

**Физика**

**Молекулярно-кинетическая  
теория**

## 7. Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов

### 7.1. Статистический и термодинамический методы исследования

***Молекулярная физика и термодинамика*** — разделы физики, в которых изучаются зависимости свойств тел от их строения, взаимодействия между частицами и характера движения частиц.

***Молекулярная физика*** — раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений.

Основа молекулярной физики — это представление, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

Явления в молекулярной физике изучаются с помощью статистического метода.

***Статистический метод*** — это метод исследования систем, состоящих из большого числа частиц и использующий статистические закономерности динамических характеристик этих частиц (скорости, энергии и т. д.).

***Термодинамика*** — раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, а также процессы перехода между этими состояниями.

Явления термодинамики изучаются с помощью термодинамического метода.

***Термодинамический метод*** – это метод исследования систем, состоящих из большого числа частиц и использующий величины, характеризующие систему в целом (давление, объем, температура).

Термодинамика имеет дело с термодинамической системой.

***Термодинамическая система*** – это совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

Состояние системы задается термодинамическими параметрами (параметрами состояния) — температурой, давлением и удельным объемом.

***Температура*** — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

В настоящее время применяются только две температурные шкалы — термодинамическую и Международную практическую.

В Международной практической шкале температура измеряется в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Температура замерзания и кипения воды при давлении  $1,013 \cdot 10^5$  Па соответственно 0 и  $100^{\circ}\text{C}$  (реперные точки).

В термодинамической шкале температура измеряется в кельвинах (K).

Температура определяется по одной реперной точке — тройная точка воды (температура, при которой лед, вода и насыщенный пар при давлении 609 Па находятся в термодинамическом равновесии).

Температура этой точки по термодинамической шкале равна 273,15K.

Термодинамическая температура и температура по Международной практической шкале связаны соотношением:

$$T = 273,15 + t.$$

Нормальные условия:

$$T_0 = 273,15 \text{ K} = 0^{\circ} \text{ C}, \quad p_0 = 101325$$

Удельный объем  $V$  — это объем единицы массы.

Когда тело однородно, т. е. его плотность  $\rho = \text{const}$ , то  $v = V/m = 1/\rho$ .

## 7.2. Законы, описывающие поведение идеальных газов

В молекулярно-кинетической теории пользуются **МОДЕЛЬЮ идеального газа**, согласно которой считают, что:

- 1) собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
- 2) между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
- 3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

## **Закон Бойля—**

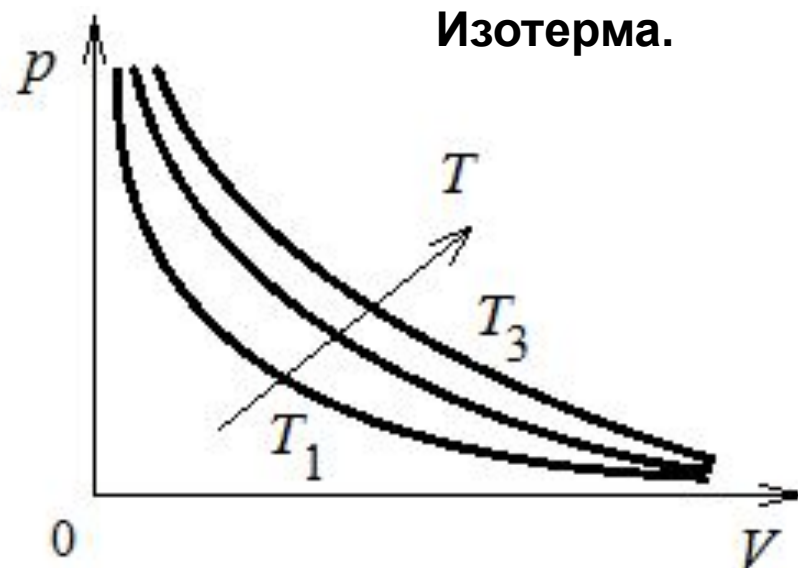
### **Мариотта:**

«для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная»:

$$PV = \text{const},$$

$$T = \text{const}, \quad m = \text{const}.$$

Роберт Бойль (1627—1691)—  
английский ученый;  
Эдм Мариотт (1620—1684) —  
французский физик.



## Законы Гей-Люссака

1) объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

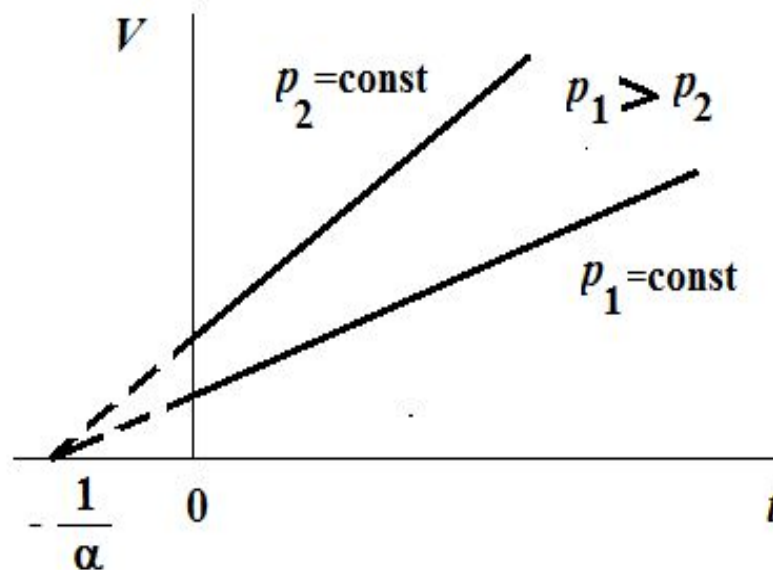
$$V = V_0(1 + \alpha t),$$

$$p = \text{const}, \quad m = \text{const}.$$

Процесс, протекающий при постоянном давлении, называется изобарным.

Жозеф Гей-Люссак (1778—1850) — французский ученый.

Изобара.



$$\alpha = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}.$$



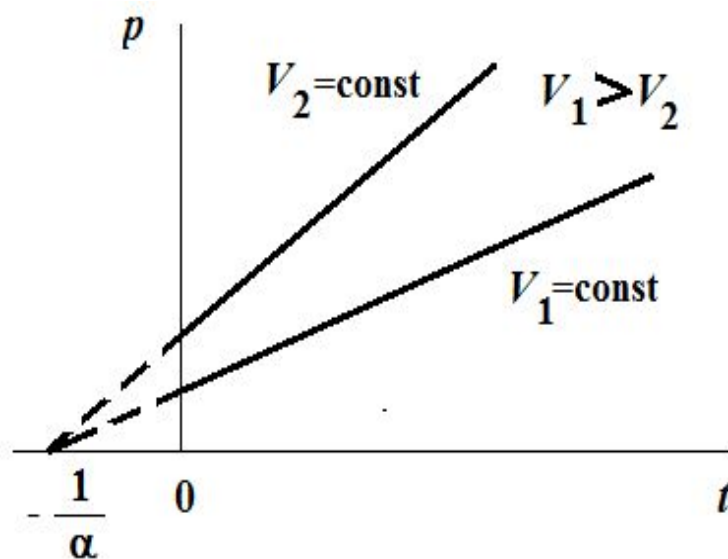


2) давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой:

$$p = p_0(1 + \alpha t),$$

$$V = \text{const}; \quad m = \text{const}.$$

Изохора.



Процесс, протекающий при постоянном объеме, называется изохорным.

В термодинамической шкале температур:

$$V = V_0(1 + \alpha t) = V_0 \alpha T.$$

$$p = p_0(1 + \alpha t) = p_0 \alpha T.$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad \frac{V}{T} = \text{const}, \quad \text{при } p = \text{const}, m = \text{const}.$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad \frac{p}{T} = \text{const}, \quad \text{при } V = \text{const}, m = \text{const}.$$

## ***Закон Авогадро:***

**«моли любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковые объемы».**

При нормальных условиях этот объем равен  **$22,41 \cdot 10^{-3}$**   
**м<sup>3</sup>/МОЛЬ** (молярный объем).

**А. Авогадро (1776—1856) —**  
**итальянский физик и химик.**



Моль – единица количества вещества, количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в **0,012 КГ** изотопа углерода.

Молярная масса:

$$\mu = \frac{m}{V} \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right] \quad \text{– это масса одного моля вещества.}$$

В одном моле различных веществ содержится одно и то же число молекул, называемое постоянной Авогадро:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \quad -1$$

## **Закон Дальтона:**

«давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений  $p_1, p_2, \dots, p_n$  входящих в нее газов»:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

Парциальное давление — давление, которое производил бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.



**Дж. Дальтон (1766—1844) —  
английский химик и физик.**

### 7.3. Уравнение состояния идеального газа (Менделеева-Клапейрона)

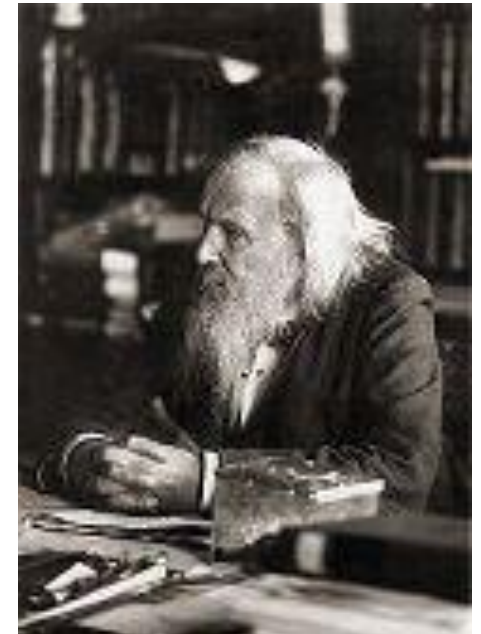
Уравнением состояния термодинамической системы называется уравнение, которое связывает давление  $p$ , объем  $V$  и температуру  $T$ :

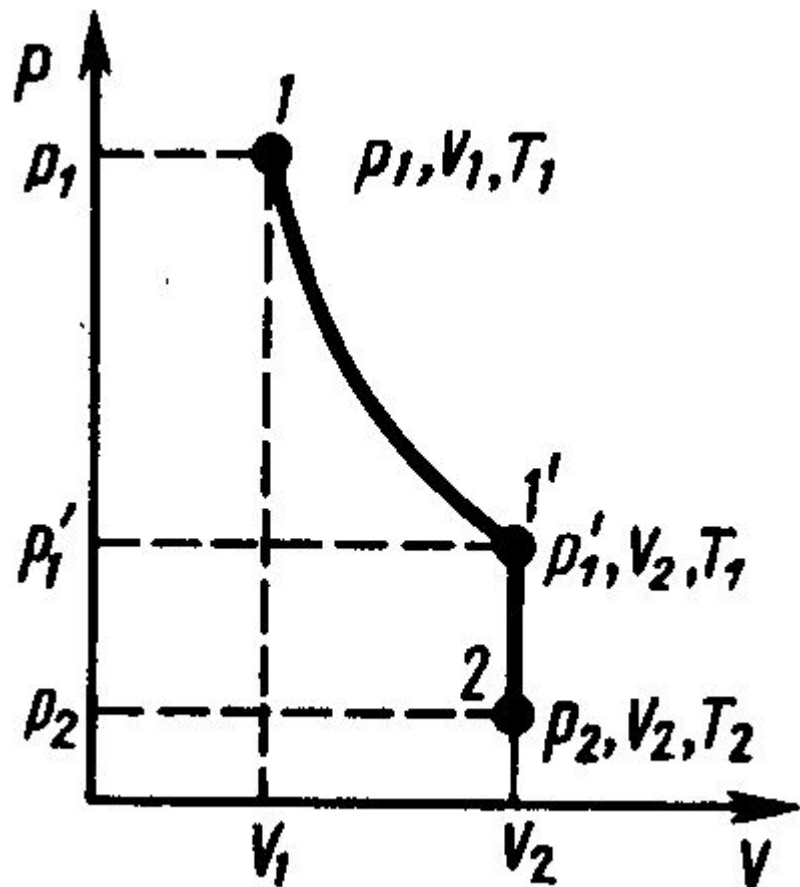
$$f(p, V, T) = 0.$$



Французский физик  
и инженер Бенуа  
Клапейрон  
(1799—1864).

Русский ученый  
Дмитрий Иванович  
Менделеев  
(1834—1907)





Пусть некоторая масса газа занимает объем  $V_1$ , имеет давление  $p_1$  и находится при температуре  $T_1$ .

Эта же масса газа в другом произвольном состоянии характеризуется параметрами  $p_2, V_2, T_2$ .

Переход из состояния  $1$  в состояние  $2$  осуществляется в виде двух процессов:  
 1) изотермического (изотерма  $1-1'$ ),  
 2) изохорного (изохора  $1'-2$ ).

В соответствии с законами Бойля — Мариотта и Гей-Люссака запишем:

$$p_1 V_1 = p_1' V_2, \quad \frac{p_1'}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Исключив из уравнений  $p_1'$  получим:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad \frac{pV}{T} = B = \text{const}$$

— уравнением Клапейрона, в котором  $B$  — газовая постоянная, различная для разных газов.



Менделеев объединил уравнение Клапейрона с законом Авогадро.

Согласно закону Авогадро, при одинаковых  $p$  и  $T$  моли всех газов занимают одинаковый молярный объем  $V_m$ , поэтому постоянная  $B$  будет одинаковой для всех газов.

Эта общая для всех газов постоянная обозначается  $R$  и называется молярной газовой постоянной:

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

$$pV_m = RT$$

- уравнение состояния идеального газа или уравнение Менделеева-Клапейрона для моля газа.

Уравнение Клапейрона — Менделеева для газа массой  $m$ :

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT, \quad \nu = \frac{m}{M} \quad \text{— количество вещества.}$$

Вводя постоянную Больцмана:  $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$

уравнение состояния можно записать в виде:

$$p = \frac{RT}{V_m} = \frac{kN_A T}{V_m} = nkT.$$

где  $N_A/V_m = n$  — концентрация молекул (число молекул в единице объема).

В результате можно сделать выводы:

1. Давление идеального газа при данной температуре прямо пропорционально концентрации его молекул (или плотности газа).
2. При одинаковых температуре и давлении все газы содержат в единице объема одинаковое число молекул.

Число молекул, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$  газа при *нормальных условиях*, называется числом Лошмидта:

$$N_L = \frac{p_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \quad -3$$

Иоганн Лошмидт (1821-1895) — австрийский физик и химик, член Австрийской академии наук.



## 7.4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

Пусть в сосуде объемом  $V$  находится идеальный газ массой  $m$  с числом молекул  $N$  каждая из которых имеет массу  $m_0$  и скорость  $v$ . Концентрация молекул в газе  $n=N/V$ .

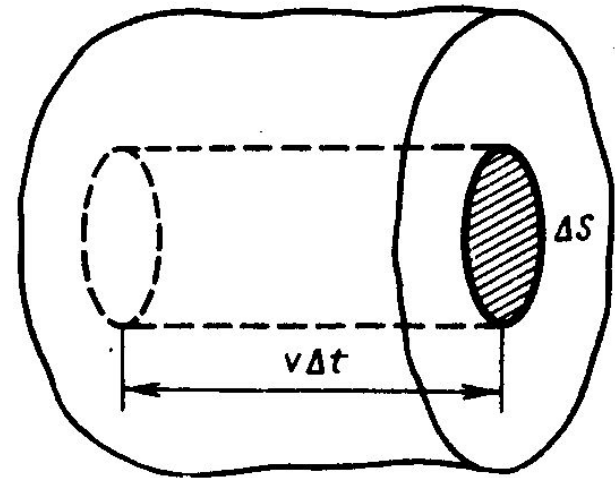
Выделим на стенке сосуда некоторую элементарную площадку  $\Delta S$  и вычислим давление, оказываемое на эту площадку.

При каждом соударении молекула, движущаяся перпендикулярно площадке, передает ей импульс:

$$m_0 v - (-m_0 v) = 2m_0 v,$$

$m_0$  — масса молекулы,

$v$  — ее скорость.



За время  $dt$  площадке  $dS$  передается импульс  $dP$ .  
Тогда давление газа, оказываемое на стенку сосуда, будет равно:

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta t \Delta S}.$$

Хаотическое движение молекул происходит вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений. Вдоль каждого из них движется  $1/3$  молекул.

Половина молекул  $1/6$  движется вдоль данного направления в одну сторону, половина — в противоположную.

Тогда число ударов молекул, движущихся в заданном направлении, о площадку  $\Delta S$  будет  $1/6 n \Delta S v \Delta t$ .

При столкновении с площадкой эти молекулы передадут ей импульс:

$$\Delta P = 2m_0 v \cdot \frac{1}{6} n \Delta S v \Delta t = \frac{1}{3} n m_0 v^2 \Delta S \Delta t.$$

Давление газа, оказываемое им на стенку сосуда:

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta t \Delta S} = \frac{1}{3} n m_0 v^2.$$

Если газ в объеме  $V$  содержит  $N$  молекул, движущихся со скоростями  $v_1, v_2, \dots, v_N$ , то целесообразно рассматривать среднюю квадратную скорость:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}.$$

Тогда основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов примет вид:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v \rangle^2.$$

Другие формы этого уравнения :

1. Учитывая, что  $n = N / V$ , получим

$$pV = \frac{1}{3} Nm_{0B} \langle v \rangle^2 = \frac{2}{3} N \frac{m_{0B} \langle v \rangle^2}{2} = \frac{2}{3} E..$$

2. Так как масса газа  $m = Nm_0$ , то уравнение можно переписать в виде:

$$pV = \frac{1}{3} m \langle v_{KB} \rangle^2 .$$

3. Для одного моля газа  $m = M$  ( $M$  — молярная масса):

$$pV_m = \frac{1}{3} M \langle v_{KB} \rangle^2 .$$

Используя уравнение Клапейрона — Менделеева получим:

$$RT = \frac{1}{3} M \langle v_{\text{KB}} \rangle^2, \quad \langle v_{\text{KB}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Так как  $M = m_0 N_A$ ,

$m_0$  — масса одной молекулы,

$N_A$  — постоянная Авогадро, то:

$$\langle v_{\text{KB}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{n_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

$k = R/N_A$  — постоянная Больцмана.



Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа:

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{E}{N} = \frac{m_{\text{мб}} \langle v \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

При  $T=0$   $\langle \varepsilon_0 \rangle = 0$ , т. е. при  $0$   $K$  прекращается поступательное движение молекул газа, а следовательно, его давление равно нулю.

**Вывод:** термодинамическая температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа/