

# V. Тепловые явления

## 1. Уравнение Менделеева-Клапейрона

Для идеального газа

$$pV = \nu RT$$

Абсолютная температура  $T = (t^{\circ}\text{C} + 273)\text{K}$

Универсальная газовая постоянная

$$R \approx 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{K)}$$

Давление газа (в Па)  
1 атм  $\approx 10^5$  Па  $\approx 760$  мм.рт.ст.

Объем газа (в  $\text{м}^3$ )  
1 л =  $10^{-3}$   $\text{м}^3$

Количество вещества — число моль газа.  
1 моль — группа из  $\approx 6,02 \cdot 10^{23}$  молекул.

Число Авогадро  $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

$$pV = \frac{NRT}{N_A}$$

$k = R/N_A \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$   
постоянная Больцмана

разделим обе части на  $V$ :  $p = \frac{N}{V} kT$

$n = N/V$  — концентрация газа — число молекул в  $1 \text{ м}^3$ .

$$p = nkT$$

$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

Число молекул газа

Число молекул в 1 моль

$$\nu = \frac{m}{M}$$

Масса газа

Масса 1 моль газа — молярная масса

разделим обе части на  $V$ :  
 $p = \frac{mRT}{VM}$

$\rho = m/V$  — плотность газа.

$$p = \frac{\rho}{M} RT$$

$M \approx 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$

8  
15,9994 **O**  
Кислород

## 2. Закон Дальтона

$$p_{\text{смеси}} = p_1 + p_2 + \dots$$

Давление смеси  
неразрушающихся  
газов.

$$p_1 = \frac{\nu_1 RT_{\text{смеси}}}{V_{\text{смеси}}}$$

Парциальное давление первого из газов, входящих в смесь, — т. е. давление, которое создавал бы этот газ, если бы он один занимал весь объем смеси.

## 3. Основное уравнение МКТ

$$\bar{E}_k^{\text{пост}} = \frac{m_0 v_{\text{КВ}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k^{\text{пост}} = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{КВ}}^2$$

Масса 1 моль  
Число молекул  
в 1 моль

Масса одной молекулы

Плотность газа  $\rho$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул

$$\bar{E}_k^{\text{пост}} = \frac{\frac{m_0 v_1^2}{2} + \frac{m_0 v_2^2}{2} + \dots + \frac{m_0 v_N^2}{2}}{N} = \frac{m_0}{2} \left( \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} \right) = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{m_0 v_{\text{КВ}}^2}{2}$$

$$v_{\text{КВ}} = \sqrt{\bar{v}^2}$$

Средняя квадратичная скорость

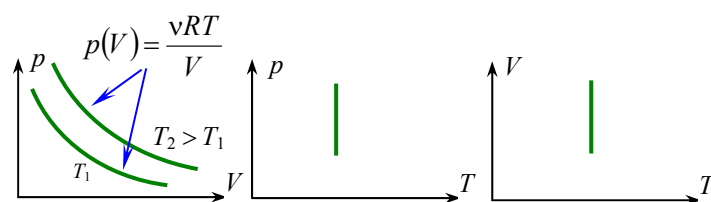
## 4. Газовые законы

Из  $pV = \nu RT$  следует, что если  $\nu = \text{const}$ , то  $\frac{pV}{T} = \text{const}$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$\nu = \text{const}$ ,  
 $T = \text{const}$   $p_1 V_1 = p_2 V_2$

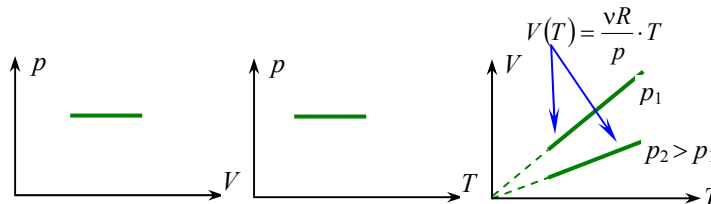
**Изотермический процесс.**  
график - изотерма.



$\nu = \text{const}$ ,  
газ идеальный

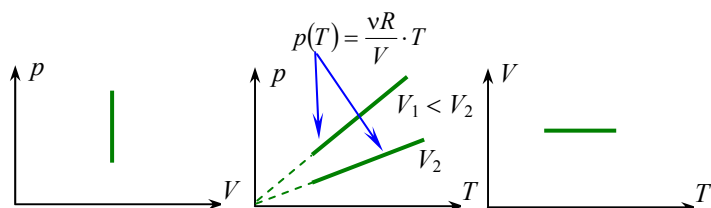
$\nu = \text{const}$ ,  
 $p = \text{const}$   $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

**Изобарный процесс.**  
график - изобара



$\nu = \text{const}$ ,  
 $V = \text{const}$   $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

**Изохорный процесс.**  
график - изохора.



## 5. Первый закон термодинамики

**Количество теплоты**, полученное ( $Q > 0$ ) или отданное ( $Q < 0$ ) системой.

(Энергия, полученная или отданная системой в процессе теплопередачи, т. е. при обмене энергиями между молекулами — на микроскопическом уровне.)

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \Rightarrow Q = C\Delta T$$

Теплоемкость тела (системы)

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \Rightarrow Q = cm\Delta T$$

Удельная теплоемкость вещества

$$C_M = \frac{Q}{\nu\Delta T} \Rightarrow Q = C_M\nu\Delta T$$

Молярная теплоемкость вещества

При  $V = \text{const}$ :  $C_V = \frac{\Delta U}{\Delta T}$

При  $p = \text{const}$ :

$$C_p = \frac{\Delta U + A}{\Delta T} > C_V$$

$$Q = \Delta U + A_{\text{газа}}$$

**Работа газа**

$$A_{\text{газа}} = -A_{\text{над газом}}$$

$$V = \text{const}$$

$$A_{\text{газа}} = 0$$

$$p = \text{const}$$

$$A_{\text{газа}} = p\Delta V = \nu R\Delta T$$

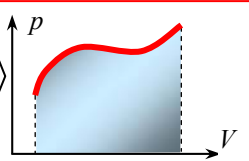
$$\nu = \text{const}$$

численно

$$A_{\text{газа}} = \pm S_{\text{под граф. } p(V)}$$

"+" — если газ расширяется

"-" — если газ сжимается



**Изменение внутренней энергии** системы

$$U = E_{\text{к тепл}} + E_{\text{р взаим}}$$

Внутренняя энергия

Кинетическая энергия хаотического движения молекул.

Потенциальная энергия взаимодействия молекул друг с другом.

В идеальном газе  $E_{\text{к тепл}} \gg E_{\text{р взаим}}$ , поэтому

$$U = E_{\text{к тепл}} = \frac{i}{2}pV = \frac{i}{2}\nu RT$$

$i = 3$  для одноатомных газов (He, Ne, Ar, ...)

$i = 5$  для двухатомных газов ( $\text{H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{воздух}$ , ...)

$i = 6$  для многоатомных газов (пары  $\text{H}_2\text{O}$ , ...)

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

Для идеального газа

$$\Delta U = C_V\Delta T = c_V m\Delta T = C_{M_V}\nu\Delta T$$

Для идеального газа в любом процессе

## 6. Адиабатический процесс

$$Q = 0 \Rightarrow A_{\text{газа}} = -\Delta U$$

В теплоизолированной системе или при быстрых процессах

При адиабатическом расширении ( $A_{\text{газа}} > 0$ ) газ охлаждается ( $\Delta U < 0$ )

При адиабатическом сжатии ( $A_{\text{газа}} < 0$ ) газ нагревается ( $\Delta U > 0$ )

Адиабата — гипербола, идущая более "круто" чем изотермы (с ростом  $V$  убывает  $T$ ).



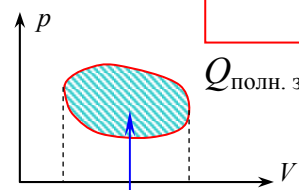
## 7. КПД циклического процесса (теплового двигателя)

$$\eta_{\text{цикла}} = \frac{A_{\text{газа в цикле}}}{Q_{\text{подв}}} = \frac{Q_{\text{подв}} - |Q_{\text{отв}}|}{Q_{\text{подв}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{отв}}|}{Q_{\text{подв}}}$$

$$Q_{\text{полн. за цикл}} = Q_{\text{подв}} + Q_{\text{отв}} = \Delta U_{\text{в цикле}} + A_{\text{газа в цикле}}$$

$$Q_{\text{отв}} < 0 \Rightarrow Q_{\text{отв}} = -|Q_{\text{отв}}| \quad \Delta U_{\text{в цикле}} = U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}} = 0$$

$$Q_{\text{подв}} - |Q_{\text{отв}}| = A_{\text{газа в цикле}}$$



$$A_{\text{газа в цикле}} = \pm S_{\text{внутри цикла } p(V)}$$

численно

"+" — если цикл идет "по часовой стрелке"  
 "-" — если цикл идет "против часовой стрелки"

## 6. Насыщенный пар

газ, дальнейшее изотермическое сжатие или изохорное охлаждение которого приводит к превращению части этого газа в жидкость (при наличии центров конденсации).

газ, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, т. е. в состоянии, когда число молекул, переходящих из газа в жидкость равно числу молекул, переходящих обратно за то же время.

Реальные изотермы: область I — вода

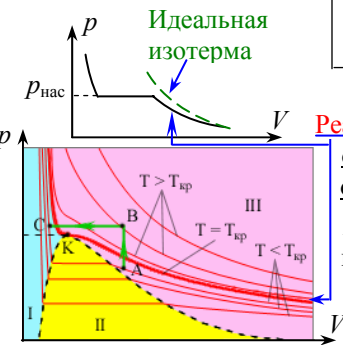
область II — вода в равновесии с насыщенным паром

область III — газ

$T_{\text{кр}}$  — критическая температура, при  $T > T_{\text{кр}}$  газ никаким сжатием нельзя перевести в жидкость.

**Условие кипения:**  $p_{\text{нас}} = p_{\text{на пузырьке}} \approx p_{\text{атм}}$

Для воды  $p_{\text{нас}}(100^\circ\text{C}) \approx 10^5 \text{ Па}$



$$\eta_{\text{идеал}} = \frac{T_{\text{наг}} - T_{\text{хол}}}{T_{\text{наг}}}$$

КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно — **максимальный** теоретически возможный КПД при данных  $T_{\text{наг}}$  и  $T_{\text{хол}}$ .

Давление насыщенного пара (а также его плотность) однозначно определяется температурой и больше ни от чего не зависит (ни от объема, ни от массы пара).

**Относительная влажность воздуха**

$$\varphi = \frac{p_{\text{пара в воздухе}}}{p_{\text{нас. пара при данной } T}} = \frac{P_{\text{пара в воздухе}}}{P_{\text{нас. пара при данной } T}} (\times 100 \%)$$