

Основи молекулярної фізики та термодинаміки.

Тема 1. Молекулярно-кінетична теорія ідеальних газів.

Маса і розміри молекул. Число Авогадро. Закон Авогадро. Концентрація молекул. Тиск газу. Закон Дальтона. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеальних газів.

Тема 2. Ідеальний газ. Закони ідеального газу.

Ідеальний газ. Рівняння Клапейрона – Менделєєва. Газові закони. Ізопроцеси та їх рівняння.

Тема 3. Основи термодинаміки.

Внутрішня енергія ідеального газу. Кількість теплоти. Теплоємність газу. Молярна і питома теплоємності. I-й закон термодинаміки та його застосування до ізопроцесів. Адіабатичний процес. Рівняння Пуассона. Робота газу в різних процесах. Кругові процеси. Оборотні і необоротні процеси. II-й закон термодинаміки.. Цикл Карно. Максимальний ККД теплової машини.

Тема 4. Явища перенесення.

Середнє число зіткнень і середня довжина вільного пробігу молекул. Загальне уявлення про явища перенесу в термодинамічна нерівно важних системах. Явище теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності. Дифузія та коефіцієнт дифузії. Внутрішнє тертя. Коефіцієнт внутрішнього тертя та його зв'язок з коефіцієнтами дифузії і теплопровідності.

Тема 1. Молекулярно-кінетична теорія ідеальних газів.

Молекулярна фізика.

У молекулярної фізики розглядається рух найменших частинок речовини – атомів і молекул, який підпорядковується статистичним законам. Атомом називається найменша частинка хімічного елементу. Молекулою називається найменша електрично - нейтральна частинка речовини, яка зберігає його хімічні властивості.

Молекулярна фізика вивчає властивості тіл, встановлюючи зв'язок макроскопічних параметрів з фізичними характеристиками мікрочастинок, з яких складається речовина.

К макропараметрам відносять масу речовини, тиск, об'єм і температуру.

К мікропараметрам – масу молекули, швидкість, розміри, імпульс, енергію молекули та інші.

- Відносно молекулярна маса – відношення маси молекули m_0 к $\frac{1}{12}$ маси атома вуглецю.

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_c}.$$

Відносно молекулярна маса – безрозмірна величина.

- *Молярна маса* - маса одного моля. Молярна маса дорівнює відношенню маси речовини до кількості молів в ньому.

$$\mu = \frac{m}{\nu} \quad [\mu] = \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$$

Об'єм одного моля $V_{\text{моля}} = \frac{\mu}{\rho}$.

- *Число Авогадро* - $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ показує, що в одному молі довільної речовини міститься $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул.

Закон Авогадро: при однакових температурах та тиску, молі будь-яких газів займають однакові об'єми. За нормальних умов ($T_0 = 273\text{К}$, $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$) об'єм моля будь-якого газу дорівнює 22,4л.

- *Кількість молів речовини*

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{N \cdot m_{\text{мол}}}{N_A \cdot m_{\text{мол}}} = \frac{m}{\mu}, \quad [\nu] = \text{МОЛЬ}$$

де N - кількість молекул речовини, m - маса речовини, $m_{\text{мол}}$ - маса молекули.

- *Масу одної молекули* можна знайти, як відношення молярної маси до числа молекул в одному молі, тобто до числа Авогадро.

$$m_0 = \frac{\mu}{N_A} \quad [m_0] = \text{КГ}$$

Також масу молекули можна знайти за формулами:

$$m_0 = \frac{m}{N} \quad m_0 = \frac{\rho}{n}$$

де m - маса речовини, N - число молекул, ρ - густина речовини, n - концентрація молекул (тобто число молекул в одиниці об'єму газу $n = \frac{N}{V}$).

- *Температура* –це міра середньої кінетичної енергії теплового руху молекул. В міжнародній системі одиниць SI за одиницю температури прийнято кельвін (К).

Один кельвін – це ціна поділки температурної шкали, в якій за початок відліку прийнято абсолютний нуль або 0 К. Шкала Кельвіна не має від'ємних температур.

В побуті для вимірювання температури використовують *шкалу Цельсія*. Шкала Цельсія має додатні та від'ємні значення температур.

Зв'язок між шкалами Цельсія і Кельвіна

$$T(\text{К}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$$

Зміна температури на обох шкалах однакова: $\Delta T = \Delta t^{\circ}\text{C}$.

Тиск газу –це сумарна сила ударів молекул газу о одиницю площадки поверхні, в якій знаходиться газ.

$$P = \frac{F}{S},$$

де F - сила тиску газу, S - площа поверхні посудини.

Якщо в сосуді знаходиться декілька газів, то кожний газ займає об'єм, який дорівнює об'єму посудині, і всі гази мають однакову температуру.

Закон Дальтона: загальний тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків складових частин, тобто тисків, які б мала кожна частина суміші, займаючи весь об'єм.

$$P = \sum_{i=1}^k P_i,$$

де P_i - парціальний тиск i - компоненти суміші, k - число компонентів.

Молярна маса суміші газів

$$\mu = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{\nu_i}$$

де m_i - маса i - компоненти суміші, $\nu_i = \frac{m_i}{\mu_i}$ - кількість молів i - компоненти суміші.

Ідеальний газ – це газ, молекули якого є матеріальними точками, а їх взаємодія носить характер абсолютно пружного удару.

Повітря за нормальних умовах ($T_0 = 273K$, $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 Pa$) можна приблизно вважати ідеальним газом.

Основне рівняння кінетичної теорії ідеального газу встановлює зв'язок тиску ідеального газу від маси його молекул, концентрації і їх середньої квадратичної швидкості:

$$P = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2, \quad [P] = Pa$$

де P - тиск газу, m_0 - маса молекули, n - концентрація молекул, \bar{v} - середня швидкість молекули,

або $P = \frac{2}{3} n \bar{E}$, де \bar{E} - середня кінетична енергія поступального руху молекули.

Середня енергія молекули: $\bar{E} = \frac{i}{2} kT$, $[E] = Дж$

де $i = i_{\text{ноcm}} + i_{\text{об}} + 2i_{\text{кол}}$ - число ступенів свободи молекули,

Також основне рівняння МКТ зв'язує один з параметрів стану системи - тиск з середнім значенням кінетичної енергії поступального руху молекул:

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2}{3} n \frac{mv^2}{2} = nkT, \quad \text{звідки } \bar{E} = \frac{3}{2} kT - \text{кінетична енергія одноатомного}$$

ідеального газу, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ - стала Больцмана, T - термодинамічна температура газу.

Закон Больцмана про рівномірний розподіл енергії за ступенями свободи молекул - на кожен поступальний і обертальний ступінь свободи молекули в

середньому припадає кінетична енергія $\frac{1}{2} kT$, а на кожен коливальний ступінь – в середньому kT .

Таким чином середня кінетична енергія молекули: $\bar{E} = i \frac{kT}{2}$

$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{об}} + 2i_{\text{кол}}$ - кількість ступенів свободи поступального, обертального та коливального рухів складних молекул.

Рівняння, яке встановлює залежність між параметрами стану даної маси ідеального газу - його тиском, об'ємом і температурою – називається **рівняння стану ідеального газу** (рівняння Менделєєва - Клапейрона).

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \text{ де } R = k \cdot N_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} - \text{універсальна газова стала.}$$

Рівняння стану ідеального газу записав Д.І. Менделєєв, з об'єднаного газового закону який знайшов Б. Клапейрон.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Ізопроецес – це рівноважний процес, в якому один з параметрів залишається сталим.

Для ідеального газу справедливі такі закони:

1. Закон Бойля- Маріотта: при постійній температурі ($T = \text{const}$) добуток тиску даної маси ідеального газу і його об'єму є величина стала. Це ізотерічний процес.

$$PV = \text{const}$$

2. Закон Гей-Люссака: при постійному тиску ($P = \text{const}$) об'єм даної маси ідеального газу прямо пропорційний його абсолютній температурі. Це ізобарний процес.

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

3. Закон Шарля: при постійному об'ємі ($V = \text{const}$) тиск даної маси ідеального газу прямо пропорційний його абсолютній температурі. Це ізохорний процес.

$$\frac{P}{T} = \text{const}$$

Середня квадратична, середня арифметична і найбільш імовірна швидкості молекул

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} - \text{середньоквадратичне значення швидкості,}$$

$$\langle v_{\text{ар}} \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} - \text{середньоарифметичне значення швидкості,}$$

$$\langle v_i \rangle = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} - \text{найбільш імовірне значення швидкості.}$$

Порівняння цих швидкостей дає таке їх співвідношення:

$$\langle v_i \rangle : \langle v_{ap} \rangle : \langle v_{кс} \rangle = \sqrt{2} : \sqrt{\frac{8}{\pi}} : \sqrt{3} = 1,41 : 1,6 : 1,73.$$

Тема 2. Основи термодинаміки.

Перше начало термодинаміки

Термодинаміка вивчає загальні властивості макроскопічних систем, що знаходяться в стані термодинамічної рівноваги і процеси переходів між цими станами. В термодинаміці розглядаються процеси переходу теплової енергії від одних тіл до інших. Кожне тіло має свою внутрішню енергію. Внутрішня енергія ідеального газу дорівнює сумі кінетичних енергій всіх молекул, оскільки взаємодія між молекулами відсутня.

Для одного моля газу.

$$U_{\mu} = \frac{i}{2} k T N_A = \frac{i}{2} R T, \quad [U] = \text{Дж};$$

Для будь-якої маси газу:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} R T,$$

Збільшення внутрішньої енергії термодинамічної системи може бути спричинене передачею їй деякої кількості теплоти Q , або виконання над нею певної роботи A . Тобто енергію можна передавати в формі роботи і теплоти.

Кількість теплоти - це міра зміни внутрішньої енергії, яка відбувається без здійснення механічної роботи. Кількість теплоти скалярна величина. Одиниця вимірювання її в SI – джоуль (Дж). При нагріванні, плавленні та пароутворенні тіло отримує кількість теплоти, а при охолодженні, кристалізації та конденсації віддає тепло в навколишнє середовище.

Кількість теплоти, що йде на нагрівання системи, звичайно виражається через теплоємність системи

$$\delta Q = C_{\text{тіла}} dT.$$

Теплоємністю тіла ($C_{\text{тіла}}$) називається величина, що дорівнює кількості теплоти, яку треба передати тілу, щоб збільшити його температуру на 1К.

$$C_{\text{тіла}} = \frac{\delta Q}{dT}, \quad [C_{\text{тіла}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Питома теплоємність речовини – кількість теплоти, що необхідна для нагрівання 1кг речовини на 1К.

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT}, \quad [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Молярна теплоємність – кількість теплоти, що необхідна для нагрівання одного моля речовини на 1К.

$$C_{\mu} = \frac{dQ}{\nu dT}, \quad [C_{\mu}] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Між питомою (c) та молярною (C) теплоємностями існує співвідношення:

$$c = \frac{C}{\mu}, \text{ де } \mu - \text{ молярна маса речовини.}$$

Найбільший інтерес являє собою теплоємність, виміряна при сталому тиску C_p та при сталому об'ємі C_v . Молярні теплоємності при сталому тиску та при сталому об'ємі зв'язана між собою (рівнянням Майєра). Воно показує, що молярна теплоємність при постійному тиску більша теплоємності при постійному об'ємі на величину R - універсальної газової сталої.

Використавши рівняння: $C_v = \frac{i}{2}R$ і $C_p = C_v + R$,

Запишемо C_p у вигляді: $C_p = \frac{i+2}{2}R$, де i - число ступенів свободи молекули.

В основі термодинаміки лежить один з найбільш загальних законів природи – закон збереження енергії. В термодинаміці цей закон на має назву **першого закону термодинаміки**: *кількість тепла, передана системі, іде на збільшення внутрішньої енергії системи та на здійснення системою роботи над зовнішніми тілами.*

$$\delta Q = dU + \delta A,$$

де δQ - кількість теплоти, що підводиться до термодинамічної системи, dU - зміна внутрішньої енергії системи, δA - робота, виконана системою проти зовнішніх сил. Кількість енергії, що передала система зовнішнім тілам при силовій взаємодії між ними, називається роботою, яку виконала система. Для виконання роботи над газом необхідно змінити його об'єм. Зв'язок між роботою, що виконана газом, та зміною його об'єму, для будь якого процесу, задається співвідношенням: $\delta A = PdV$

Застосування першого закону термодинаміки до найпростіших термодинамічних процесів.

- Ізохорний процес ($V = const$)

Все підведене при постійному об'ємі тепло іде на збільшення внутрішньої енергії газу, тобто на нагрівання всієї маси газу. Робота в ізохорному процесі не виконується, тобто $\delta A = 0$

$$dQ = dU = \frac{m}{\mu} C_v dT; \quad \Delta U = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T.$$

- Ізобарний процес ($P = const$).

В ізобарному процесі при передачі газу масою m кількості теплоти δQ , його внутрішня енергія виросте на величину dU і газ виконує роботу A .

Перший закон термодинаміки має вигляд:

$$\delta Q = dU = \frac{m}{\mu} C_v dT + PdV,$$

$$dU = \frac{m}{\mu} C_v dT \quad \text{або} \quad \Delta U = \frac{m}{\mu} C_v (T_2 - T_1)$$

Робота, виконана газом при ізобарному процесі.

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P(V_2 - V_1) \quad \text{або} \quad A = \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1)$$

- Ізотермічний процес ($T = const$)

В ізотермічному процесі внутрішня енергія не змінюється і все підведене тепло іде на виконання роботи.

Перший закон термодинаміки має вигляд:

$$\delta Q = PdV$$

Робота при ізотермічному розширенні маси газу.

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

- Адіабатний процес – це процес, що притікає без теплообміну із зовнішнім середовищем. $\delta Q = 0$. Для будь-якої маси газу, перший закон термодинаміки має вигляд

$$\delta Q = \frac{m}{\mu} C_v dT + PdV = 0$$

Інтегруючи цей вираз одержимо рівняння Пуассону, що зв'яже тиск та об'єм газу:

$$PV^\gamma = const, \quad \text{де} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i} \quad \text{- стала адиабати (коефіцієнт Пуассона).}$$

Для одноатомного, двоатомного і багатоатомного газів, відповідно $i = 3$, $\gamma = 1,67$; $i = 5$, $\gamma = 1,4$; $i = 6$, $\gamma = 1,33$.

Крім цього рівняння Пуассона можна записати у вигляді:

$$TV^{\gamma-1} = const, \quad T^\gamma P^{1-\gamma} = const, \quad \text{або} \quad T P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = const,$$

Робота при адіабатному процесі

$$A = \frac{RT_1}{\gamma-1} \frac{m}{\mu} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\lambda-1} \right) = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\lambda-1} \right), \quad \text{де} \quad P_1 V_1 = \frac{m}{\mu} RT_1$$

Другий закон термодинаміки

Неможливо виготовити вічний двигун другого роду – пристрій у якому все тепло отримане від нагрівника цілком перетворювалося б у механічну роботу.

Теплові двигуни - це пристрої, в яких тепла енергія перетворюється в механічну.

Основні частини теплового двигуна: нагрівник, робоче тіло та холодильник.

Робота A , яка здійснюється двигуном, дорівнює різниці кількості теплоти Q_1 , яку газ отримує від нагрівача, і кількості теплоти Q_2 , яку віддає холодильнику.

$$A = Q_1 - Q_2$$

Працездатність різних двигунів при однакових затратах теплової енергії характеризується їх коефіцієнтом корисної дії η .

Коефіцієнт корисної дії (ККД) теплового двигуна називається відношення роботи, до кількості теплоти, отриманої від нагрівача:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} 100\% \quad \text{або} \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\%$$

Цикл Карно – це цикл який складається з двох ізотерм та двох адіабат. Формула ККД циклу Карно, має вигляд:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\% ,$$

де T_1 - абсолютна температура нагрівника, T_2 - абсолютна температура холодильника.

Тема 3. Явища перенесення.

Середня довжина вільного пробігу молекул газу

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_0}$$

де n_0 - концентрація молекул, d - ефективний діаметр молекули.

Середня кількість зіткнень однієї молекули за одиницю часу.

$$z = \sqrt{2}\pi d^2 n_0 \langle v \rangle$$

Закон Фіка: маса газу m , перенесеного під час дифузії за час $\Delta\tau$ через плоску поверхню ΔS , розміщену перпендикулярно до осі x , при градієнті густини вздовж цієї осі $\frac{\Delta\rho}{\Delta x}$:

$$m = -D \frac{\Delta\rho}{\Delta x} \Delta S \Delta\tau ,$$

де $D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$ - коефіцієнт дифузії.

Закон Ньютона: Сила внутрішнього тертя F між двома шарами газу площею ΔS , що рухається з різними швидкостями:

$$F = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta S, \quad [\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$$

де $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$ - коефіцієнт динамічної в'язкості, $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ - градієнт швидкості течії газу в перпендикулярному до ΔS напрямі.

Кількість теплоти, яка переноситься внаслідок теплопровідності за час $\Delta\tau$ через плоску поверхню ΔS при градієнті температури $\frac{\Delta T}{\Delta x}$, перпендикулярному до ΔS :

$$Q = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta\tau, \quad [\chi] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

де $\chi = \frac{1}{3} \rho c_v \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$ - коефіцієнт теплопровідності, c_v - питома теплоємність газу при сталому об'ємі.