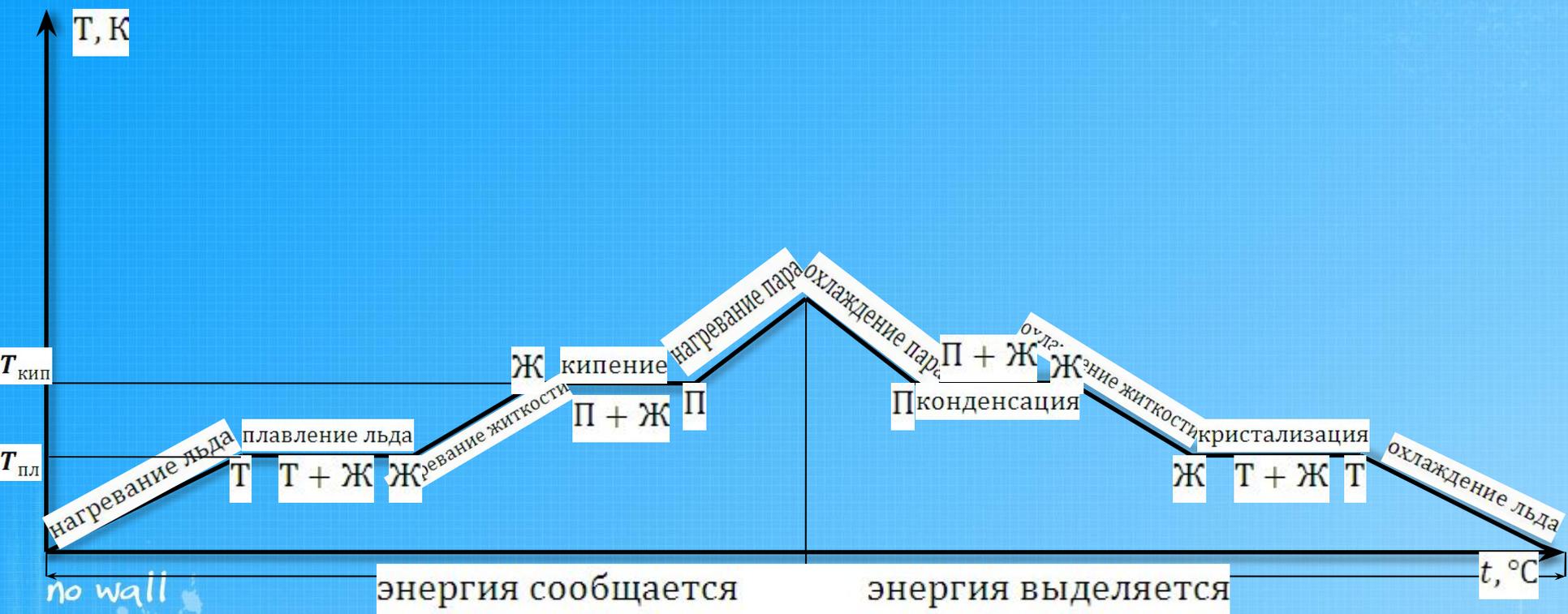
$$t_m = t_{\text{кип}} = \text{const}$$

от рода жидкости

от давления ( $p \uparrow \rightarrow t_{\text{кип}}$ )

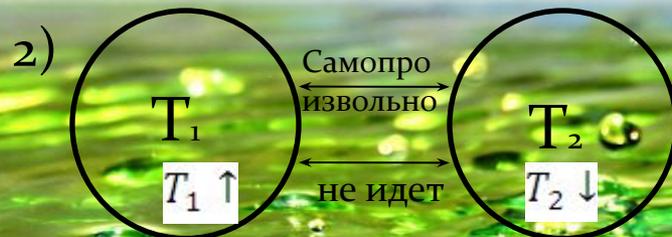
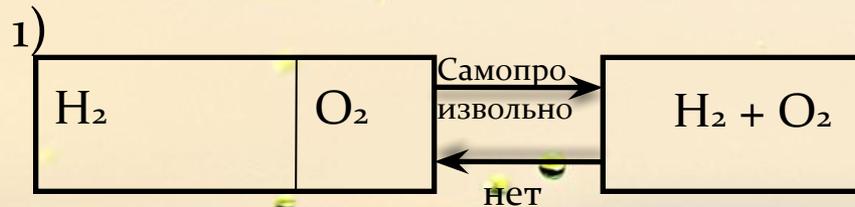
$$Q = \pm rm, \text{ удельная теплота парообразования}$$

3)



# Второй закон термодинамики

Необратимый процесс - процесс, который может самопроизвольно протекать только в одном направлении, в обратном направлении он может протекать как одно из звеньев более сложного процесса.



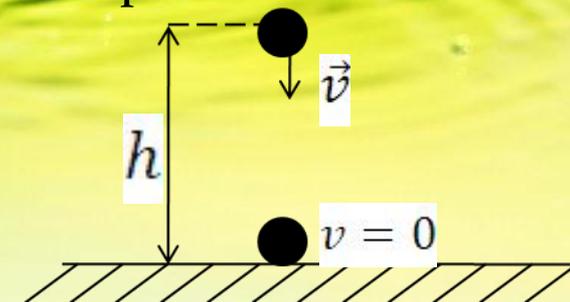
$$T_1 < T_2$$

3) Переход механической энергии во внутреннюю энергию.

самопроизвольно

$$E_{\text{мех}} \rightarrow (E_{\text{внешн}}) \Delta U$$

нет



## **Второй закон термодинамики (формулировка**

**Р. Клаузиуса):** *Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии от холодного тела к горячему.*

## **Второй закон термодинамики (формулировка Кельвина):**

*Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу.*

## **Одна из формулировок второго начала термодинамики:**

*Вечный двигатель второго рода – периодически действующее устройство, совершающее работу за счёт одного*

# Третий закон термодинамики:

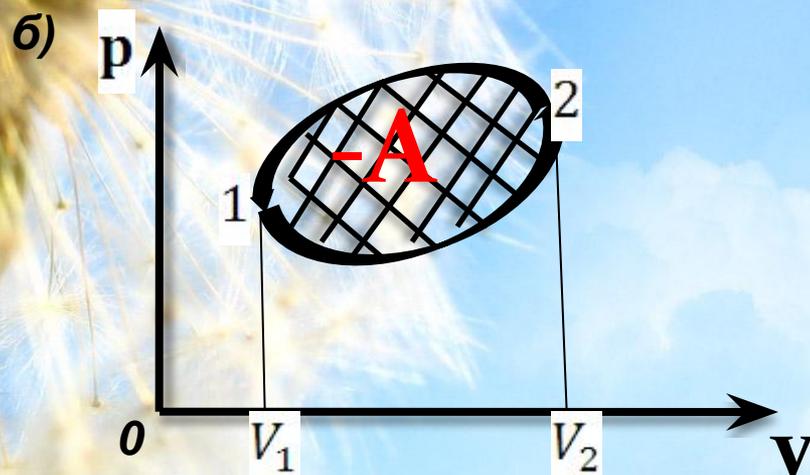
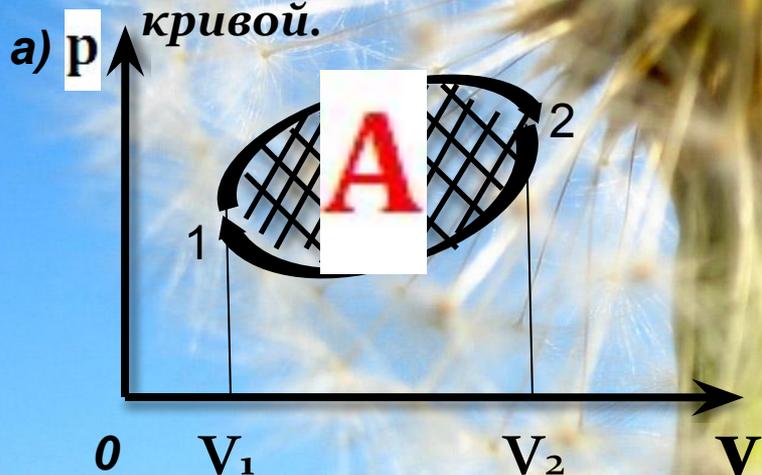
Рассматривает поведение  
термодинамической системы при  $T \rightarrow 0\text{K}$  .  
Из третьего закона термодинамики  
вытекает недостижимость  $T = 0\text{K}$

# Круговой процесс. Обратимые и необратимые процессы.

Круговой процесс (цикл) – процесс, при котором система, пройдя ряд состояний, возвращается в исходное.

Работа при расширении положительна, при сжатии – отрицательна.

Работа за цикл определяется площадью, охватываемой замкнутой кривой.



Если за цикл  $A > 0$ , то цикл называется **прямым** (рис.а), если за цикл  $A < 0$ , (цикл протекает против часовой стрелки), то цикл называется **обратным** (рис.б).

# **Обратимые и необратимые процессы**

**Обратимый процесс- процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное.**

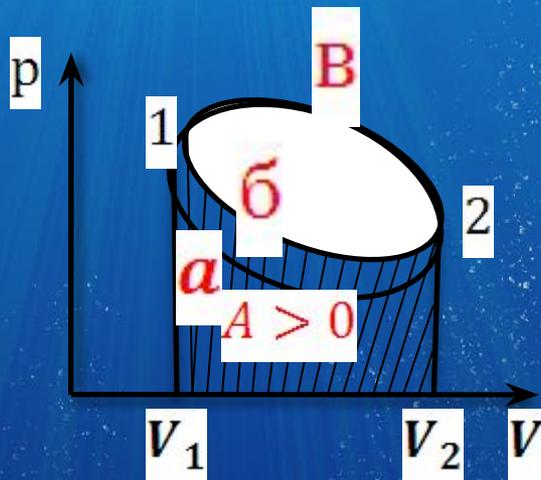
При этом если такой процесс происходит сначала в прямом, а потом в обратном направлении и система возвращается в исходное положение, то в окружающей среде и в этой системе не происходит никаких изменений.

Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, является необратимым.

**Обратимые процессы – это идеализация реальных процессов.**

# Тепловые двигатели

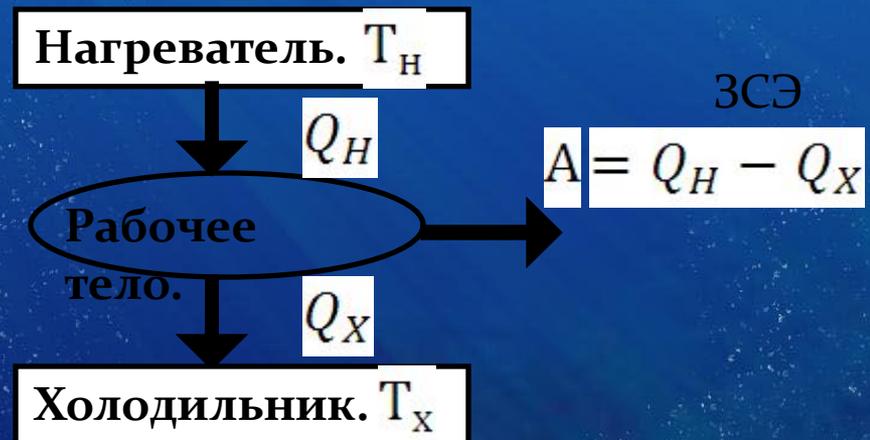
Тепловая машина – это машина, в которой внутренняя энергия топлива превращается в механическую.



$$A_{16261} = A_{162} + A_{261} = 0 \Rightarrow \text{не нужна}$$

$$A_{162в1} = A_{162} + A_{2в1} < 0 \Rightarrow \text{не нужна}$$

$$A_{162а1} = A_{162} + A_{2а1} > 0 \Rightarrow \text{нужен холодильник}$$



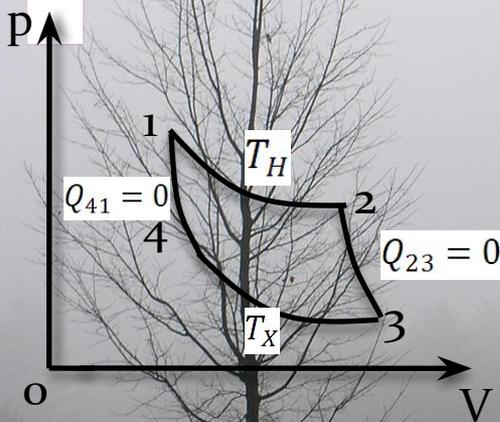
# КПД:

$$\eta = \frac{A}{Q_H} * 100\% = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} * 100\% = \left(1 - \frac{Q_X}{Q_H}\right) * 100\%$$

Для любой тепловой машины, реальной и идеальной.

$$A_{23} + A_{41} = 0$$

Машина идеальная, т.к. при заданных температурах нагревателя и холодильника она имеет  $\eta_{max}$  (КПД)



$$\eta_{ид.} = \frac{T_H - T_X}{T_H} * 100\% = \left(1 - \frac{T_X}{T_H}\right) * 100\%$$

Только для идеальной машины.

# Задачи:

- Идеальный одноатомный газ, взятый в количестве  $n$  моль, нагревают при постоянно давлении. Какое количество теплоты  $\Delta Q$  следует сообщить газу, чтобы средняя квадратичная скорость его молекул увеличилась в  $N$  раз? Начальная температура газа равна  $T_0$ . (6.9)
- Поршень массы  $M$ , замыкающий объем  $V_0$  с одноатомным газом при давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$ , толчком приобретает скорость  $U$ . Оцените температуру  $T$  и объем газа  $V$  при максимальном сжатии. Система теплоизолирована. Теплоемкостями поршня и сосуда пренебречь. (8.14)
- В горизонтально расположенной трубке могут без трения двигаться два поршня массами  $m_1$  и  $m_2$ , между которыми содержится идеальный газ в количестве  $n$  молей, имеющий температуру  $T$ . Поршням толчком сообщают скорости  $V_1$  и  $V_2$ , направленные вдоль оси трубы навстречу друг другу. Найти максимальную температуру газа  $T_{\max}$ , если его масса  $m \ll m_1, m \ll m_2$ . Число степеней свободы газа равно  $i$ . Система теплоизолирована и находится в вакууме. Теплоемкостью трубы и поршней пренебречь. (8.17)

- Один моль идеального газа находится в цилиндре под поршнем при температуре  $T_1$ . Газ при постоянном давлении нагревают до температуры  $T_2$ , затем при постоянном объеме нагревают до температуры  $T_3$ . Далее газ охлаждают при постоянном давлении, и его объем доходит при этом до первоначального значения. Затем газ при постоянном объеме возвращают в начальное состояние. Какую работу совершил газ за цикл?(9.8)
- На  $p, V$ - диаграмме изображены графики двух циклических процессов, которые проводят с одноатомным газом: 1-2-3-4 и 1-3-4-1. У каждого из циклов КПД больше и во сколько раз?(9.11)
- В ходе цикла Карно рабочее вещество получает от нагревателя количество теплоты  $Q_{\text{в}}=300$  кДж. Температуры нагревателя и холодильника равны соответственно  $T_{\text{н}} = 450$  К и  $T_{\text{х}} = 280$  К. Определите работу  $A$ , совершаемую рабочим веществом за цикл.(9.2)
- В сосуд, содержащий воду массой  $m_1= 2$  кг при температуре  $t_1 = 5$ , положили кусок льда массой  $m_2 = 5$  кг при температуре  $t_2= -40$ . Найти температуру и объем смеси после установления равновесия. (10.1)

Дано:

$n, T_0,$

$$\frac{V_2}{V_1} = N$$

$i=3$

$Q - ?$

$$Q = A + \Delta U \quad (1)$$

$$A = n R \Delta T \quad (2)$$

$$V_1 = \sqrt{3RT_0/\mu} \Rightarrow V_1^2 = 3RT_0/\mu \quad (3)$$

$$V_2 = \sqrt{3RT_2/\mu} \Rightarrow V_2^2 = 3RT_2/\mu \quad (4)$$

(4)/(3):

$$3RT_2/\mu : 3RT_0/\mu = N^2$$

$$3RT_2\mu/3RT_0\mu = N^2$$

$$T_2/T_0 = N^2 \Rightarrow T_2 = T_0 N^2 \quad (5)$$

(5) → (2):

$$A = nR (N^2 T_0 - T_0) = nRT_0(N^2 - 1) \quad (6)$$

$$\Delta U = i/2 \cdot A = i/2 \cdot nRT_0(N^2 - 1) \quad (7)$$

(6),(7) → (1):

$$Q = nRT_0(N^2 - 1) + i/2 \cdot nRT_0(N^2 - 1) =$$

$$\frac{i+2}{2} \cdot nRT_0(N^2 - 1)$$

Ответ:  $Q = \frac{i+2}{2} \cdot nRT_0(N^2 - 1)$

Дано: 2

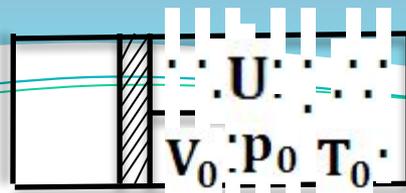
M

$i = 3$

$p_0, V_0$

U

$v_0$



ЗСЭ:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{i}{2} p_0 V_0 = \frac{i}{2} p V \quad (1)$$

$$p_0 V_0 = \vartheta R T_0.$$

$$\vartheta R = \frac{p_0 V_0}{T_0} \quad (2)$$

$$(2) \rightarrow (1)$$

$$\frac{M U^2}{2} + \frac{i}{2} p_0 V_0 = \frac{i p_0 V_0}{2 T_0} T.$$

$$p V^2 = const.$$

$$p V = \vartheta R T$$

$$\frac{\vartheta R T V^2}{V} = const.$$

$$T V^{\gamma-1} = const$$

$$p = \frac{\vartheta R T}{V}$$

$$T_0 V_0^{\gamma-1} = T V^{\gamma-1}$$

$$V^{\gamma-1} = \frac{T_0 V_0^{\gamma-1}}{T}$$

$$T = \frac{(M U^2 + i p_0 V_0) T_0}{i p_0 V_0} = T_0 \left( \frac{M U^2}{i p_0 V_0} + 1 \right)$$

T-? V-?

$$V = \frac{T_0 V_0^{\gamma-1}}{\sqrt{T}} = V_0^{\gamma-1} \sqrt{\frac{T_0}{T}}$$

$$pV = \vartheta RT$$

$$p = \frac{\vartheta RT}{V}$$

$$\gamma = \frac{i+2}{i}$$

$$V = V_0^{\gamma-1} \sqrt{\frac{T_{\vartheta}}{T_{\vartheta} \left( \frac{MU^2}{ip_0 V_0} - 1 \right)}} = V_0^{\gamma-1} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{MU^2}{ip_0 V_0}}}$$

$$= V_0^{\gamma-1} \sqrt{\frac{MU^2 + ip_0 V_0}{ip_0 V_0}}$$

$$\gamma - 1 = \frac{i+2}{i} - 1$$

$$\gamma - 1 = \frac{2}{i}$$

$$V = \frac{2}{i} \sqrt{\frac{MU^2 + ip_0 V_0}{ip_0 V_0}}$$

3

Дано:

 $m_1, m_2,$  $U, V_1, V_2$  $m \ll m_1,$  $m \ll m_2, i$  $T_{\max} = ?$ 

$$\text{ЗСИ: } m_1 \vec{v}' - m_2 \vec{v}' = m_1 \vec{v} + m_2 \vec{v} \quad (1)$$

$$\text{ЗСЭ: } m_1 v_1^2/2 + m_2 v_2^2/2 + i/2 \cdot URT = m_1 v'^2/2 + m_2 v'^2/2 + i/2 \cdot URT_{\max} \quad (2)$$

$$\text{Из (1)} \Rightarrow v' = \frac{m_1 v - m_2 v}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

$$m_1 v'^2 + m_2 v'^2 + iUR = \frac{(m_1 v - m_2 v)^2 (m_1 + m_2)}{(m_1 + m_2)^2} + iUR_{\max}$$

$$m_1 v'^2 + m_2 v'^2 + iUR - \frac{(m_1 v - m_2 v)^2}{(m_1 + m_2)} = iUR_{\max}$$

$$\frac{(m_1 v - m_2 v)(m_1 + m_2) - (m_1 v - m_2 v)^2}{m_1 + m_2} + iUR = iUR_{\max}$$

$$\frac{m_1 v_1^2 + m_1 m_2 v_1^2 + m_1 m_2 v_2^2 + m_2 v_2^2 + m_1 v_1^2 + m_1 m_2 v_2^2}{m_1 + m_2} +$$

$$+ i U R T = i U R T_{\max}$$

$$\frac{m_1 m_2 (v_1^2 + v_2^2)}{m_1 + m_2} + i U R T = i U R T_{\max}$$

$$\frac{m_1 m_2 (v_1 + v_2)^2}{m_1 + m_2} + i U R T = i U R T_{\max}$$

$$T_{\max} = \frac{m_1 m_2 (v_1 + v_2)^2}{(m_1 + m_2) i U R}$$

$$T_{\max} = \frac{m_1 m_2 (v_1 + v_2)^2}{m_1 + m_2} + T$$

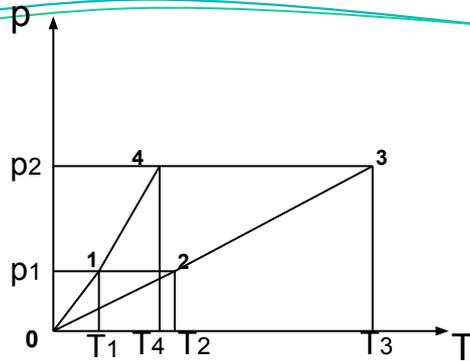
ОТВЕТ:  $T_{\max} = \frac{m_1 m_2 (v_1 + v_2)^2}{m_1 + m_2} + T$

4

Дано:

 $\nu = 1 \text{ моль}$  $T_1$  $T_2$  $T_3$ 

A-?



$$1-2 : p = \text{const.}, \quad \frac{V}{T} = \text{const.}$$

$$T \square \Rightarrow V \square ;$$

$$2-3 : V = \text{const.}, \quad \frac{p}{T} = \text{const.}$$

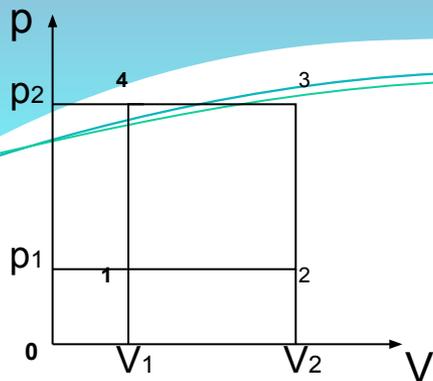
$$p \square \Rightarrow T \square ;$$

$$3-4 : p = \text{const.}, \quad \frac{V}{T} = \text{const.}$$

$$T \square \Rightarrow V \square ;$$

$$4-1 : V = \text{const.}, \quad \frac{p}{T} = \text{const.}$$

$$p \square \Rightarrow T \square .$$



$$\begin{aligned}
 A &= (V_2 - V_1)(p_2 - p_1) = \\
 &= p_2 V_2 - p_1 V_2 - p_2 V_1 + p_1 V_1 = \\
 &= \nu R T_3 - \nu R T_2 - \nu R T_4 + \nu R T_1 = \\
 &= \nu R (T_3 - T_2 - T_4 + T_1) \quad (1)
 \end{aligned}$$

т.к. процесс 4-2 изохорный:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_4} \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_4} \quad (2)$$

$$\frac{p_1}{T_2} = \frac{p_2}{T_3} \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_2}{T_3} \quad (3)$$

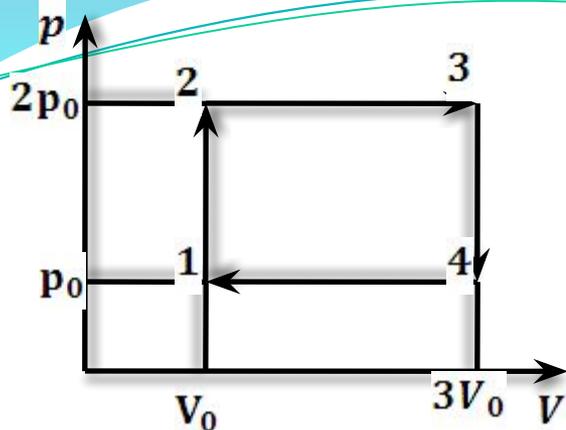
(2) = (3):

$$\frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow T_4 = \frac{T_3 T_1}{T_2} \quad (4)$$

(4) → (1):

$$A = \nu R (T_3 - T_2 - \frac{T_3 T_1}{T_2} + T_1)$$

Ответ:  $A = \nu R (T_3 - T_2 - \frac{T_3 T_1}{T_2} + T_1)$ .



(рис 9.11)

$$\eta = \frac{A}{Q_H} \quad (1) \quad A = (2p_0 - p_0)(3V_0 - V_0) = 2p_0V_0 \quad (2)$$

$$Q = A + \Delta U > 0, \text{ когда работает нагреватель.}$$

$$Q > 0, A > 0$$

$$1 \rightarrow 2; V = \text{const.} \quad A_{12} = 0$$

$$p \uparrow \rightarrow U \uparrow \Rightarrow \Delta U > 0 \Rightarrow Q > 0, \text{ работает нагреватель}$$

$$2 \rightarrow 3; p = \text{const.}$$

$$Q_H = 2p_0(3V_0 - V_0) + \frac{i}{2}(2p_0 \cdot 3V_0 - p_0 V_0) = \quad Q > 0 \Leftarrow \begin{cases} Q_{23} = A_{23} + \Delta U_{23} \\ V \uparrow \Rightarrow A_{23} > 0 \end{cases}$$

$$= 4p_0V_0 + \frac{i}{2}5p_0V_0 =$$

$$\Rightarrow U \uparrow \Rightarrow \Delta U > 0, \text{ работает нагреватель}$$

$$3 \rightarrow 4; V = \text{const.} \quad A_{34} = 0$$

$$= p_0V_0 \left(4 + \frac{5i}{2}\right) \quad (3)$$

$$p \downarrow \Rightarrow U \downarrow \Rightarrow \Delta U < 0 \Rightarrow Q < 0, \text{ Работает холодильник.}$$

$$4 \rightarrow 1; p = \text{const.}$$

$$(3), (2) \rightarrow (1)$$

$$V \downarrow \Rightarrow A < 0 \Rightarrow U \downarrow \Rightarrow \Delta U < 0, Q < 0 \text{ Работает холодильник.}$$

$$\eta = \frac{2p_0V_0}{p_0V_0 \left(4 + \frac{5i}{2}\right)} \times 100\% = \frac{4}{8 + 5i} \times 100\%.$$

**6****Дано:** $Q_H,$  $T_H,$  $T_X.$ 

A-?

$$A = \eta \cdot Q_H \quad (1)$$

$$\eta = T_H - T_X / T_H \quad (2)$$

(2)→(1):

$$A = Q_H \cdot T_H - T_X / T_H$$

**Ответ:**  $A = Q_H \cdot T_H - T_X / T_H$

Дано: 2

$$m_1 = 2 \text{ кг}$$

$$t_1 = 5^\circ\text{C}$$

$$m_2 = 5 \text{ кг}$$

$$t_2 = -40^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{л}} = 0.916 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$t_{\text{уст}} - ? \quad V_{\text{см}} - ?$$

1. Охлаждение воды  $\tau = 0^\circ\text{C}$

$$Q_1 = c_{\text{в}} m_1 (t_1 - \tau)$$

$$Q_1 = 4200 \cdot 2 \cdot 5 = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Дж}$$

2. Нагревание льда  $\tau = 0^\circ\text{C}$

$$Q_2 = c_{\text{л}} m_2 (\tau - t_2)$$

$$Q_2 = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 5 \cdot 40 = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

$$Q_1 < Q_2 \Rightarrow \text{Вода начнёт замерзать.}$$

3. Кристаллизация всей воды.

$$Q_3 = \lambda m$$

$$Q_3 = 3 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 2 = 6,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

$$Q_1 + Q_3 > Q_2 \Rightarrow \text{вода замёрзнет, но не вся} \Rightarrow t_{\text{уст}} = 0^\circ\text{C}$$

Процессы.

Поглащение  $Q$   
нагревание льда  
 $Q_2$

Выделение  $Q$

— охлаждение воды  $Q_1$

— крист. части воды  $Q_3 = \lambda m_{\text{кр}}$

$$|Q_{\text{погл}}| = |Q_{\text{отд}}| \quad ! \text{ Следить за знаком}$$

$$Q_2 = Q_1 + Q'_3$$

$$Q_2 = Q_1 = \lambda m_{\text{кр}}$$

$$m_{\text{кр}} = \frac{Q_2 - Q_1}{\lambda}$$

$$m'_\text{л} = m_2 + m_{\text{кр}}$$

$$m'_\text{в} = m_1 - m_{\text{кр}}$$

$$V_{\text{см}} = \frac{m'_\text{л}}{\rho_\text{л}} + \frac{m'_\text{в}}{\rho_\text{в}}$$