

# 1. Тепловые явления

## 1. Уравнение Менделеева-Клапейрона

Для идеального газа

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

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

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

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

Универсальная газовая постоянная  
 $R \approx 8,31$  Дж/(моль·К)

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

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

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

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

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

$$p = nkT$$

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

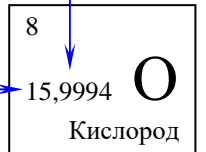
разделим обе части на V:

$$p = \frac{mRT}{VM}$$

$\rho = m/V$  — плотность газа.

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

$M \approx 16 \cdot 10^{-3}$  кг/моль



## 2. Закон Дальтона

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

Давление смеси  
неразрушающих  
газов.

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

$$p_1 = \frac{v_1 RT_{\text{смеси}}}{V_{\text{смеси}}}$$

## 3. Основное уравнение МКТ

$$\bar{E}_k^{\text{пост}} = \frac{m v^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул

$$\bar{E}_k^{\text{пост}} = \frac{\frac{m v_1^2}{2} + \frac{m v_2^2}{2} + \dots + \frac{m v_N^2}{2}}{N} = \frac{m}{2} \left( \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} \right) = \frac{m v^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Для идеального газа

$$p = \frac{2}{3} n E_k^{\text{пост}} = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{кв}}^2$$

$m_0 = \frac{M}{N_A}$  — Масса 1 моль  
Число молекул в 1 моль  
Масса одной молекулы

Плотность газа  $\rho$

$v_{\text{кв}} = \sqrt{v^2}$   
Средняя квадратичная скорость

## 4. Газовые законы

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

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

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

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

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Изотермический процесс,  
график - изотерма.

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

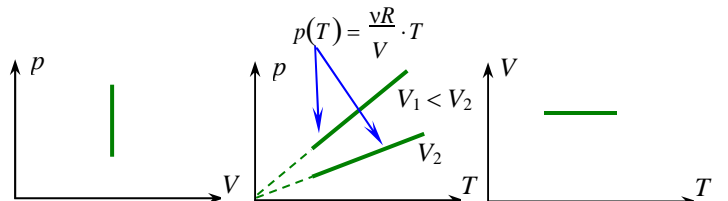
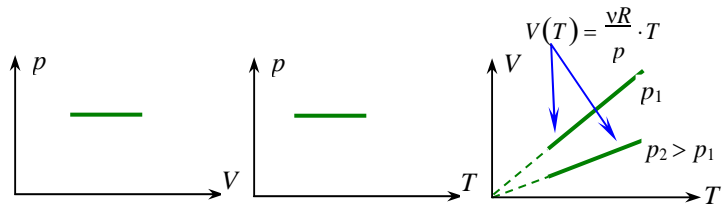
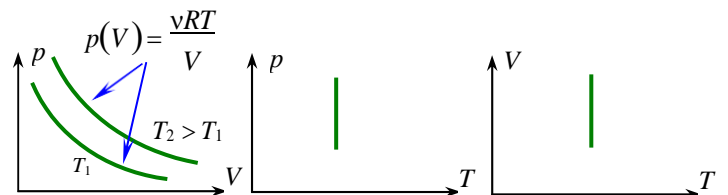
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

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  $p = \text{const}$ :

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

## 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)

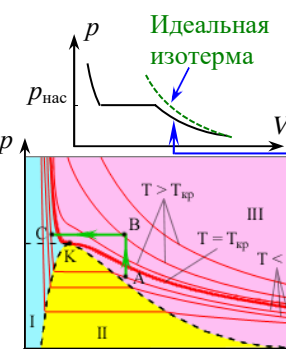
$$\eta_{\text{цикла}} = \frac{A_{\text{газа в цикле}}}{Q_{\text{подв}}} = \frac{Q_{\text{подв}} - |Q_{\text{отв}}|}{Q_{\text{подв}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{отв}}|}{Q_{\text{подв}}}$$

$Q_{\text{полн. за цикл}} = Q_{\text{подв}} + Q_{\text{отв}} = \Delta U_{\text{в цикле}} + A_{\text{газа в цикле}}$   
 $Q_{\text{отв}} < 0 \Rightarrow Q_{\text{отв}} = -|Q_{\text{отв}}|$   $\Delta U_{\text{в цикле}} = U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}} = 0$

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

$A_{\text{газа в цикле}} = \pm S_{\text{внутри цикла } p(V)}$   
 "+" — 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:**  $p_{\text{нас}} = p_{\text{на пузырек}} \approx p_{\text{атм}}$   
 Для воды  $p_{\text{нас}} (100^\circ\text{C}) \approx 10^5 \text{ Па}$

## Работа газа

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

$$V = \text{const}$$

$$A_{\text{газа}} = 0$$

$$p = \text{const}$$

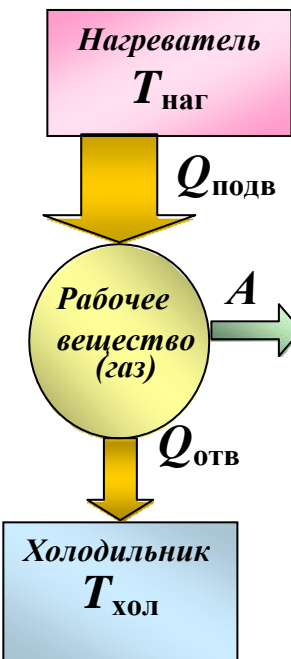
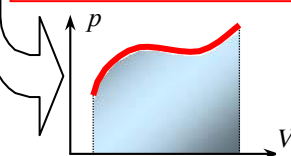
$$A_{\text{газа}} = p\Delta V = \nu R\Delta T$$

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

численно

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

"+" — если газ расширяется  
 "-" — если газ сжимается



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

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**

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

