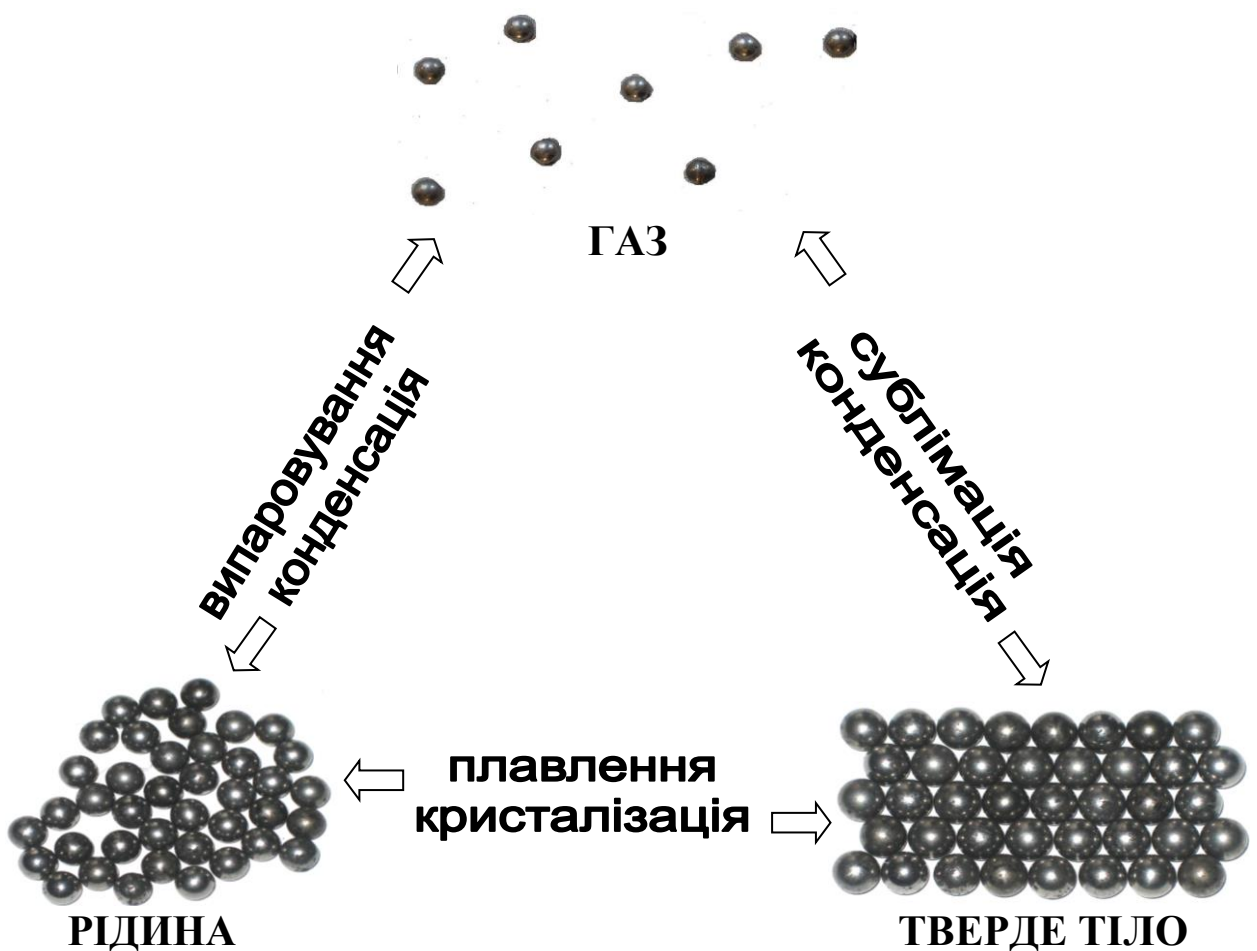


МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА



Молекулярна фізика і термодинаміка – це розділи фізики, у яких вивчають властивості систем, які складаються з великої кількості дрібних частинок (атомів і молекул)

6. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

Молекулярна фізика – це розділ фізики, у якому вивчають властивості речовини, з урахуванням характеристик дрібних частинок (атомів і молекул).

Нові слова

<i>українська</i>	<i>англійська</i>	<i>французька</i>
безладний	chaotic, random	desordonné
броунівський рух	brownian movement	le mouvement brownien
дискретний	discrete	discontinu
дифузія	diffusion	diffusion
запах	smell	l'odeur
інтенсивність	intensity	l'intensité
випаровування	evaporation	la vapeur
коливальний	oscillatory	oscillatoire
концентрація	concentration	la concentration
моль	mol	mole
молярна маса	molaric weight	la masse moleculaire
молярний об'єм	molar volume	le volume moleculaire
порушити-порушувати	to breake	violier, casser
наукова теорія	the scientific theory	la théorie scientifique
однорідний	homogeneous	homogéne
проникнення	penetration	la pénétration
розширення	expansion	l'élargissement, dilatation
сучасний	modern	moderne
здатність	ability, capacity	la capacité
зчеплення	coupling	l'enchainement, accollement

6.1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії (МКТ)

Молекулярно-кінетична теорія (МКТ) – це наукова теорія, що пояснює фізичні властивості речовини на основі молекулярної будови, взаємодії і руху дрібних частинок (молекул і атомів).

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

- всі тіла складаються з дрібних частинок (молекул і атомів);
- частинки перебувають у безперервному хаотичному русі;
- між частинками будь-якої речовини діють сили взаємодії.

Атомом називається найменша частинка даного хімічного елемента. Молекулою називається найменша стійка частинка даної речовини, що має його основні хімічні властивості. Молекула може складатися з одного або декількох атомів.

Кожна речовина характеризується молярною масою M , що визначається за допомогою таблиці хімічних елементів Менделєєва.

Наприклад:

$Fe: M = 64 \times 10^{-3}$ кг/моль; $CO_2: M = 44 \times 10^{-3}$ кг/моль
 $N_2: M = 28 \times 10^{-3}$ кг/моль; $H_2O: M = 18 \times 10^{-3}$ кг/моль.

Одиницею кількості речовини є моль. **Моль – це кількість однорідної речовини, що містить стільки ж атомів або молекул, скільки утримується атомів в 0,012 кг вуглецю.** Число атомів або молекул, що містить один моль речовини називається числом Авогадро $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Кількість речовини (число молей ν) можна визначити за формулою:

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_\mu} = \frac{N}{N_A}, \quad (6.1)$$

де m , V – маса і об'єм речовини, V_μ – молярний об'єм, M – молярна маса, N – число атомів або молекул, N_A – число Авогадро.

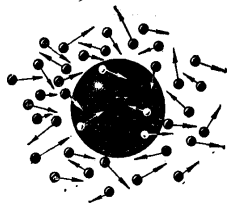


Рис. 6.1 **рідині (або газі) під дією ударів молекул** (рис. 6.1).

Експериментальним доказом існування молекул рідини або газу і доказом хаотичного теплового руху є броунівський рух. **Броунівський рух – це безперервний хаотичний рух твердих часток у рідині (або газі) під дією ударів молекул** (рис. 6.1).
Ще одним доказом руху частинок речовини є дифузія. **Дифузія – це фізичне явище, при якому молекули (або атоми) однієї речовини проходять між молекулами (або атомами) іншої речовини і навпаки (взаємна дифузія).** Дифузія спостерігається в газоподібних, рідких і твердих речовинах. Дифузія зростає з підвищенням температури.

Середній розмір атомів (діаметр) дуже малий: $\langle d \rangle \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м. Сили $F(r)$ взаємодії між частинками виявляються на дуже малих r відстанях, у порівнянні з лінійними розмірами атомів.

Міжмолекулярні сили короткодіючі – вони діють між сусідніми молекулами і швидко зменшуються зі збільшенням відстані між молекулами.

Рух молекул газів, рідин і твердих тіл

У газах середня відстань між молекулами набагато більша, ніж розміри молекул газу. Взаємного притягання між молекулами газу практично немає. Молекули газу рухаються рівномірно і прямолінійно від зіткнення до зіткнення з іншими молекулами. При ударі змінюється напрямок і величина швидкості. Якщо молекули газу складаються з декількох атомів, то при зіткненні вони здобувають ще й обертальний рух. Таким чином *тепловий рух молекул газу є поступальним і обертальним*.

У рідинах молекули якийсь час перебувають у рівновазі, де вони коливаються, а потім переходять у нове положення рівноваги і т.д. Отже, тепловий рух молекул рідин в основному *коливальний*, а також *поступальний*.

У твердих тілах тепловий рух молекул – *коливальний*, але інколи молекули у твердих тілах можуть переходити з одного положення рівноваги в інше.

6.2. Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) ідеального газу

Молекули реального газу мають кінетичну і потенціальну енергію. У деяких випадках потенціальною енергією молекул зневажають.

Ідеальний газ – модель газу, у якій не враховують розміри молекул і їхню взаємодію на відстані. Реальні гази при не дуже низьких температурах і малих тисках за своїми властивостями близькі до ідеального газу.

Молекули газу рухаються хаотично. Стикаючись зі стінками посудини, молекули газу створюють тиск p :

$$p = \frac{F}{S}, \quad (6.1)$$

де F – сумарна сила ударів усіх молекул об стінки посудини, а S – площа поверхні посудини (балона).

Третя частина молекул ідеального газу рухається уздовж однієї із трьох координатних осей. З основних положень МКТ можна одержати основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу. **Основне рівняння МКТ ідеального газу пов'язує параметри стану термодинамічної системи (p, V) з характеристиками молекул:**

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_{кв}^2, \quad (6.2)$$

де N – число молекул в об'ємі V , m_0 – маса молекули, $v_{кв}$ – середня квадратична швидкість молекул. У рівнянні (6.2) відношення $N/V = n$ – концентрація молекул. З огляду на те, що середня кінетична енергія молекул газу $E_{кін} = \frac{m_0 v^2}{2}$, з рівняння (6.2) одержимо формулу тиску ідеального газу:

$$p = \frac{2}{3} n E_k, \quad (6.3)$$

де E_k – середня кінетична енергія молекул газу.

Експерименти показали, що в стані термодинамічної (теплової) рівноваги для будь-яких газів $\frac{pV}{N} = const$. Тоді:

$$\frac{pV}{N} = \frac{1}{3} m_0 v_{кв}^2. \quad (6.4)$$

Отже, відношення $\frac{pV}{N} = const$ характеризує стан теплової (термодинамічної) рівноваги. Розмірність цієї величини – Джоуль. Введемо новий параметр T – абсолютну температуру, тоді:

$$\frac{2}{3} n E_k = kT, \quad (6.5)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – стала Больцмана. З формули (6.5) видно, що середня кінетична енергія одноатомних молекул газу:

$$E_k = \frac{m v_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (6.6)$$

З формули (6.6) одержимо формулу для середньої квадратичної швидкості молекул ідеального газу:

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (6.7)$$

Фізичні процеси, які відбуваються при нагріванні або охолодженні тіл, зміні їхнього агрегатного стану, називають *теповими явищами*. Теплова (термодинамічна) рівновага системи характеризується *температурою*.

Температура – фізичний параметр, що характеризує тіла в стані теплової рівноваги. У стані теплової рівноваги температура всіх тіл однакова.

З формули (6.6) видно, що **абсолютна температура – це кількісна міра кінетичної енергії руху молекул (або атомів)**.

Для вимірювання температури застосовують прилад, що називається термометром.

У побуті для вимірювання температури використовують шкалу Цельсія – міжнародну практичну шкалу. Сота частина шкали Цельсія між 0°C і 100°C називається *градусом*. Порівнюючи температурні шкали, одержимо формулу:

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}, \quad (6.8)$$

де T – температура в градусах Кельвіна; $t^{\circ}\text{C}$ – температура в градусах Цельсія. На шкалі Кельвіна всі температури позитивні, тому що відлік температур ведеться від нуля – 0K .

Вправа 1. Випишіть нові слова в зошит і вивчіть їх.

Вправа 2. Дайте відповіді на запитання:

1. Сформулюйте основні положення МКТ.
2. Що таке атом і молекула?
3. Чому дорівнює молярна маса речовин: NH_4 ; HCl ; H_2SO_4 ?
4. Запишіть формулу для обчислення кількості речовини.
5. Що таке число Авогадро?

6. Як обчислити масу молекули?
7. Який рух називають броунівським?
8. Що називається дифузією?
9. Що називається ідеальним газом?
10. Запишіть формулу кінетичної енергії молекул газу.
11. Запишіть формули середньої кінетичної енергії молекул.
12. Що називається термодинамічною температурою?
13. Який зв'язок між температурами за шкалою Цельсія і за шкалою Кельвіна?
14. Запишіть основне рівняння МКТ.

Розв'яжіть задачі:

Задача 1. Чому дорівнює середня квадратична швидкість руху молекул газу, якщо маса газу $m = 6$ кг, а об'єм $V = 5$ м³ при тиску $p = 200$ кПа?

Відповідь: $v = 710$ м/с.

Задача 2. Знайдіть концентрацію n молекул кисню, якщо тиск його $p = 0,2$ МПа, а середня квадратична швидкість молекул $v = 700$ м/с.

Відповідь: $n = 2,3 \cdot 10^{25}$ м⁻³.

Задача 3. Знайдіть середню кінетичну енергію молекули одноатомного газу при тиску $p = 20$ кПа. Концентрація молекул газу при цьому тиску становить $n = 3 \cdot 10^{25}$ м⁻³.

Відповідь: $W = 10^{-21}$ Дж.

Задача 4. У скільки разів збільшується тиск p газу в результаті зменшення його об'єму V у три рази і збільшенні середньої кінетичної енергії $\langle E_k \rangle$ у два рази?

Відповідь: у шість разів.

Задача 5. Який тиск p азоту, якщо середня квадратична швидкість $\langle v_{кв} \rangle = 500$ м/с його молекул, а його щільність $\rho = 1,35$ кг/м³?

Відповідь: $p = 0,11$ МПа.

Задача 6. Яка середня квадратична швидкість руху молекул ідеального газу масою 6 кг. Об'єм газу = 5 м³, тиск $p = 200$ кПа.

Відповідь: $\langle v_{кв} \rangle = 710$ м/с.

6.3. Рівняння Менделєєва-Клапейрона

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона) зв'язує макроскопічні параметри термодинамічної системи. Виразимо тиск газу через концентрацію n :

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (6.9)$$

Запишемо тиск газу через концентрацію $n = N/V$, середню кінетичну енергію молекул ідеального газу і температуру:

$$p = \frac{2}{3} n E_k = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \cdot \frac{3}{2} kT, \quad (6.10)$$

де число молекул $N = \nu \cdot N_A$, число молів $\nu = m/M$. Тиск газу

$$p = \frac{\nu \cdot N_A kT}{V}. \quad (6.11)$$

Тут $N_A \cdot k = R$ – універсальна газова стала. Підставивши у формулу (6.1) універсальну газову сталу R , одержимо рівняння Менделєєва - Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (6.12)$$

Рівняння стану ідеального газу у вигляді формули (6.12) називається рівнянням Менделєєва-Клапейрона.

6.4. Ізопроееси у газах

Термодинамічною системою називається будь-яка фізична система, яка складається з великого числа атомів і молекул, які здійснюють неупорядкований тепловий рух і, взаємодіючи між собою, обмінюються енергією.

Будь-яка зміна в термодинамічній системі, яка пов'язана із зміною хоча б одного з термодинамічних параметрів (p , V , T) стану тіла системи, називається **термодинамічним процесом**.

Рівноважними називаються такі процеси, під час яких зміна стану системи відбувається дуже повільно і система проходить неперервний ряд нескінченно близьких рівноважних термодинамічних станів.

Ізопроцесами у газах називають термодинамічні процеси, які відбуваються при постійному значенні одного з параметрів стану системи (p , V , T). Розглянемо такі процеси.

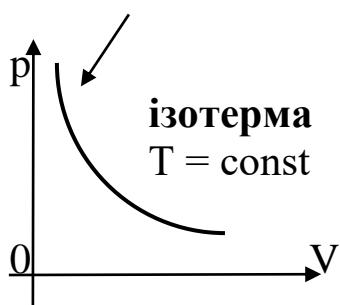


Рис. 6.2.

Ізотермічний процес у газах – це процес, що відбувається при постійній температурі $T = \text{const}$ (рис. 6.2). У цьому процесі параметри p і V змінюються обернено пропорційно

Закон Бойля – Маріотта: для даної маси газу (m) при постійній температурі (T) добуток тиску на об'єм є величина стала.

$$pV = \text{const}. \quad (6.13)$$

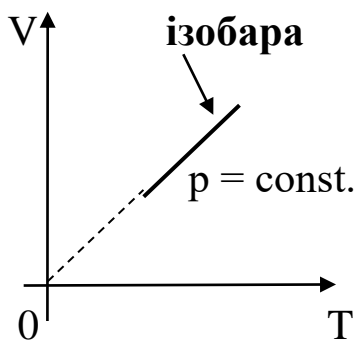


Рис. 6.3

Ізобаричний процес у газах – це процес, що відбувається при постійному тиску ($p = \text{const}$) (рис.6.3). У цьому процесі параметри V і T змінюються прямо пропорційно.

Закон Гей-Люссака: для даної маси газу при постійному тиску відношення об'єму до температури є величина стала.

$$\frac{V}{T} = \text{const}. \quad (6.14)$$

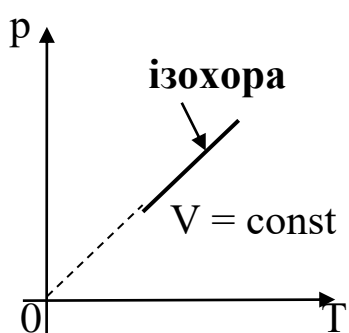


Рис.6.4

Ізохорний процес у газах – це процес, що відбувається при постійному об'ємі ($V = \text{const}$) (рис.6.4). У цьому процесі параметри p і T змінюються прямо пропорційно

Закон Шарля: для даної маси газу при постійному об'ємі відношення тиску до температури є величина стала

$$\frac{p}{T} = \text{const}. \quad (6.15)$$

На рис. 6.3 і 6.4 графіки починаються пунктирними лініями, тому що майже всі реальні гази при низьких температурах,

близьких до абсолютного нуля, перебувають у рідкому або твердому стані.

Абсолютний нуль – це температура, при якій тиск газу стає рівним нулю, тому що припиняється поступальний і обертовий рух молекул газу, але залишаються так звані «нульові» коливання молекул речовини.

Закон Дальтона

Англійський фізик Джон Дальтон відкрив закон, що був названий його ім'ям: *тиск p суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, які входять до складу газу:*

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_N, \quad (6.16)$$

де p_1, p_2, \dots, p_N – парціальні тиски суміші газів.

Вправа 1. Випишіть нові слова в зошит і вивчіть їх.

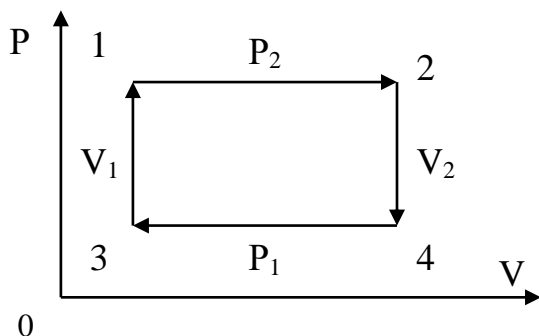
Вправа 2. Дайте відповіді на запитання та виконайте завдання:

1. Запишіть рівняння стану ідеального газу.
2. Запишіть формули для знаходження середньої квадратичної швидкості молекул газу.
3. Які процеси називаються термодинамічними?
4. Що таке ізопроцес?
5. Які ізопроцеси ви знаєте?
6. Запишіть формулу і сформулюйте закон Бойля - Маріотта.
7. Запишіть формулу і сформулюйте закон Гей - Люссака.
8. Запишіть формулу і сформулюйте закон Шарля.
9. Запишіть формулу і сформулюйте закон Дальтона.
10. Запишіть формулу об'єднаного газового закону.

Приклад розв'язання задачі:

Задача 1. З деякою масою ідеального газу зроблений круговий процес (цикл). На рисунку показаний графік цього процесу у координатах p - V . Покажіть цей процес у координатах p - T ; і V - T .

Дано:

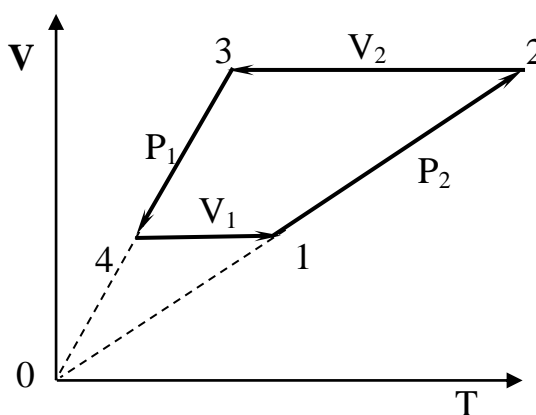
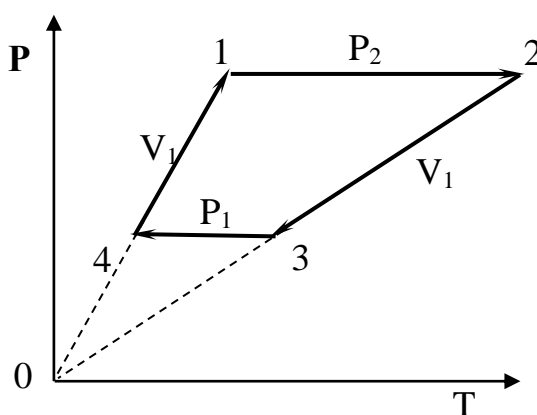


Розв'язання: на графіку кругового газового процесу показані дві ізобари і дві ізохори в координатах p - V , які потрібно побудувати у координатах p - T , а потім у координатах V - T .

Побудуємо графіки кругового процесу

1) у координатах p - T .

2) у координатах V - T .



Задача 2. Яка густина повітря ρ при температурі $t = 17^\circ\text{C}$ і тиску $p = 99,6 \text{ кПа}$? Молярна маса повітря $M = 0,029 \text{ кг/моль}$; газова стала $R = 8,3 \text{ Дж/(моль K)}$.

Відповідь: $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Задача 3. Яка кількість речовини утримується в газі, якщо при тиску $p = 200 \text{ кПа}$ і температурі $T = 240\text{K}$ об'єм дорівнює $V = 40 \text{ л}$?

Відповідь: $\nu = 4 \text{ моль}$.

Задача 4. Який тиск p стисненого повітря, що перебуває в балоні ємністю $V = 20 \text{ л}$ при $t = 12^\circ\text{C}$, якщо маса цього повітря $m = 2 \text{ кг}$, а молярна маса $M = 0,029 \text{ кг/моль}$?

Відповідь: $p = 8,2 \text{ МПа}$.

Задача 5. У балоні перебуває газ при температурі $t = 15^\circ\text{C}$. У скільки разів зменшиться тиск p газу, якщо 40% його вийде з балона, а температура при цьому понизиться на $\Delta t = 8^\circ\text{C}$?

Відповідь: $\eta = 1,7$.

Задача 6. На якій глибині h під водою кулька повітря має об'єм удвічі менший, ніж у поверхні води? Атмосферний тиск дорівнює $p = 100$ кПа, густина води $\rho = 1000$ кг/м³.

Відповідь: $h = 10$ м.

Задача 7. У скільки разів збільшиться тиск p газу в циліндрі, якщо поршень повільно опустити на одну третину висоти циліндра? Процес ізотермічний.

Відповідь: 1,5.

Задача 8. До якої температури T_2 потрібно нагріти повітря, взятого при температурі $T_1 = 293$ К, якщо в умовах ізобарного процесу його об'єм V збільшується вдвічі? Відповідь дати в градусах Цельсія.

Відповідь: $t = 313^\circ\text{C}$.

Задача 9. Газ нагрітий від $t_1 = 27^\circ\text{C}$ до $t_2 = 312^\circ\text{C}$. На скільки відсотків збільшився його об'єм V , якщо тиск p газу залишився незмінним?

Відповідь: 4%.

Задача 10. Газ, що перебуває в закритому балоні, нагріли від $T = 300$ К до $t = 87^\circ\text{C}$. На скільки відсотків η збільшиться тиск газу?

Відповідь: $\eta = 20\%$.

Задача 11. У скляній трубці, запаяній з одного кінця, перебуває повітря, замкнене стовпчиком ртуті. При 20°C довжина замкненого повітряного стовпчика була 180 мм. При опусканні трубки в посудину з гарячою водою, що має температуру 80°C , довжина повітряного стовпа збільшилася до 217 мм. Чому дорівнює значення коефіцієнта об'ємного розширення повітря?

Відповідь: $0,0037$ м⁻¹.

Задача 12. Водяний павук сріблянка будує у воді повітряний будиночок, переносючи на лапках і черевці пухирці атмосферного повітря і поміщаючи їх під купол павутини, прикріпленої до водяних рослин. Скільки рейсів треба зробити павукові, щоб на глибині 50 см побудувати будиночок об'ємом 50 см³, якщо щораз він бере 5 мм³ повітря при атмосферному тиску?

Відповідь: 210.