

## *Абсолютна температура та її молекулярно-кінетичне обґрунтування*

### *1<sup>0</sup>. Температура, як міра середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул*

В Міжнародній системі одиниць вживається *абсолютна температурна шкала (Кельвіна)*, в якій *одиницею температури слугує кельвін (рівний градусу Цельсія)* і, на основі газових законів, в якості найнижчої температури вводиться *абсолютний нуль температури – нуль кельвінів (0 K)*, якому відповідає температура  $T_0$  рівна мінус 273,15 °С.

Тобто, температура по Кельвіну більша температури по Цельсію приблизно на 273 одиниці.

За дослідною формулою температурного розширення ідеального газу від 0°С до  $t^0$  С (закон Гей-Люссака)

$$V = V_0 (1 + \alpha t^0)..$$

Врахувавши що  $1 + \alpha t^0 = 1 + \alpha (T - 273) = \alpha T = \frac{T}{T_0}$ , формулу можна записати через абсолютну температуру,

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}.$$

З основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ)

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_k,$$

підставивши  $n = \frac{N}{V}$ , отримаємо

$$pV = \frac{2}{3} N \bar{\epsilon}_k.$$

З цієї форми рівняння МКТ також видно, що при сталості кількості речовини та тиску

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\frac{2}{3} \bar{\epsilon}_k}{\frac{2}{3} \bar{\epsilon}_{k0}}.$$

Порівнявши останній вираз з виразом експериментального закону Гей-Люссака, можна прийти до висновку про пропорційність абсолютної температури та середньої кінетичної енергії руху мікрочастинок.

Зручно прийняти

$$\frac{2}{3} \bar{\epsilon}_k = kT \text{ ( формула Больцмана ),}$$

де  $k$  називається *сталю Більцмана*.

Формула Більцмана означає *температуру, як міру середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул*.

## 2<sup>0</sup>. Запис основного рівняння МКТ через абсолютну температуру. Визначення сталої Більцмана

Стала Більцмана може бути виміряною на основі рівняння МКТ, записаного через абсолютну температуру.

Підставивши формулу Більцмана в попередню форму рівняння МКТ ( $p = \frac{2}{3} n \overline{\epsilon_k}$ ),

отримаємо

$$p = n k T,$$
$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{M0}}.$$

Записавши останнє рівняння для нормального стану моля газу (при нормальному атмосферному тискові  $p_0 = 101\,325 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па}$ , та температурі  $273 \text{ К}$ ) матимемо

$$k = \frac{p_0 V_{M0}}{N_A} T_0.$$

Врахувавши, що нормальний об'єм моля становить  $22,4 \text{ л} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , обчислимо

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Пропорційність тиску ідеального газу абсолютній температурі показує, що *абсолютний нуль* – це температура, при якій тиск ідеального газу рівний нулю. Що стосується руху молекул при цій температурі, то можна лише стверджувати про рівність нулю середньої кінетичної енергії їх поступального руху. Тобто, внутрішньомолекулярні рухи та, так звані «нульові» коливання зберігаються.

Легко впевнитись, що є Формою *рівняння стану газу (Клапейрона-Менделєєва)* запису основного рівняння МКТ.

Дійсно

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT = \frac{\nu N_A kT}{V} = \frac{m}{M} \frac{N_A kT}{V}.$$

Введемо *універсальну газову сталу*  $R = kN_A$

Обчисливши, маємо

$$R = 8,31 \text{ Дж/моль.К}$$

Рівняння стану ідеального газу набуде вигляду

$$pV = \nu RT.$$

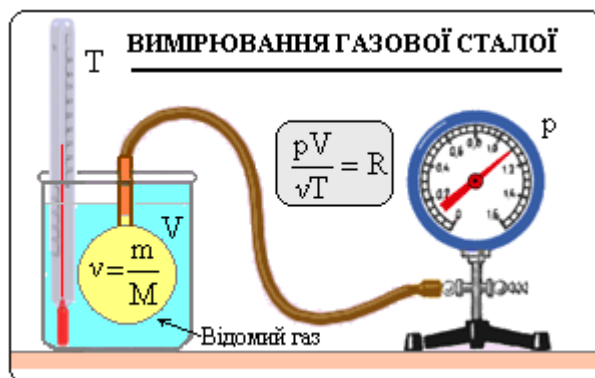
Це рівняння виражає **об'єднаний газовий закон**, згідно якому добуток тиску газу на його об'єм розділений на кількість речовини та абсолютну температуру є універсальною газовою сталою, (тобто однаковою для всіх газів)

$$\frac{pV}{\nu T} = R.$$

Останній запис підказує, як виміряти універсальну газову сталу.

Вимірявши тиск, об'єм, температуру даної маси газу, матимемо

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



### Приклади

1. Молекула азоту зі швидкістю  $v = 600 \text{ м/с}$  пружно вдаряється об перпендикулярну стінку посудини. Знати імпульс сили  $F \Delta t$  переданий стінці молекулою.

Відповідь.  $F \Delta t = 2m_0v = 5,6 \cdot 10^{-23} \text{ Нс}.$

2. На пласку поверхню у вакуумі напилюється шар срібла. Пучок атомів срібла падає на поверхню перпендикулярно їй, всі атоми срібла прилипають до поверхні. Швидкість атомів у пучку  $v = 400 \text{ м/с}$ , концентрація  $n = 5,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ . Визначити тиск атомів срібла на поверхню. Молярна маса срібла  $M = 107,9 \text{ кг/кмоль}$ .

Відповідь.  $p = n \frac{M}{N_A} v^2 = 1,434 \cdot 10^{-4} \text{ Па}.$

Розв'язання. Імпульс сили тиску  $F$  на стінку площею  $S$  за час  $\Delta t$  рівний сумі імпульсів переданих стінці всіма атомами в об'ємі  $S \nu \Delta t$ .

$F \Delta t = n S \nu \Delta t m_0 v$ . Звідси  $p = n m_0 v^2$ .  $p = n \frac{M}{N_A} v^2 = 1,434 \cdot 10^{-4} \text{ Нс}.$

3. В повітрі при температурі  $T = 300 \text{ К}$  хаотично рухаються сферичні пилинки радіусом  $r = 1 \text{ мкм}$ , густиною  $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$ . Знайти середню квадратичну швидкість  $\langle v \rangle$  хаотичного руху пилинок.

Відповідь.  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{9kT}{4\pi\rho r^3}}$ ;  $\langle v \rangle = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}.$

Розв'язання. Вважаючи пилінку браунівської частинкою, за формулою Больцмана матимемо

$$\frac{m \langle v \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \text{ де } m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \text{ маса пилинки.}$$

З цього  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{9kT}{4\pi\rho r^3}}.$

4. Скільки кіломолей газу міститься в об'ємі  $V = 2 \text{ л}$  при тиску  $p = 10^6 \text{ Па}$ , якщо середня енергія однієї молекули  $\epsilon = 5 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}$ ?

Відповідь.  $v = \frac{3pV}{2N_A \bar{\epsilon}_k}$ ;  $v = 0,1$  моль.

Розв'язання. За рівнянням молекулярно-кінетичної теорії

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_k, \text{ де } n = \frac{N}{V} = \frac{v N_A}{V}, \text{ звідки } v = \frac{3pV}{2N_A \bar{\epsilon}_k}.$$

5. Яка кількість молекул знаходиться в кімнаті об'ємом  $80 \text{ м}^3$  при температурі  $17^\circ\text{C}$  і тиску  $750 \text{ мм рт. ст.}$ ?

Відповідь.  $N = \frac{pV}{kT}$ ,  $N = 2 \cdot 10^{27}$ .

### Завдання

1. В результаті пружного співударяння з перпендикулярною до напрямку руху стінкою молекула азоту передає стінці імпульс  $F\Delta t = 5,6 \cdot 10^{-23} \text{ Нс}$ . Яку швидкість мала молекула ?

Відповідь.  $v = 600 \text{ м/с}$ .

2. Азот масою  $m = 2,5 \text{ кг}$  міститься в балоні об'ємом  $V = 3,2 \text{ м}^3$  під тиском  $p = 15 \text{ Н/см}^2$ . Знайти середню квадратичну швидкість  $\langle v \rangle$  молекул азоту.

Відповідь.  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3pV}{m}} = 7,58 \cdot 10^2 \text{ м/с}$ .

3. Знайти загальну енергію  $W_k$  теплового руху молекул водню при  $t = 0^\circ\text{C}$ , якщо маса водню  $m = 1 \text{ мг}$ .

Відповідь.  $W_k = \frac{2,5 m}{M} RT = 4,7 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ .

4. В балоні об'ємом  $V = 2 \text{ л}$  знаходяться  $N = 10^{26}$  молекул кисню. Який тиск в балоні, якщо середня квадратична швидкість молекул  $500 \text{ м/с}$  ?

Відповідь.  $p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} \frac{M}{N_A} \langle v \rangle^2 = 1,33 \cdot 10^6 \text{ Па}$

5. Густина газу  $\rho = 6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ . Середня квадратична швидкість молекул газу  $\langle v \rangle = 500 \text{ м/с}$ . Знайти тиск газу.

Відповідь.  $p = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle^2 = 5 \cdot 10^3 \text{ Па}$