

Волинський національний університет імені Лесі Українки

**Кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики
імені А. В. Свідзинського**

Федосов С. А., Захарчук Д. А., Шигорін П. П.

ФІЗИКА

Курс лекцій

Частина 1

Луцьк

2023

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол № від червня 2023 р.).

Рецензенти: *Ящинський Л. В.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри фізики та вищої математики Луцького НТУ;

Новосад О. В. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій ВНУ імені Лесі Українки.

Ф 33 Федосов С. А., Захарчук Д. А., Шигорін П. П. **Фізика** : курс лекцій. Ч. 1. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2023. 57 с.

Курс лекцій «Фізика» – складова комплексу робочих матеріалів створених для забезпечення якісної підготовки фахівців галузей знань 01 Освіта/Педагогіка, 09 Біологія, 10 Природничі науки, інженерних і медичних спеціальностей. Матеріал навчального видання охоплює курси «Фізика» «Вибрані питання фізики», «Основи фізики», може бути використаний як окремий змістовий модуль навчальних дисциплін «Біофізика», «Медична фізика», або ж як окрема вибіркова дисципліна навчального плану підготовки здобувачів освітніх ступенів «бакалавр» і «магістр». Курс лекцій містять набір матеріалів необхідних для організації повноцінної аудиторної та самостійної роботи здобувачів вищої освіти та рекомендовано використовувати перед опануванням навчальних дисциплін «Біофізика», «Медична фізика», «Фізична хімія», «Теоретична механіка», тощо.

Навчальне видання відповідає чинним освітнім програмам підготовки й рекомендовано здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальностей 014 Середня освіта (предметних спеціальностей: Біологія та здоров'я людини, Хімія, Географія, Природознавство тощо), 091 Біологія, 101 Екологія, 102 Хімія, а також буде корисним у використанні здобувачам освіти спеціальностей галузей технічних і медичних наук.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ДІЇ НАД ВЕКТОРНИМИ ФІЗИЧНИМИ ВЕЛИЧИНАМИ	
1.1. Фізичні величини	6
1.2. Скаляри і вектори	6
1.3. Дії над векторами	6
2. МЕХАНІКА	
2.1. Основні визначення	9
2.2. Кінематика матеріальної точки і поступального руху твердого тіла	9
2.3. Динаміка матеріальної точки і поступального руху твердого тіла	11
2.4. Типи сил	12
2.5. Робота, потужність і енергія	15
2.6. Кінематика і динаміка обертального руху твердого тіла	16
2.7. Статика твердого тіла	17
3. ГІДРОДИНАМІКА	
3.1. Рух ідеальної рідини	19
3.2. Рух в'язкої рідини	20
3.3. Ламінарна і турбулентна течії	22
3.4. Поверхневий натяг	22
3.5. Капілярні явища	23
4. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ	
4.1. Механічні коливання	25
4.2. Основні характеристики гармонічного коливання	26
4.3. Енергія механічних гармонічних коливань	27
4.4. Згасаючі коливання	27
4.5. Вимушені коливання	28
4.6. Біжуча хвиля	29
4.7. Стояча хвиля	30
4.8. Биття коливань	31
5. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА	
5.1. Ідеальний газ	33
5.2. Ізопроееси	33
5.3. Випаровування та конденсація	34
5.4. Реальний газ	35
5.5. Вологість повітря	36
6. ТЕРМОДИНАМІКА	
6.1. Температура і теплове розширення тіл	38
6.2. Параметри термодинамічної системи	39

6.3. Внутрішня енергія системи	40
6.4. Теплоємність та питома теплоємність	40
6.5. Робота і енергія	40
6.6. Перший закон термодинаміки	42
6.7. Ентальпія. Закон Гесса	43
6.8. Тепловий обмін	44
6.9. Тепловий двигун	45
6.10. Цикл Карно	46
6.11. Другий закон термодинаміки	48
6.12. Ентропія та її властивості	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52
ДОДАТКИ	53

ВСТУП

Фізика – це наука, що вивчає найпростіші, але разом з тим найбільш загальні закономірності явищ природи, властивості і будову матерії та закони її руху. Залежно від процесів, що вивчаються, фізика ділиться на такі розділи: механіка, гідродинаміка, акустика, молекулярна фізика, термодинаміка, електрика, магнетизм, оптика, атомна і ядерна фізика.

Фізика є основою всіх природничих наук. Багато законів та положень фізики про основні властивості матерії використовуються в біології, хімії, географії в процесі їх вивчення. На стику фізики та інших природничих наук виникли нові науки, такі як біофізика, фізхімія, геофізика тощо. Зокрема, біофізика, як наука вивчає фізичні та фізико-хімічні явища в біологічних об'єктах і досліджує фундаментальні процеси, що складають основу живої природи, фізична хімія – хімічні явища та процеси на основі загальних принципів фізики з використанням фізичних експериментальних методів, геофізика – фізичні властивості Землі й фізичні процеси, які відбуваються в атмосфері, гідросфері та літосфері під впливом внутрішніх сил Землі й космічних тіл.

Фізика є науковим фундаментом розвитку нових галузей техніки. На основі її відкриттів створена електротехніка і радіотехніка, електронна й обчислювальна техніка, космічна техніка і приладобудування, ядерна енергетика, лазерна техніка та ін. На основі досягнень фізики розробляються принципово нові і досконаліші методи виробництва, прилади і установки. У свою чергу техніка, розвиваючись і удосконалюючись, висуває перед фізикою такі проблеми, вирішення яких вимагає більш глибокого вивчення різних фізичних явищ. Саме технічні потреби спонукали суспільство свого часу до розвитку механіки, необхідної для будівництва різних споруд. Необхідність створення більш економічних двигунів зумовила бурхливий розвиток термодинаміки і т.д.

Фізика формує науковий світогляд людини. Розвиваючись, вона видозмінює, доповнює, поглиблює уявлення про природу речей і причинні зв'язки навколишнього світу. З часом її теоретичні концепції набувають загальнофілософського значення. Таким чином, фахівець природничих наук та інженер будь-якого профілю повинен володіти фізикою в такій мірі, щоб бути в змозі застосовувати її досягнення у своїй науковій і виробничій діяльності.

Матеріали видання рекомендовані при вивченні фізики на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти для здобувачів спеціальностей: 014 Середня освіта (за предметними спеціальностями: Біологія та здоров'я людини, Хімія, Географія, Природознавство тощо), 091 Біологія, 101 Екологія, 102 Хімія, галузей усіх інженерних спеціальностей.

1. ДІЇ НАД ВЕКТОРНИМИ ФІЗИЧНИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

1.1. Фізичні величини

Характеристики процесів або властивостей тіл, що можуть бути визначені кількісно за допомогою тих чи інших вимірювань, називаються *фізичними величинами*.

Кожна фізична величина характеризується числовим значенням і одиницею вимірювання. *Наприклад*, сила $F = 5 \text{ Н}$ має числове значення «5» і одиницю вимірювання «Н» (Ньютон).

Одиниці можуть бути *основними* (м, с, кг, К, А, кд, моль тощо) і *похідними* (*наприклад*, м/с, м/с², кг·м/с², кг·м²).

1.2. Скаляри і вектори

Всі фізичні величини діляться на скаляри і вектори.

Скаляр – це величина, що повністю визначається числовим значенням. *Наприклад*, робота A , температура T , маса m , час t є скаляри.

Вектор – це величина, що визначається числовим значенням і напрямком. *Наприклад*, швидкість \vec{v} , прискорення \vec{a} , сила \vec{F} є вектори.

1.3. Дії над векторами

Додавання векторів:

Правило паралелограма – для додавання векторів \vec{A} і \vec{B} слід шляхом паралельного переносу поєднати їх початки і побудувати на векторах паралелограм; вектор \vec{C} , який є діагоналлю цього паралелограма, являє собою шукану суму $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$ (рис. 1.1).

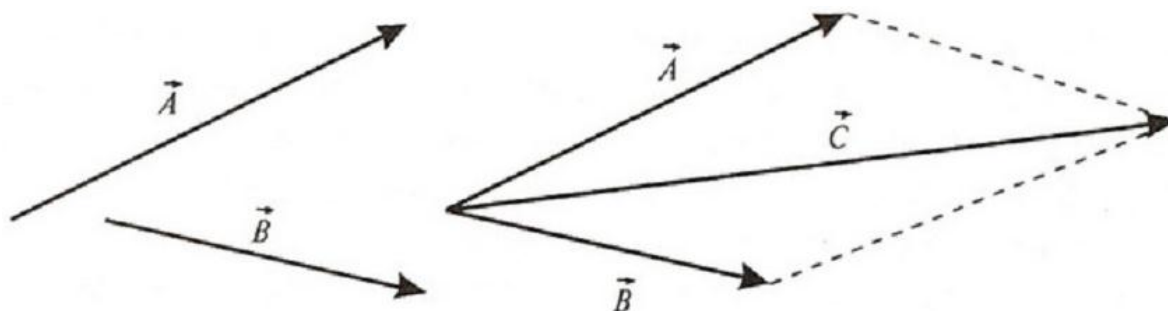


Рис. 1.1. Додавання векторів за правилом паралелограма

Правило трикутника – треба сполучити початок другого вектора з кінцем першого; вектор \vec{C} , який з'єднує початок першого з кінцем другого, являє собою шукану суму $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$ (рис. 1.2).

Віднімання векторів: відняти вектор \vec{B} із вектора \vec{A} означає скласти вектор \vec{A} з вектором $-\vec{B}$, який протилежний вектору \vec{B} (рис. 1.3):

$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B}) = \vec{C}. \quad (1.1)$$

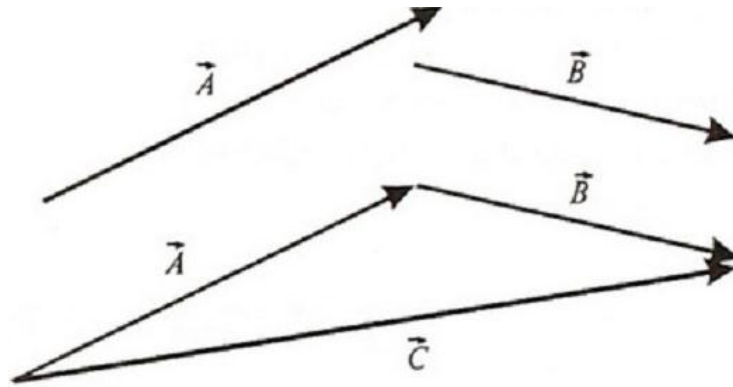


Рис. 1.2. Додавання векторів за правилом трикутника

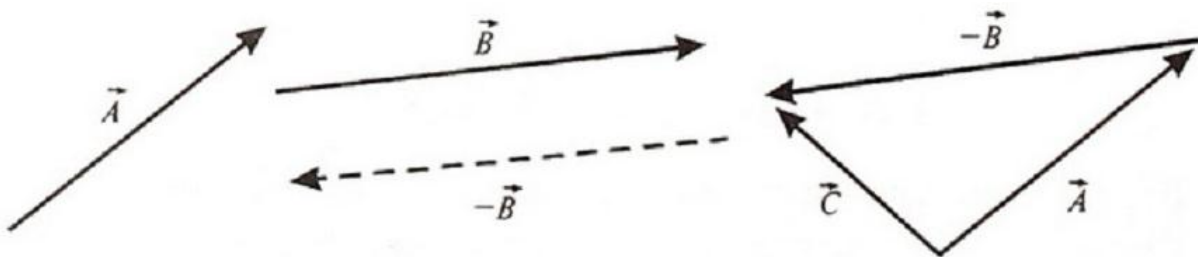


Рис. 1.3. Віднімання векторів за правилом трикутника

Множення і ділення векторів на скаляр: за множення вектора \vec{A} на скаляр n отримується вектор, що збігається за напрямком з вектором \vec{A} , і рівний за модулем nA (рис. 1.4); при діленні отримуємо вектор, що збігається за напрямком з вектором \vec{A} і модуль якого дорівнює $\frac{A}{n}$ (рис. 1.5).



Рис. 1.4. Множення векторів на скаляр

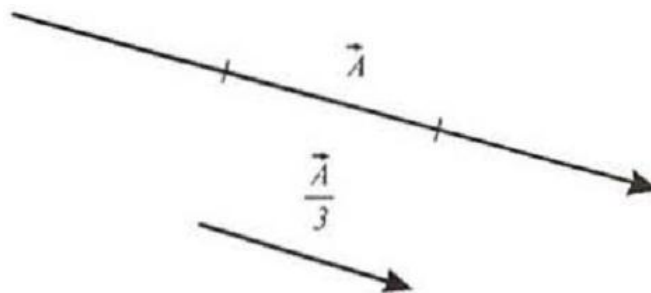


Рис. 1.5. Ділення векторів на скаляр

Проекціювання векторів: проекцією вектора \vec{A} на вісь Ox називається відрізок a_x між проекціями на цю вісь початку і кінця вектора (рис. 1.6).

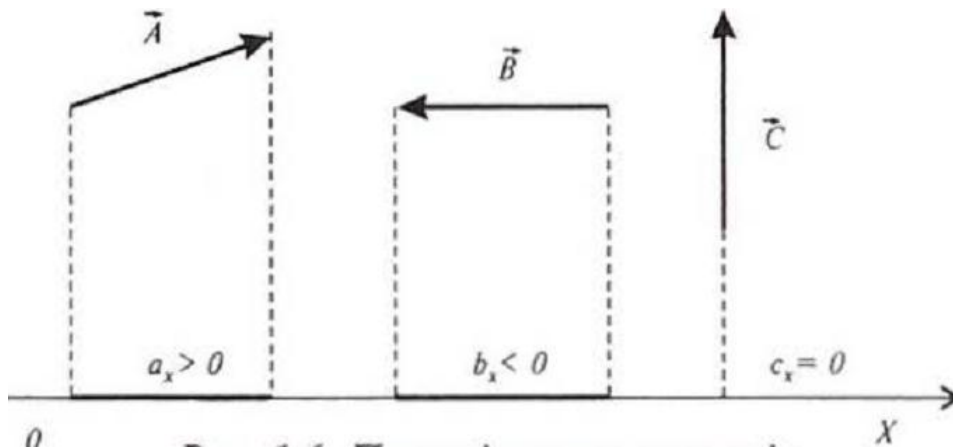


Рис. 1.6. Проекціювання векторів

Скалярний добуток $\vec{A} \cdot \vec{B}$ двох векторів \vec{A} і \vec{B} є скаляр:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \alpha, \quad (1.2)$$

де α – кут між векторами \vec{A} і \vec{B} .

Векторний добуток $\vec{A} \times \vec{B}$ двох векторів \vec{A} і \vec{B} є вектор, модуль якого рівний

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin \alpha; \quad (1.3)$$

його напрямок перпендикулярний до обох векторів \vec{A} і \vec{B} і збігається з напрямком поступального руху правого гвинта при його обертанні від \vec{A} до \vec{B} на кут, менший π (рис. 1.7).

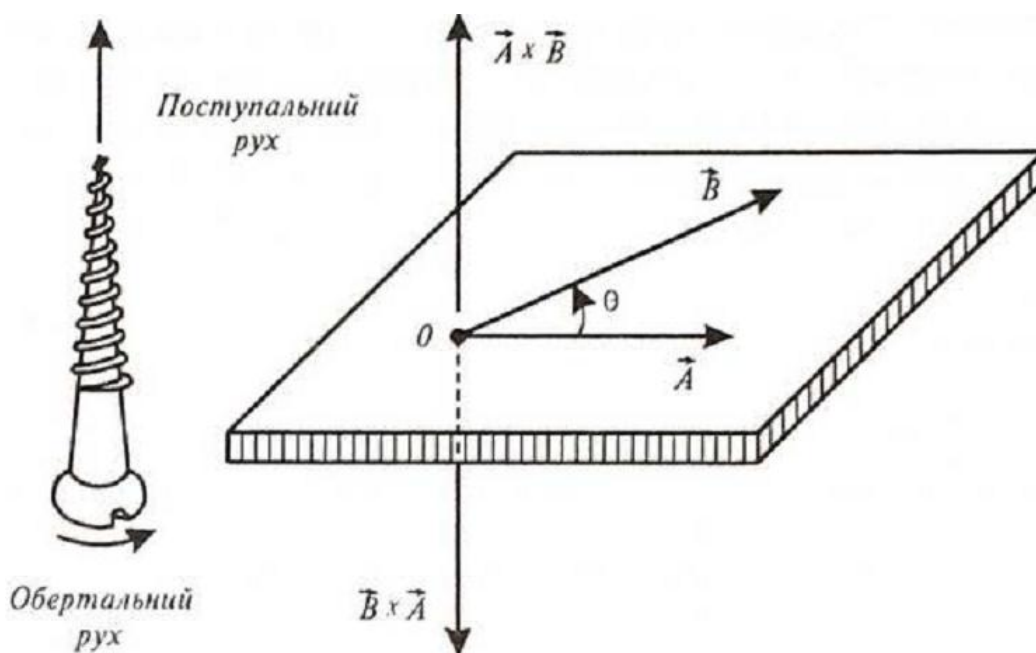


Рис. 1.7. Векторний добуток двох векторів

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають скаляром? вектором?
2. Дати визначення скалярному добутку.
3. Дати визначення векторному добутку.

2. МЕХАНІКА

Механіка – розділ фізики, що вивчає механічний рух матеріальних тіл і взаємодію цих тіл.

2.1. Основні визначення

Механічний рух – зміна положення тіла з часом відносно іншого тіла або системи тіл, що умовно вважають нерухомою.

У механіці для опису реальних тіл використовують спрощені моделі, такі як матеріальна точка або абсолютно тверде тіло.

Матеріальна точка – це тіло, формою і розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати.

Абсолютно тверде тіло – це тіло, деформаціями якого в умовах розглядуваної задачі можна знехтувати і відстань між двома точками якого завжди залишається незмінною.

Система відліку – це сукупність системи координат і годинника, зв'язаних з тілом, відносно якого вивчається рух будь-яких інших матеріальних точок або тіл. Наприклад, у декартовій системі координат положення точки A в даний момент часу характеризується трьома координатами x , y і z .

2.2. Кінематика матеріальної точки і поступального руху твердого тіла

Кінематика вивчає рух тіл без урахування причин, що викликають цей рух.

Траєкторія – це лінія, яку описує під час руху матеріальна точка. Залежно від траєкторії розрізняють *прямолінійний* і *криволінійний* рух точки.

Довжиною шляху s (від англ. *space-time interval*) називається відстань, пройдена точкою за певний проміжок часу і яка вимірюється вздовж траєкторії.

Переміщення $\Delta\vec{r}$ – це є вектор, проведений із початкового положення точки, що рухається, в положення її у даний момент часу:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0, \quad (2.1)$$

де \vec{r} і \vec{r}_0 є радіус-вектори.

Траєкторію, довжину шляху і переміщення наведено на рис. 2.1.

Швидкість точки \vec{v} (від лат. *velocitas*) є відношення переміщення $\Delta\vec{r}$ до проміжку часу Δt (від лат. *tempus*) (рис. 2.2):

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}, \quad (2.2)$$

Середньою швидкістю $\langle v \rangle$ називають відношення пройденого шляху Δs до часу руху Δt :

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Одиниця вимірювання швидкості $[v]$ – $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ або м/с.

Миттєва швидкість точки \vec{v} дорівнює першій похідній радіуса-вектора за часом:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.3)$$

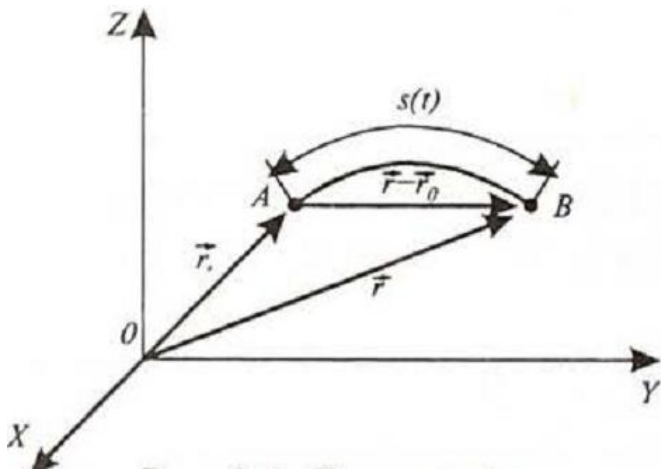


Рис. 2.1. Траєкторія, довжина шляху і переміщення

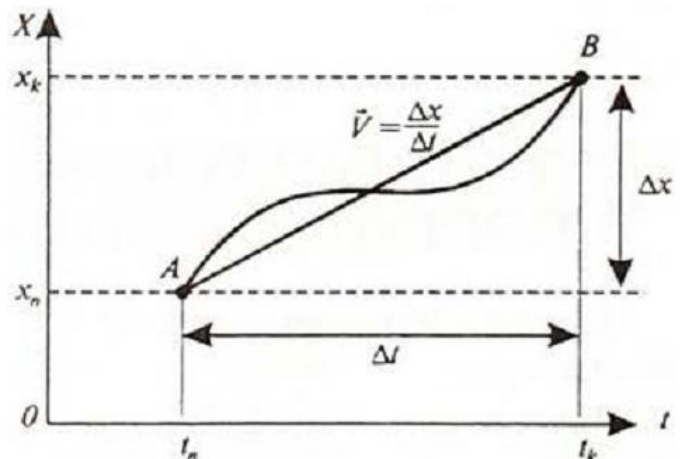


Рис. 2.2. Середня швидкість точки

Прискорення \vec{a} (від лат. *acceleratio*) дорівнює першій похідній швидкості \vec{v} руху точки за часом t (рис. 2.3):

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (2.4)$$

Одиниця вимірювання прискорення $[a]$ – $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ або $\text{м}/\text{с}^2$.

Криволінійний рух матеріальної точки характеризується *тангенціальним* a_τ і *нормальним* a_n прискореннями:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}; \quad (2.5)$$

$$a_n = \frac{v^2}{r}. \quad (2.6)$$

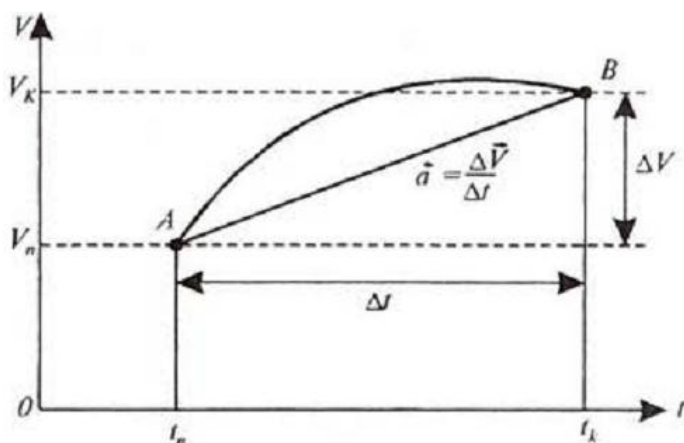


Рис. 2.3. Середнє прискорення точки

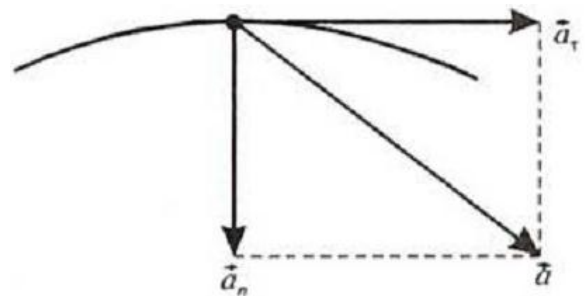


Рис. 2.4. Повне прискорення точки під час криволінійного руху

Повне прискорення a матеріальної точки під час криволінійного руху визначається так (рис. 2.4):

$$a = |\vec{a}| = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{r}\right)^2}. \quad (2.7)$$

Поступальним називається такий рух твердого тіла, при якому пряма, що з'єднує будь-які дві точки цього тіла, залишається паралельною сама собі.

2.3. Динаміка матеріальної точки і поступального руху твердого тіла

Динаміка вивчає рух тіл у зв'язку з тими причинами, які викликають або змінюють цей рух. В основі динаміки лежать три закони Ньютона.

Перший закон Ньютона: будь-яка матеріальна точка (тіло) зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки дія з боку інших тіл не примусить його змінити цей стан.

Властивість тіл зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху називається *інерцією*.

Сила \vec{F} (від лат. *Fortis*) – фізична величина, що характеризує дію одного тіла на інше; результатом прикладення до тіла сили є набування прискорення або деформації тіла. Одиниця вимірювання сили $[F]$ – Н.

Маса тіла m (від лат. *massa*) – фізична величина, яка є однією з основних характеристик матерії, що визначає її інерційні та гравітаційні властивості. Одиниця вимірювання маси $[m]$ – кг.

Густина речовини ρ – це є маса, що припадає на одиницю об'єму:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.8)$$

де m – маса тіла; V (від лат. *Volumen*) – об'єм тіла. Значення густини деяких речовин наведено у Додатку А.

Другий закон Ньютона: прискорення, що набуває матеріальна точка (тіло), пропорційне силі, яка викликає це прискорення, збігається з нею за напрямком і обернено пропорційне масі матеріальної точки (тіла)

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.9)$$

Останнє рівняння можна записати так:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}. \quad (2.10)$$

Третій закон Ньютона: будь-яка дія матеріальних точок (тіл) одна на одну має характер взаємодії; сили, з якими діють одна на одну матеріальні точки (тіла), завжди рівні між собою за модулем, протилежні за напрямком і діють вздовж прямої, що з'єднує ці точки (тіла)

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \quad (2.11)$$

Механічна система, на яку не діють зовнішні сили, називається *замкнутою*.

Для системи матеріальних точок рівняння (2.10) запишеться так:

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}_{\text{зовн}}, \quad (2.12)$$

де $\vec{F}_{zovn} = \sum (\vec{F}_i)_{zovn}$ – головний вектор зовнішніх сил. Для замкнутої системи матеріальних точок маємо $\vec{F}_{zovn} = 0$, отже $\frac{d(m\vec{v})}{dt} = 0$, або $m\vec{v} = \sum m_i \vec{v}_i = \text{const}$, тобто імпульс $m\vec{v}$ замкнутої системи не змінюється з часом (закон збереження імпульсу замкнутої системи).

Розглянемо систему матеріальних точок (рис. 2.5). Точка С, радіус-вектор якої рівний відношенню суми добуток мас усіх матеріальних точок системи на їх радіуси-вектори до маси m всієї системи, називається *центром мас системи матеріальних точок*:

$$\vec{r}_c = \frac{m_1 \cdot \vec{r}_1 + m_2 \cdot \vec{r}_2 + \dots + m_N \cdot \vec{r}_N}{m_1 + m_2 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i}. \quad (2.13)$$

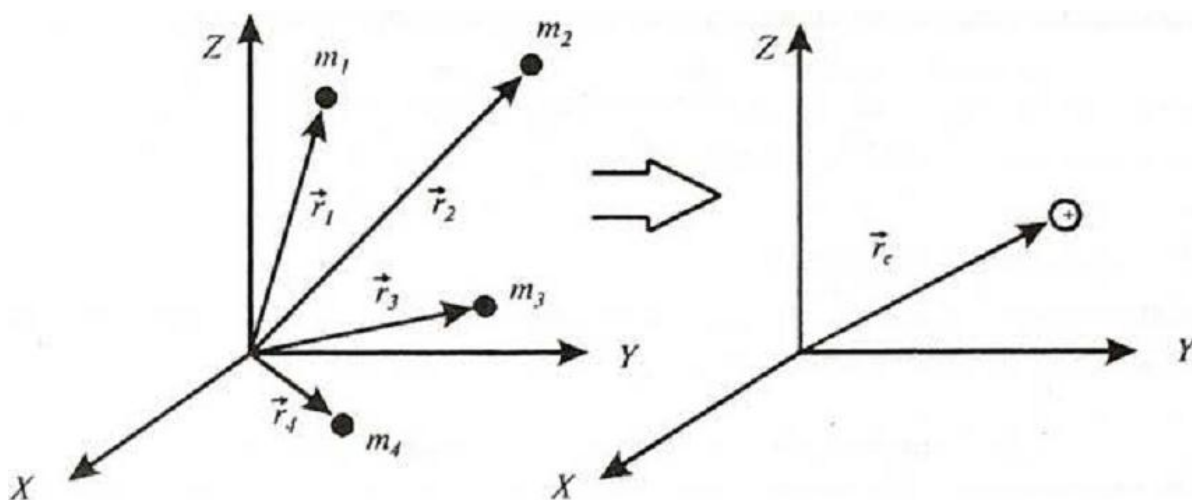


Рис. 2.5. Центр мас системи матеріальних точок як матеріальна точка, в якій міститься маса всієї системи

Таким чином, центр мас системи матеріальних точок рухається як матеріальна точка, в якій міститься маса всієї системи і на яку діє сила, що дорівнює геометричній сумі всіх сил, які діють на систему. Отже, тверде тіло еквівалентне системі матеріальних точок.

2.4. Типи сил

Сили тяжіння.

Закон всесвітнього тяжіння: дві будь-які матеріальні частинки з масами m_1 і m_2 притягуються в напрямку одна до одної з силою, що прямопропорційна добутку мас і обернено пропорційна квадрату відстані r між ними

$$F \propto \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad \text{або} \quad F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (2.14)$$

де r – відстань між точками; m_1 і m_2 – їх маси; G (від англ. **G**ravitational constant) – гравітаційна стала ($= 6,672 \cdot 10^{-11}$ (Н·м²)/кг²). Матеріальні частинки – це будь-які тіла, розміри яких значно менші за відстань між ними.

Розглянемо сили, що діють на нерухоме тіло, розташоване на земній поверхні. З боку Землі діє *сила притягання* F , що визначається за законом всесвітнього тяжіння:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{R^2}, \quad (2.15)$$

де m – маса тіла; M – маса Землі; R – радіус земної кулі.

Крім того, за рахунок добового обертання Землі на тіло діє *відцентрова сила інерції* F_{vid} , що спрямована від осі обертання. Геометрична сума сили притягання Землі та відцентрової сили інерції називається *силою тяжіння*. Сила притягання значно перевищує відцентрову силу інерції, отже, сила тяжіння майже не відрізняється від сили притягання.

Вага P (від лат. *Pondus*) тіла, як видно з рис. 2.6, визначається як різниця сили притягання F і проекції відцентрової сили F'_{vid} на напрямок дії сили притягання.

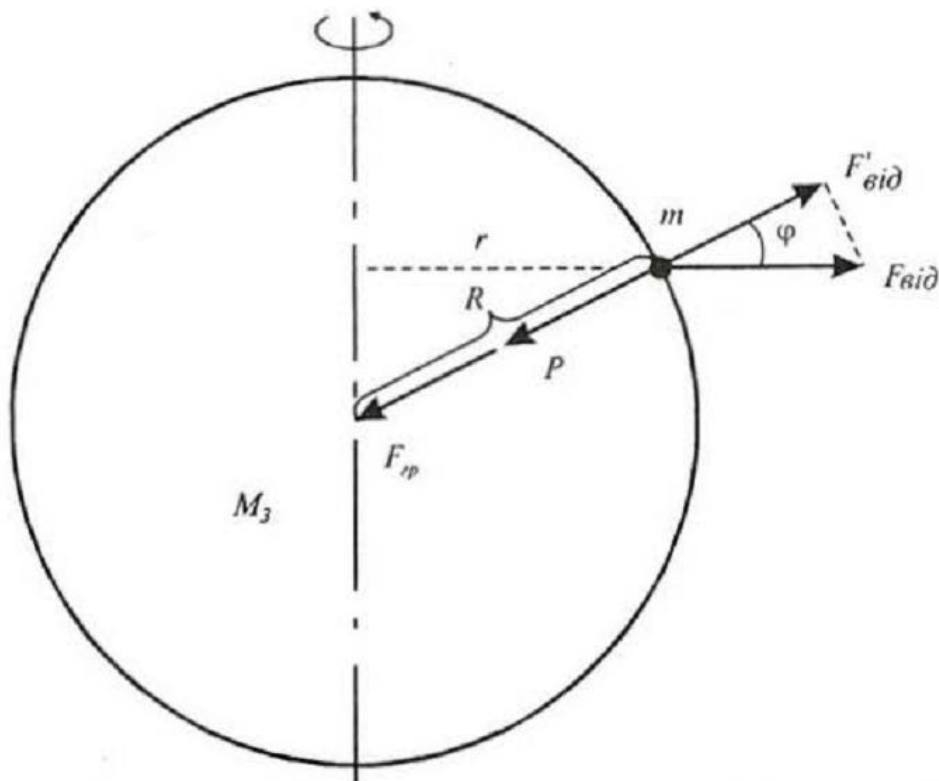


Рис. 2.6. Дія сил на тіло, що лежить на земній поверхні:

F_{gr} – гравітаційна сила; F_{vid} – відцентрова сила; P – вага тіла; φ – географічна широта знаходження тіла; r – радіус обертання тіла; R – радіус земної кулі

Проекція відцентрової сили інерції F'_{vid} на напрямок дії сили притягання Землі залежить від φ . Таким чином, вага тіла залежить від географічної широти φ знаходження тіла.

Пружні сили.

Механічна деформація – це зміна взаємного розташування множини частинок матеріального середовища, що призводить до спотворення форми та розмірів тіла і викликає зміну сил взаємодії між частинками, тобто появу напружень.

Пружними називаються деформації, що виникають і зникають одночасно з навантаженням і не супроводжуються розсіюванням енергії. *Пластичними* називаються деформації, що залишаються після зняття навантаження і

супроводжуються розсіюванням енергії. Існують деформації *розтягу*, *стиску*, *прогину*, *вигину*, *кручення* та *зсуву* (див. рис. 2.7). Деформація викликає в тілі, що деформується, появу сили пружності.

Закон Гука для однобічного розтягу (стиску): *сила пружності F_{np} , що виникає при деформації тіла, пропорційна видовженню цього тіла x*

$$F_{np} = -k \cdot x, \quad (2.16)$$

де k – коефіцієнт пружності, що залежить від розмірів і матеріалу тіла.

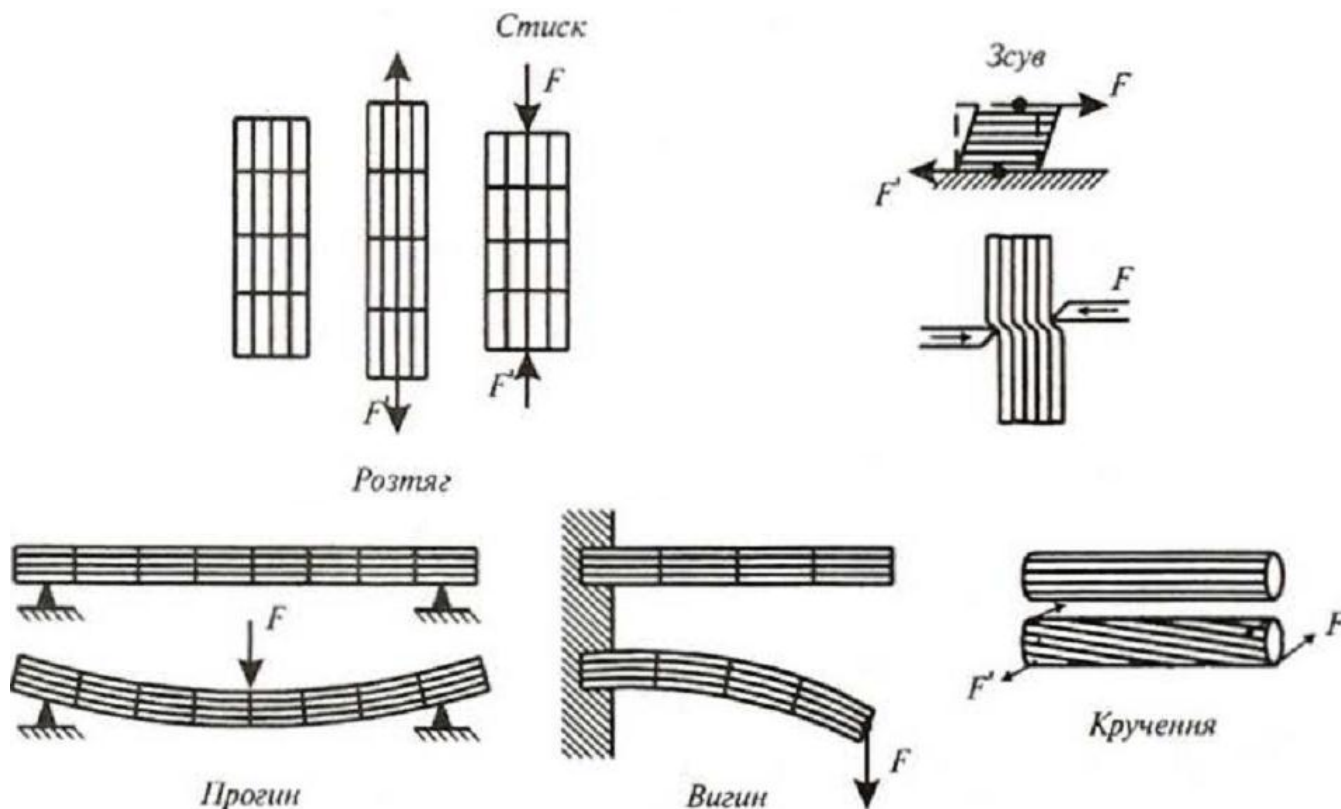


Рис. 2.7. Типи деформацій

Закон Гука може бути сформульований і записаний так: *при невеликих деформаціях, що є пружними, нормальне напруження σ пропорційне відносному видовженню ε*

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.17)$$

де σ – нормальне механічне напруження ($[\sigma] - \text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ або $\text{Н}/\text{м}^2$), $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ – відносне видовження тіла, E – модуль Юнга (значення модуля Юнга різних пружних матеріалів наведено в Додатку А). Модуль Юнга характеризує пружні властивості речовини; він визначається напруженням, що викликає відносне видовження тіла, рівне одиниці.

Нормальне механічне напруження – величина σ , що дорівнює відношенню модуля пружності F_{np} до площі поперечного перетину S (від англ. *Surface area*) тіла

$$\sigma = \frac{F_{np}}{S}. \quad (2.18)$$

Залежність механічного напруження σ від відносного видовження ε називається *діаграмою розтягу* (рис. 2.8). Тут можна виділити такі ділянки і характерні точки: OA – область пружності, точка A – межа пружності, AB – область пластичності, точка B – межа пластичності, BC – область руйнування тіла, C – межа міцності.

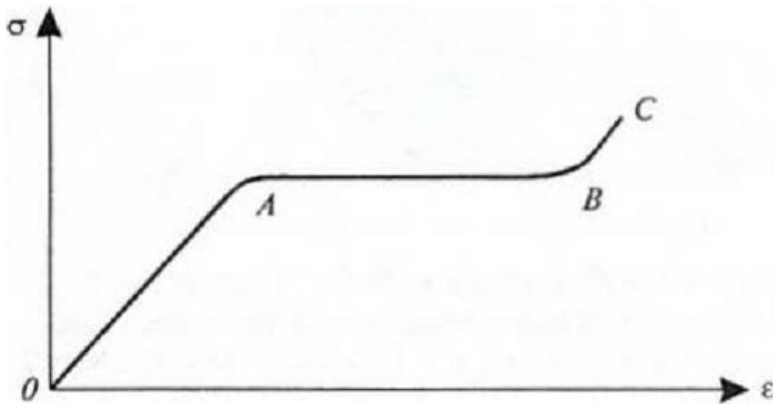


Рис. 2.8. Діаграма розтягу:
 σ – механічне напруження, ε – відносне видовження, A – межа пружності, B – межа пластичності, C – межа міцності

2.5. Робота, потужність і енергія

Робота сили A (від нім. *Arbeit* або фр. *Action*) є міра дії сили, що залежить від числової величини і напрямку сили та від переміщення точки й прикладання.

Якщо тіло рухається прямолінійно і на нього діє постійна сила \vec{F} , що складає деякий кут α з напрямком переміщення, то робота цієї сили визначається як скалярний добуток вектора сили \vec{F} на вектор переміщення \vec{r} :

$$A = \vec{F} \cdot \vec{r}, \quad (2.19)$$

або

$$A = |\vec{F}| \cos \alpha \cdot |\vec{r}|. \quad (2.20)$$

У загальному випадку, коли сила може змінюватися як за модулем, так і за напрямком, доцільно ввести поняття елементарної роботи dA :

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cos \alpha \cdot ds, \quad (2.21)$$

де $ds = |d\vec{r}|$ – елементарний шлях.

Робота A , яка виконується силою \vec{F} на ділянці траєкторії від точки 1 до точки 2, дорівнює сумі елементарних робіт сили \vec{F} на всіх нескінченно малих ділянках траєкторії; ця сума приводиться до інтегралу:

$$A \cong \int_1^2 dA = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_1^2 F \cos \alpha \cdot ds. \quad (2.22)$$

Одиниця вимірювання роботи $[A]$ – Дж = Н·м.

Потужність сили P (від лат. *Potentia*) або N – це відношення елементарної роботи dA , що здійснюється цією силою \vec{F} за малий проміжок часу, до його тривалості dt :

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}. \quad (2.23)$$

Одиниця вимірювання потужності $[N]$ – Вт = Дж·с⁻¹ або Дж/с.

Енергія E (від лат. *Energia*) – фізична величина, що є загальною мірою руху та взаємодії всіх видів матерії.

Кінетична енергія E_k механічної системи – це енергія механічного руху цієї системи.

Потенціальна енергія E_p – це механічна енергія системи тіл, що визначається їх взаємним розташуванням і характером сил взаємодії між ними.

Якщо робота, що здійснюється силами при переміщенні тіла з одного положення до іншого, не залежить від того, по якій траєкторії відбулося це переміщення, а залежить лише від початкового і кінцевого положень, то такі сили називаються *консервативними*.

Закон збереження енергії у механіці: *повна механічна енергія E замкнутої системи тіл, між якими діють лише консервативні сили, залишається сталою.*

$$E = E_k + E_p = \text{const} \quad \text{або} \quad \Delta E_k + \Delta E_p = 0$$

2.6. Кінематика і динаміка обертального руху твердого тіла

Обертальним рухом твердого тіла називають такий його рух, при якому всі точки, з яких складається тіло, описують кола, центри яких лежать на прямій, що називається віссю обертання.

Кінематичні характеристики обертального руху:

Кутова швидкість $\vec{\omega}$ є векторна величина, що дорівнює першій похідній кута обертання тіла за часом:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \quad (2.24)$$

Одиниця вимірювання кутової швидкості $[\omega]$ – рад·с⁻¹ або рад/с.

Кутове прискорення $\vec{\beta}$ є векторна величина, що дорівнює першій похідній кутової швидкості за часом:

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad (2.25)$$

Одиниця вимірювання кутового прискорення $[\beta]$ – рад·с⁻² або рад/с².

Динамічною характеристикою твердого тіла, що обертається, є *момент інерції* I (від лат. *Inertia*) – сума добутків мас m_i матеріальних точок, з яких складається тіло, на квадрат відстані їх від осі обертання:

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad (2.26)$$

Для довільного тіла момент інерції становитиме:

$$I = \int r^2 dm \quad (2.27)$$

Наведемо формули моментів інерції деяких однорідних тіл масою m відносно осей симетрії, що проходить через центр мас:

$$\text{Циліндр, диск радіусом } R \quad I = \frac{1}{2} mR^2 \quad (2.28)$$

$$\text{Сфера радіусом } R \quad I = \frac{2}{5} mR^2 \quad (2.29)$$

$$\text{Стержень довжиною } R \quad I = \frac{1}{12} mR^2 \quad (2.30)$$

Одиниця вимірювання моменту інерції $[I]$ – кг·м².

Теорема Штейнера: момент інерції тіла I відносно будь-якої осі обертання дорівнює моменту його інерції I_0 відносно паралельної осі, що проходить через центр мас O тіла, складеному з добутком маси m тіла на квадрат відстані d між осями

$$I = I_0 + md^2. \quad (2.31)$$

Кінетична енергія обертання

$$E_{ob} = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (2.32)$$

Моментом \vec{M} (від англ. *Moment of force*) сили \vec{F} відносно нерухомої точки O називається векторний добуток радіус-вектора \vec{r} , проведеного із точки O в точку прикладення сили \vec{F} :

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]. \quad (2.33)$$

Одиниця вимірювання моменту сили $[M]$ – Н·м.

Основне рівняння динаміки обертального руху:

$$\vec{M} = I \times \vec{\beta}, \quad (2.34)$$

де I – момент інерції тіла, що обертається; $\vec{\beta}$ – кутове прискорення.

Останнє рівняння можна переписати як:

$$\vec{M} = I \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt}, \quad (2.35)$$

звідки

$$\vec{M} \cdot dt = I \cdot d\vec{\omega}. \quad (2.36)$$

Закон збереження моменту імпульсу в механіці: для замкнутої системи момент імпульсу відносно нерухомої точки не змінюється з часом. Дійсно, для замкнутої системи маємо $\vec{M} = 0$, отже і $\vec{M} \cdot dt = 0$, звідки

$$d(I \cdot \omega) = 0; \quad (2.37)$$

$$I \cdot \omega = \text{const}. \quad (2.38)$$

2.7. Статика твердого тіла

Статика вивчає закони рівноваги системи тіл.

Важіль – найпростіший механізм, що дає змогу меншою силою зрівноважити більшу; являє собою тверде тіло, що обертається навколо нерухомої опори (рис. 2.14).

Плече сили – це найкоротша відстань між віссю обертання та напрямком дії сили.

Момент сили – це добуток сили на плече:

$$M = F \cdot l. \quad (2.39)$$

Якщо опора розташована між точками прикладення сил, то це важіль I роду; якщо обидві сили прикладені з одного боку опори, то це важіль II роду.

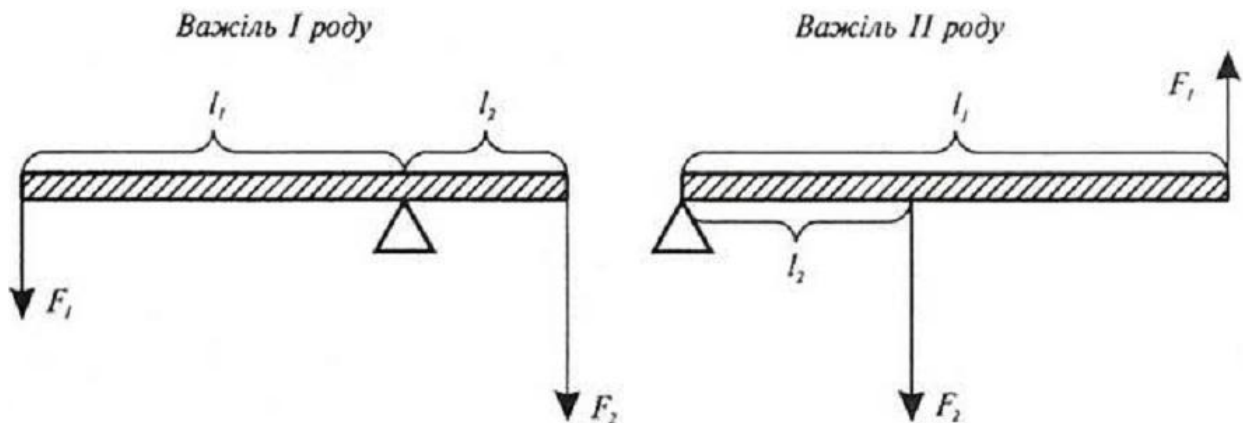


Рис. 2.14. Типи важелів (F_1 і F_2 – сили, l_1 і l_2 – плечі прикладених сил)

Умова рівноваги важеля: важіль перебуває в рівновазі, якщо сума моментів діючих сил дорівнює нулю, тобто сума моментів сил, що обертають важіль за годинниковою стрілкою (додатних), дорівнює сумі моментів сил, які обертають важіль проти годинникової стрілки (від’ємних)

$$F_1 \cdot l_1 - F_2 \cdot l_2 = 0, \quad (2.40)$$

де l_1 і l_2 – плечі прикладених сил (рис. 2.14).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке траєкторія? довжина шляху? переміщення?
2. Дати визначення середній та миттєвій швидкостям.
3. Що таке прискорення?
4. Що називають густиною речовини? В яких одиницях вона вимірюється?
5. Сформулювати закон всесвітнього тяжіння.
6. Що таке вага тіла? Пояснити залежність ваги тіла від географічної широти місцезнаходження тіла.
7. Сформулювати закон Гука.
8. Що таке нормальне механічне напруження? В яких одиницях воно вимірюється?
9. Що характеризує модуль Юнга?
10. Від чого залежить потенціальна енергія пружно-деформованого тіла?
11. Що таке робота сили? потужність?
12. Сформулювати закон збереження механічної енергії.
13. Що таке кутова швидкість? кутове прискорення?
14. Дати визначення моменту інерції матеріальної точки; тіла.
15. Сформулювати теорему Штейнера.
16. Що називають важелем?
17. Сформулювати умову рівноваги важеля.
18. Сформулювати закон збереження моменту імпульсу.

3. ГІДРОДИНАМІКА

Гідродинаміка – розділ фізики, що вивчає рух рідин, їх взаємодію між собою та твердими тілами, які вони обтікають.

3.1. Рух ідеальної рідини

Ідеальною вважається рідина, в якій відсутні сили тертя (в'язкості) та яка нестислива.

Нестисливою називають рідину, густина якої є стала.

Течією називають рух рідини, а *поток* – саму рідину, що рухається. Якщо швидкість руху рідини в кожній точці об'єму не змінюється з часом, такий рух рідини називається *стаціонарним*. Графічно рух рідини зображується за допомогою *ліній течії* – таких ліній, дотичні до яких збігаються з напрямками вектора швидкості в даній точці потоку. Частина рідини, обмежена лініями течії, називається *трубкою течії*.

Розглянемо трубку течії змінного перерізу (рис. 3.1). Для ідеальної рідини, що рухається у цій трубці, справедливі такі закономірності.

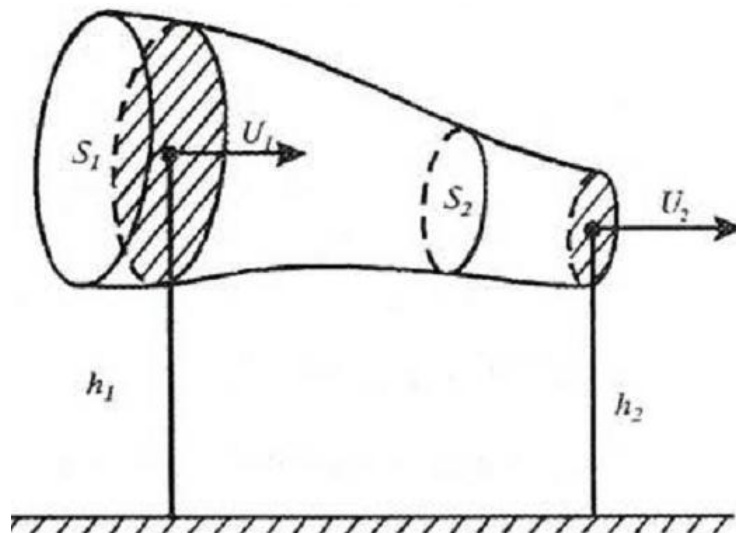


Рис. 3.1. Трубка змінного перетину

Рівняння нерозривності потоку: при стаціонарній течії рідини добуток швидкості течії рідини на поперечний переріз трубки течії є величиною сталою

$$S \cdot v = \text{const.} \quad (3.1)$$

З цього рівняння можна отримати вирази:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2, \quad (3.2)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}, \quad (3.3)$$

$$S = \frac{\text{const}}{v}. \quad (3.4)$$

Тиск p (від лат. *pressio*) – скалярна величина, що вимірюється відношенням суми сил F , що діють перпендикулярно на будь-яку частину поверхні, до площі S цієї частини:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (3.5)$$

Одиниця вимірювання тиску $[p]$ – Па = Н·м⁻² або Н/м².

Рівняння Бернуллі: в стаціонарному потоці повний тиск, що складається з статичного, гідростатичного та динамічного тисків, є величиною сталою для будь-яких перерізів потоку

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \text{const}, \quad (3.6)$$

де p – статичний тиск, тобто тиск, який утворює рідина на поверхні тіла, яке вона обтікає; $\rho \cdot g \cdot h$ – гідростатичний тиск, викликаний вагою рідини; $\frac{\rho \cdot v^2}{2}$ – динамічний тиск, зумовлений рухом рідини.

Для горизонтально розміщеної трубки рівняння Бернуллі має вигляд:

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \text{const}. \quad (3.7)$$

Таким чином, повна енергія одиниці об'єму ідеальної рідини в будь-якому перерізі потоку є величиною сталою.

3.2. Рух в'язкої рідини

Якщо під час руху рідини в ній виникають сили тертя (в'язкість), то таку рідину називають *реальною*.

Рівняння Ньютона: тангенціальна сила F , що викликає зсув шарів рідини один відносно одного, пропорційна площі S шару, по якому відбувається зсув, та градієнту $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ швидкості течії

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x}, \quad (3.8)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості. Він характеризує опір рідини зміщенню її шарів. Одиниця вимірювання в'язкості $[\eta]$ – Па·с. Типові значення в'язкості деяких речовин наведено у Додатку Б.

Рідину, яка в процесі течії підпорядковується рівнянню Ньютона, називають *ньютонівською*. Наприклад, вода є ньютонівська рідина, а кров – *неньютонівська*. Ньютонівська рідина рухається вздовж трубки як серія концентричних кільцеподібних шарів, швидкості руху яких змінюються за параболічним законом (рис. 3.2): рідина рухається швидше вздовж осі і повільніше – при наближенні до стінок трубки. Швидкість руху кожного шару радіусом r описується рівнянням:

$$v(r) = v_{\text{max}} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (3.9)$$

де v_{\max} – швидкість руху рідини вздовж осі трубки; R – радіус трубки.

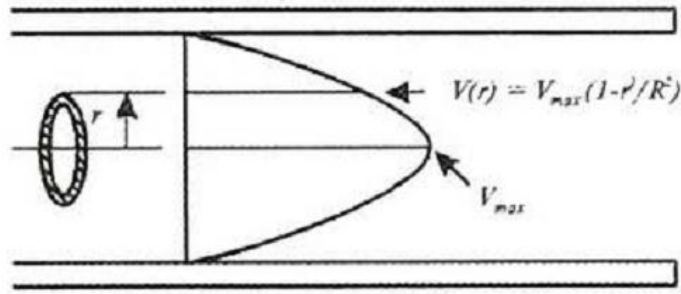


Рис. 3.2. Рух ньютонівської рідини як серії концентричних шарів радіуса r , швидкості v руху яких у трубці радіуса R змінюються за параболічним законом

Закон Стокса: сила, що діє на тверде тіло сферичної форми радіусом R , яке рухається повільно у в'язкій рідині, пропорційна коефіцієнту в'язкості η рідини, радіусу R і швидкості руху v тіла

$$F = 6\pi\eta Rv. \quad (3.10)$$

Останнє рівняння використовують для визначення коефіцієнта в'язкості. Розглянемо рух кульки у в'язкій рідині. На цю кульку діють три сили:

1. Сила тяжіння:

$$m\vec{g} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_k \vec{g}. \quad (3.11)$$

2. Виштовхуюча (архімедова) сила:

$$F_A = \rho_c v \vec{g} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_c \vec{g}. \quad (3.12)$$

3. Сила тертя, що визначається законом Стокса:

$$F_C = 6\pi\eta Rv, \quad (3.13)$$

де m – маса кульки; $R = \frac{D}{2}$ – радіус кульки; ρ_k і ρ_c – густина кульки і середовища.

Знайдемо проекції всіх трьох сил на вісь координат, що спрямована вертикально донизу:

$$mg - F_A - F_C = 0, \quad (3.14)$$

або

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_k \vec{g} + \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_c \vec{g} - 6\pi\eta Rv = 0. \quad (3.15)$$

З урахуванням того, що швидкість рівномірного руху кульки дорівнює:

$$v = \frac{l}{t}, \quad (3.16)$$

можна отримати такий вираз:

$$\eta = \frac{2gR^2 t(\rho_k - \rho_c)}{9 \cdot l}. \quad (3.17)$$

Звідки швидкість рівномірного падіння кульки малих розмірів у в'язкій рідині визначається за формулою:

$$v = g \cdot \frac{\rho_k - \rho_c}{\eta} \cdot \frac{2R^2}{9}. \quad (3.18)$$

Закон Гагена - Пуазейля: об'єм рідини, що протікає за одиницю часу через переріз трубки, прямопропорційний різниці тисків $p_1 - p_2$ на кінцях трубки, четвертому ступеню радіуса R трубки і обернено пропорційний довжині трубки l і коефіцієнту в'язкості η рідини

$$Q = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi R^4}{8 \cdot l} \cdot (p_1 - p_2). \quad (3.19)$$

3.3. Ламінарна і турбулентна течії

Течія в'язкої рідини може бути *ламінарною* (якщо шари рідини, що рухається, не перемішуються), або *турбулентною* (при перемішуванні шарів).

Режим течії рідини характеризується *числом Рейнольдса* Re , що визначається за формулою:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\eta}, \quad (3.20)$$

де η – в'язкість рідини; ρ – густина рідини; D – діаметр трубки. Перехід від ламінарної течії до турбулентної визначається за допомогою *критичного числа Рейнольдса* $Re_{кр}$: якщо $Re < Re_{кр}$, течія ламінарна; при $Re > Re_{кр}$ течія турбулентна. Для течії в'язкої нестисливої рідини в циліндричній трубці $Re_{кр} = 2300$.

3.4. Поверхневий натяг

Розглянемо молекулу всередині рідини (рис. 3.3А). З різних боків цю молекулу оточує однакова кількість сусідніх молекул, через що результуюча сил, що діють на молекулу, дорівнює нулю.

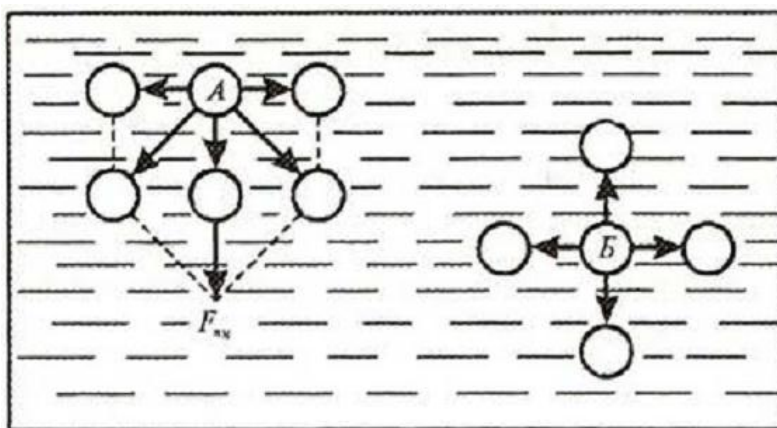


Рис. 3.3. Взаємодія молекул приповерхневого (А) та глибинного (Б) шарів рідини з довоколишніми молекулами

Щодо молекул, які знаходяться в поверхневому шарі рідини, то результуюча сил, що діють на такі молекули, не дорівнює нулю, оскільки концентрація молекул у повітрі над рідиною значно менша за концентрацію молекул в рідині (рис. 3.3Б). Причому, результуюча сила спрямована всередину рідини перпендикулярно її поверхні, через

що поверхневий шар утворює на всю рідину тиск, який являє собою суму всіх результуючих сил, що діють на одиницю поверхні рідини. Цей тиск називається *молекулярним* або *внутрішнім*. Для переміщення молекули з глибини рідини в поверхневий шар потрібно затратити роботу, що здійснюється за рахунок кінетичної енергії молекул і затрачається на збільшення потенціальної енергії цих молекул. Через це молекули поверхневого шару рідини мають більшу потенціальну енергію, ніж молекули усередині рідини. Оскільки рівноважний стан характеризується мінімумом потенціальної енергії, рідина прагне скоротити площу поверхні. Поверхневий шар рідини в цьому разі схожий на еластичну розтягнуту плівку. Напружений стан поверхневого шару рідини називається *поверхневим натягом*, а сили, що зумовлюють скорочення поверхневої плівки рідини, – *силами поверхневого натягу*.

Сила поверхневого натягу на будь-якій межі поверхні рідини пропорційна довжині межі:

$$F = \alpha \cdot l, \quad (3.21)$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу, l – довжина межі рідини.

Коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, розрахованій на одиницю довжини межі; він залежить від типу рідини, домішок і температури. З підвищенням температури коефіцієнт поверхневого натягу зменшується, оскільки середня відстань між молекулами рідини збільшується. Типові значення коефіцієнта поверхневого натягу та залежність коефіцієнта поверхневого натягу води від температури наведені у Додатку Б.

Речовини, що зменшують поверхневий натяг рідини, називають *поверхнево-активними*.

2.5. Капілярні явища

Формула Лапласа: додатковий тиск, викликаний кривизною поверхні рідини, визначається так:

$$\Delta p = \pm \alpha \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3.22)$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу; R_1 і R_2 – радіуси кривизни двох взаємно перпендикулярних перерізів поверхні рідини (рис. 3.4). Додатковий тиск береться зі знаком «+», якщо поверхня опукла, зі знаком «-» – якщо поверхня угнута. У разі сферичної поверхні ($R_1 = R_2 = R$) формула Лапласа має вигляд:

$$\Delta p = \pm \frac{2\alpha}{R}. \quad (3.23)$$

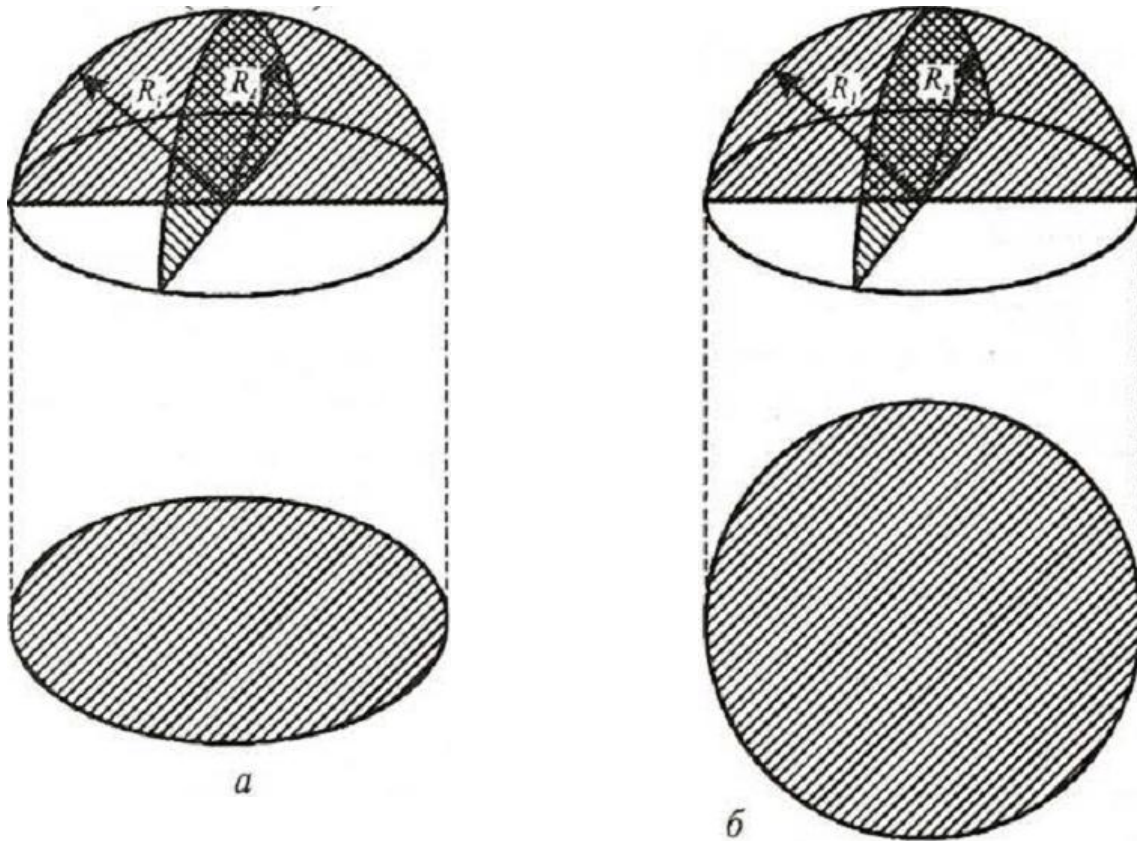


Рис. 3.4. Форма меніска в капілярі:
 а – еліптична ($R_1 \neq R_2$); б – сферична ($R_1 = R_2 = R$) поверхні

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають тиском? В яких одиницях вимірюється тиск?
2. Сформулювати закон нерозривності потоку.
3. Написати та пояснити рівняння Бернуллі.
4. Які сили діють на кульку, занурену в рідину?
5. Сформулювати закон Стокса. Для яких тіл він справедливий?
6. Сформулювати закон Пуазейля.
7. Що називається коефіцієнтом в'язкості? В яких одиницях він вимірюється?
8. Як залежить в'язкість від температури?
9. Що характеризує критична швидкість? Від чого вона залежить?
10. Який тиск називають молекулярним (внутрішнім)? Пояснити механізм його виникнення.
11. Що таке поверхневий натяг?
12. Від чого залежить сила поверхневого натягу?
13. Дати визначення коефіцієнта поверхневого натягу. В яких одиницях він вимірюється?
14. Що називають додатковим тиском?
15. Написати та пояснити формулу Лапласа для циліндричного та сплющеного капілярів.
16. Що таке R_1 і R_2 у формулі (3.22)?

4. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

4.1. Механічні коливання

Коливання – це рухи або процеси, що характеризуються певною повторюваністю у часі. Вільними (власними) називаються коливання, які відбуваються за відсутності зовнішніх впливів на коливальну систему і виникають за будь-якого початкового відхилення цієї системи від стану її стійкої рівноваги. Періодичними є коливання, що повторюються через однакові проміжки часу.

Найпростішим прикладом коливального руху є коливання математичного чи пружинного маятників. Розглянемо матеріальну точку масою m , що висить на пружині (рис. 4.1).

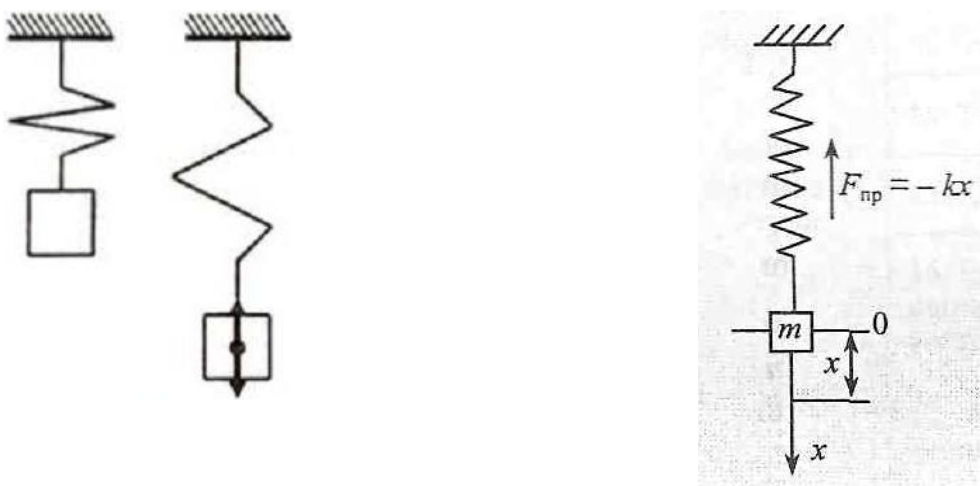


Рис. 4.1. Пружинний маятник

Якщо розтягнути пружину на відстань x (в положенні рівноваги $x=0$), прикладаючи до матеріальної точки силу F , то виникне пружна сила $F_{пр}$, величина якої прямопропорційна зміщенню частинки з положення рівноваги, а напрям протилежний до зміщення:

$$F_{пр} = -k \cdot x, \quad (4.1)$$

де k – жорсткість пружини (пружна стала). У цьому положенні діюча сила F врівноважується пружною силою $F_{пр}$ ($F = F_{пр}$):

$$m \cdot a = -k \cdot x, \quad (4.2)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -k \cdot x \quad \text{або} \quad m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k \cdot x, \quad (4.3)$$

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0. \quad (4.4)$$

Загальний розв'язок лінійного диференційного рівняння другого порядку відомий:

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4.5)$$

де A , ω , φ_0 – константи, причому $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Коливання, при яких фізична величина змінюється з часом за синусоїдним (або косинусоїдним) законом (рис. 4.2), називаються *гармонічними*.

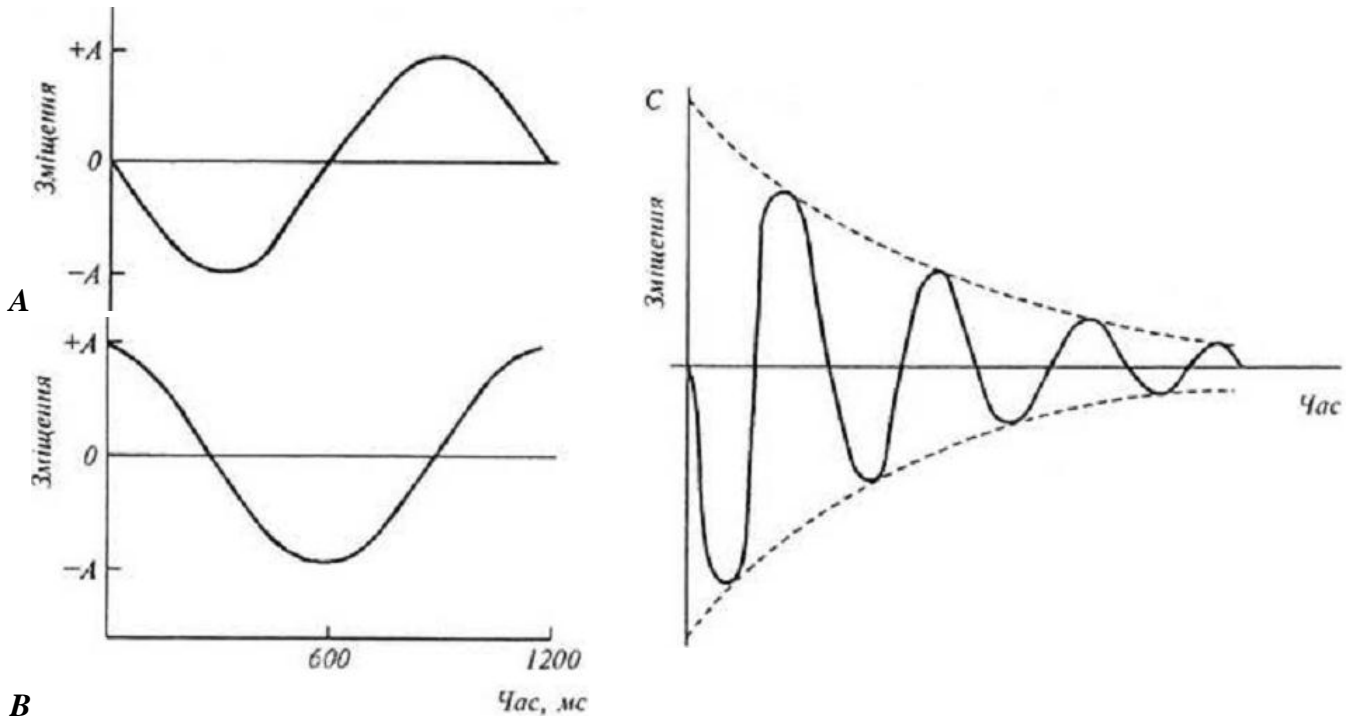


Рис. 4.2. Гармонічні коливання:

A – незгасаючі коливати, синусоїдний закон; *B* – незгасаючі коливання, косинусоїдний закон; *C* – загасаючі гармонічні коливання

4.2. Основні характеристики гармонічного коливання

У рівняння (4.5), що описує гармонічне коливання, входять такі характеристики:

A (від лат. *Amplitudo*) – *амплітуда коливання* (максимальне відхилення при коливанні);

$\omega t + \varphi_0$ – *фаза коливань* в момент часу *t*;

ω – *колова (циклічна) частота*;

φ_0 – *початкова фаза* (значення фази коливання в момент часу $t = 0$).

Найменший проміжок часу, за який відбувається одне повне коливання, називається *періодом коливань T* (від лат. *Tempus*). Період *T* пов'язаний з коловою частотою ω співвідношенням:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (4.6)$$

Величина, що дорівнює кількості коливань за одиницю часу, називається *частотою f* (від лат. *frequentia*). Частота *f* пов'язана з періодом *T* так:

$$T = \frac{1}{f}. \quad (4.7)$$

Одиниця вимірювання частоти [*f*] – Гц. Частота в 1 Гц відповідає такому коливальному рухові, коли за 1 с відбувається одне повне коливання.

На основі рівнянь (4.6) і (4.7) можна отримати співвідношення:

$$\omega = 2\pi \cdot f. \quad (4.8)$$

4.3. Енергія механічних гармонічних коливань

Рух матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання вздовж осі x , описується рівнянням (4.5). Тоді швидкість і прискорення матеріальної точки, яка коливається, визначається так:

$$v = \frac{dx}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) = v_{\max} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4.9)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = -a_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4.10)$$

де $A \cdot \omega = v_{\max}$, $A \cdot \omega^2 = a_{\max}$ – максимальні значення швидкості і прискорення, відповідно.

Процес коливання супроводжується переходом енергії із потенціальної в кінетичну і навпаки. Враховуючи формулу (4.9) для кінетичної та $k = m\omega^2$ (з $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$) і формулу (4.5) для потенціальної енергій матеріальної точки, отримаємо:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot [A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)]^2 = \\ &= \frac{mA^2\omega^2}{2} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_0); \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot m\omega^2 \cdot [A \sin(\omega t + \varphi_0)]^2 \\ &= \frac{mA^2\omega^2}{2} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (4.12)$$

Додавання рівнянь (4.11) і (4.12) дає змогу отримати вираз для *повної енергії механічних коливань*:

$$\begin{aligned} E &= E_k + E_p = \\ &= \frac{mA^2\omega^2}{2} \cdot [\cos^2(\omega t + \varphi_0) + \sin^2(\omega t + \varphi_0)] = \\ &= \frac{mA^2\omega^2}{2} = \frac{kA^2}{2}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Отже повна механічна енергія незгасаючих коливань стала і дорівнює максимальному значенню потенціальної або кінетичної енергії.

4.4. Згасаючі коливання

У реальних умовах завжди відбувається згасання коливань, яке полягає в зменшенні амплітуди коливання з часом. Коливання, амплітуда яких через втрати

енергії зменшується з часом, називаються *згасаючими*. Амплітуда коливань $A = A_0 e^{-\beta t}$ зменшується з часом за експоненціальним законом (рис. 4.3).

Рівняння згасаючих коливань має вигляд:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4.14)$$

де A_0 – амплітуда коливань у початковий момент часу $t=0$, β – коефіцієнт загасання коливань. Графік залежності $x = f(t)$ під час згасаючих коливань зображено на рис.4.2 і 4.3.

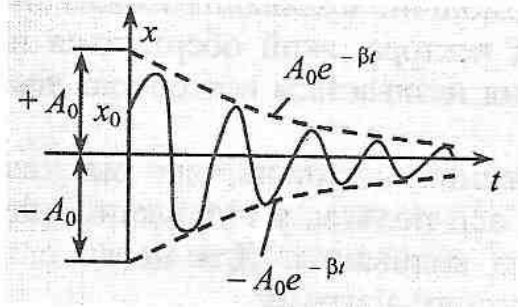


Рис.4.3. Графік залежності $x = f(t)$ згасаючих коливань

4.5. Вимушені коливання

Коливання називаються *вимушеними*, якщо вони виникають у будь-якій системі за змінного зовнішнього впливу. Для того, щоб система здійснювала незгасаючі коливання, необхідно діяти на неї силою F_b , що змінюється періодично за законом:

$$F_b = F_0 \cdot \sin \omega_b t, \quad (4.15)$$

де F_0 – амплітудне значення сили; ω_b – колова частота вимушених коливань; t – час.

Рівняння руху тіла, що коливається без будь-якого опору, має вигляд:

$$F + F_b = ma, \quad (4.16)$$

де F – зворотна сила.

З урахуванням того, що $F = -m \cdot \omega^2 \cdot x$ ($a = \frac{v^2}{x}$, $\omega = v \cdot x$), рівняння (4.16)

можна переписати так:

$$-m\omega^2 x + F_0 \cdot \sin \omega_b t = -m\omega_b^2 x. \quad (4.17)$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$x = \frac{F_0 \cdot \sin \omega_b t}{m \cdot (\omega^2 - \omega_b^2)} = B \sin \omega_b t. \quad (4.18)$$

Видно, що амплітуда вимушеного коливання

$$B = \frac{F_0}{m \cdot (\omega^2 - \omega_b^2)} \quad (4.19)$$

залежить від колових частот ω і ω_b . Амплітуда вимушених коливань B максимальна при $\omega = \omega_b$.

Явище різкого зростання амплітуди в момент збігу частоти ω_b збуджувальної сили з власною частотою ω коливань системи називається *резонансом*.

4.6. Біжуча хвиля

Біжуча хвиля може бути визначена як збурення, що рухається у просторі з перенесенням енергії. Розглянемо біжучу хвилю, синусоїдну за формою, що поширюється, починаючи з моменту часу $t=0$, зі швидкістю v вздовж осі Ox (рис. 4.4). Рівняння такої хвилі має вигляд:

$$y = y_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{x}{v} \omega\right) = y_0 \cdot \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right). \quad (4.20)$$

де y_0 – (амплітуда) величина зміщення від положення рівноваги, зумовленого коливальним рухом, що викликаний хвилею, яка дійшла в момент часу t до точки x ; ω – частота коливань.

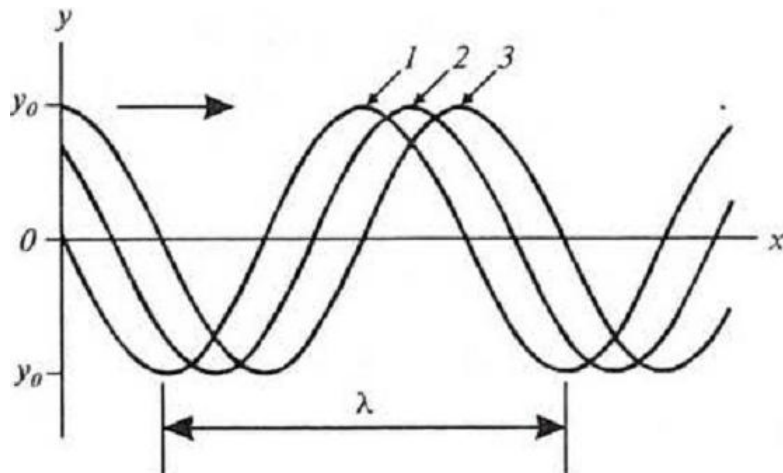


Рис. 4.4. Біжуча хвиля, як збурення, що рухається у просторі з перенесенням енергії: v – швидкість поширення біжучої хвилі; λ – довжина хвилі; 1, 2, 3 – послідовні переміщення хвилі

Відстань між двома найближчими точками, які коливаються в однаковій фазі, називають *довжиною хвилі*. Позначаючи її через λ , період коливань через T і лінійну частоту через $f = \frac{1}{T}$, можна записати:

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}, \quad f = \frac{v}{\lambda}. \quad (4.21)$$

Довжину хвилі можна визначити також як шлях, що його проходить хвиля протягом періоду коливань [це випливає з формули (4.21)] (рис 4.4). Узявши до уваги (4.21), запишемо рівняння (4.20) в інших поширених виглядах:

$$\begin{aligned} y &= y_0 \cdot \sin\left(2\pi f t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) = \\ &= y_0 \cdot \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = \\ &= y_0 \cdot \sin(\omega t - kx), \end{aligned} \quad (4.22)$$

де $\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = k$ – хвильове число.

4.7. Стояча хвиля

Розглянемо біжучу хвилю, що відбивається від поверхні і за цього змінює свою фазу на 180° . Таким чином, якщо рівняння біжучої хвилі, що падає на поверхню, має вигляд:

$$y_1 = y_0 \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (4.23)$$

то рівняння біжучої хвилі, що відбилася від поверхні, виглядатиме так:

$$y_2 = y_0 \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right). \quad (4.24)$$

Ці дві хвилі взаємодіють між собою, в результаті чого утворюється результуюча хвиля:

$$y = y_1 + y_2 = 2y_0 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T} \cdot \cos \frac{2\pi \cdot x}{\lambda}. \quad (4.25)$$

Особливістю стоячої хвилі є те, що частинки коливаються одночасно, у цьому разі утворюються області з максимальною амплітудою коливань (*спученості*, *пучності*) і області спокою (*вузли*). Відстань між сусідніми вузлами (або сусідніми пучностями) дорівнює половині довжини хвилі (рис. 4.5).

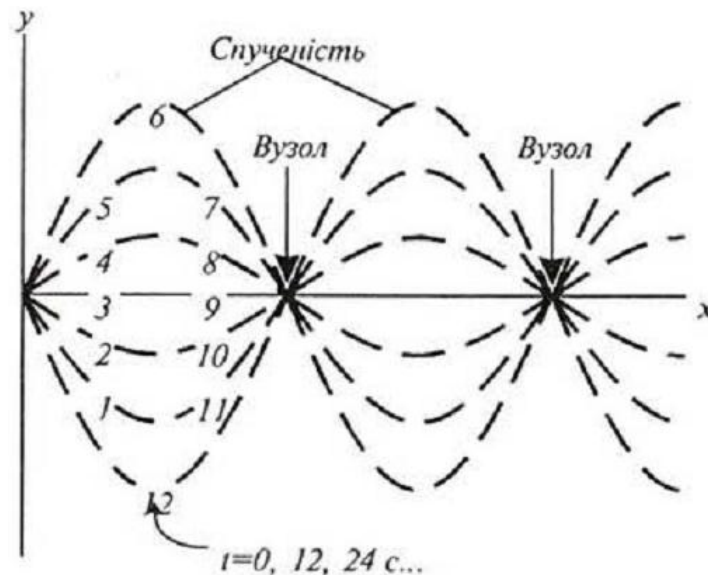


Рис. 4.5. Стояча хвиля (цифрами позначено моменти часу, які послідовно проходить частинка, що коливається)

Якщо $\cos \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} = \pm 1$, величина зміщення максимальна ($y = 2y_0$); значення x у цьому разі відповідає пучності; якщо $\cos \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} = 0$, то $y = 0$ і значення x відповідає вузлу.

4.8. Биття коливань

Розглянемо дві хвилі, що трохи відрізняються частотою і поширюються в одному напрямку. Під час спостереження поведінки цих двох хвиль у даній точці простору відбуваються *биття коливань* – періодичні коливання інтенсивності в даній точці завдяки накладанню двох хвиль з частотами, що трохи відрізняються.

Нехай рівняння двох коливань мають вигляд:

$$y_1 = y_0 \cdot \cos 2\pi f_1 t, \quad (4.26)$$

$$y_2 = y_0 \cdot \cos 2\pi f_2 t. \quad (4.27)$$

За накладання двох коливань результуюче коливання описується рівнянням:

$$y = y_1 + y_2 = y_0 \cdot (\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t). \quad (4.28)$$

Використовуючи тригонометричне співвідношення

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \cdot \cos \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right), \quad (4.29)$$

отримаємо:

$$y = 2y_0 \cdot \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \cdot \cos 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t. \quad (4.30)$$

Графік результуючого коливання наведено на рис. 4.6.

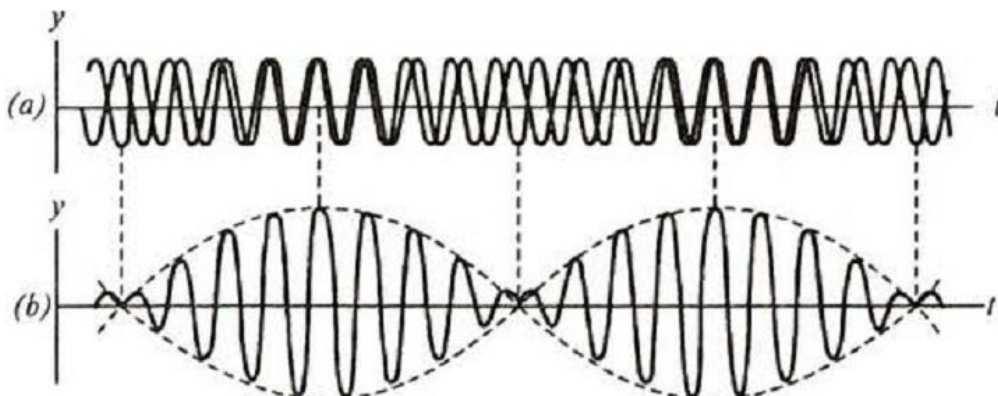


Рис. 4.6. Биття коливань

Таким чином, ефективна частота результуючого коливання дорівнює $\frac{f_1 + f_2}{2}$; максимальна амплітуда результуючих коливань має місце тоді, коли $\cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t = \pm 1$, тобто амплітуда результуючих коливань змінюється з частотою $\frac{f_1 - f_2}{2}$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке коливання?
2. Які коливання є вільними? вимушеними?
3. Які коливання називаються гармонічними?
4. Записати і пояснити рівняння гармонічного коливання.

5. Дати визначення амплітуди, фази і початкової фази гармонічного коливання.
6. Що таке період коливань? частота коливань?
7. Довести, що вираз (4.5) є розв'язком рівняння (4.4).
8. Вивести рівняння (4.13)
9. Які коливання називаються згасаючими? Навести рівняння і графік згасаючого коливання.
10. Що таке резонанс?
11. Яку хвилю називають біжучою? стоячою?

5. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

5.1. Ідеальний газ

Ідеальний газ – це спрощена модель реального газу, в якій допускається наступне:

- 1.) число молекул велике і розміри молекул набагато менші за відстані між ними;
- 2.) молекули підпорядковуються законам руху Ньютона, але індивідуальні молекули рухаються хаотично;
- 3.) зіткнення молекул між собою і зі стінками посудини абсолютно пружні;
- 4.) сили взаємодії між молекулами газу відсутні, крім протягом зіткнень;
- 5.) газ складається з ідентичних молекул;
- 6.) газ перебуває в тепловій рівновазі зі стінками посудини.

Розглянемо газ масою m , який характеризується об'ємом V , тиском p і температурою T (від лат. *Temperātūra*). Зв'язок між цими параметрами називається *рівнянням стану*. Реальні гази добре описуються моделлю класичного ідеального газу, якщо вони достатньо розріджені.

Рівняння стану ідеального газу має вигляд:

$$pV = \nu RT, \quad (5.1)$$

де $\nu = \frac{m}{M}$ – кількість молей речовини; R (від фр. *Rapport*) – універсальна газова стала ($= 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$); M – молярна маса речовини; m – маса газу.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газу:

$$p = \frac{1}{3} \cdot nm_0\bar{v}^2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m_0\bar{v}^2, \quad (5.2)$$

де N – кількість молекул в посудині об'ємом V ($n = \frac{N}{V}$ – концентрація молекул); \bar{v}^2 – середня квадратична швидкість руху молекул; m_0 – маса однієї молекули.

5.2. Ізопроеци

Ізопроеци називається процес, при якому один з параметрів стану (p , V або T) залишаються сталими, а два інших змінюються при незмінній масі ($m = \text{const}$).

Процес, що відбувається в фізичній системі при постійній температурі, називається *ізотермічним*:

$$T = \text{const}, \quad (5.3)$$

$$pV = \text{const}. \quad (5.4)$$

Графік ізотермічного процесу в координатах (p , V) являє собою гіперболу, що має назву *ізотерма* (рис. 5.1).

Процес, що відбувається в фізичній системі при постійному зовнішньому тиску, називається *ізобарним*:

$$p = \text{const}, \quad (5.5)$$

$$\frac{V}{T} = \text{const.} \quad (5.6)$$

Графік ізобарного процесу в координатах (p, V) або *ізобара* наведено на рис. 5.2.

Процес, що відбувається в фізичній системі при постійному об'ємі, називається *ізохорним*:

$$V = \text{const.}, \quad (5.7)$$

$$\frac{p}{T} = \text{const.} \quad (5.8)$$

Графік ізохорного процесу в координатах (p, V) або *ізохора* наведено на рис. 5.3.

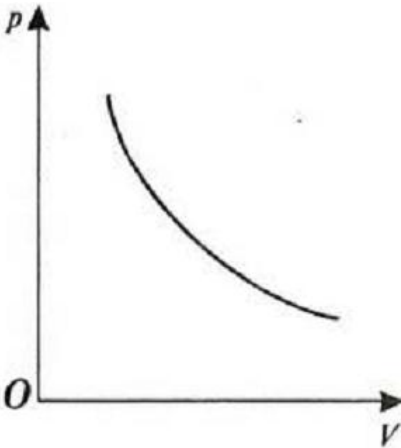


Рис. 5.1. Графік ізотермічного процесу в координатах (p, V)

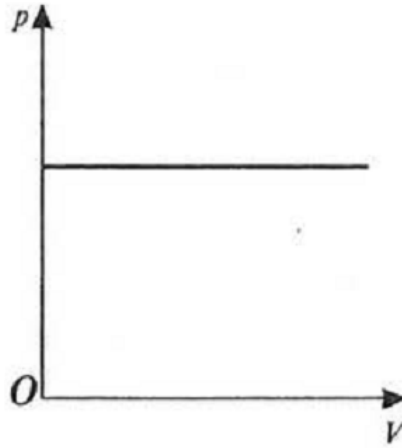


Рис. 5.2. Графік ізобарного процесу в координатах (p, V)

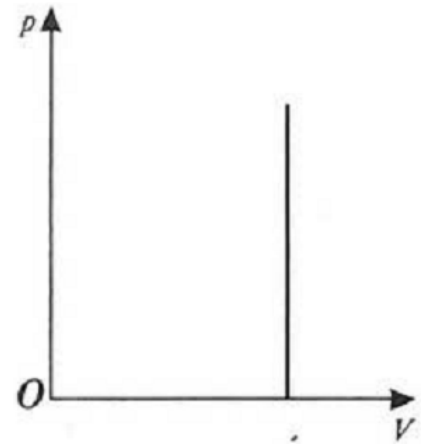


Рис. 5.3. Графік ізохорного процесу в координатах (p, V)

5.3. Випаровування та конденсація

Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають *пароутворенням*, а зворотний процес, тобто перехід з газоподібного стану в рідкий, – *конденсацією*.

Для перетворення рідини в пару потрібно надати певну кількість теплоти, яку називають *теплотою пароутворення* (Q від англ. *Quantity of heat*), що визначається за виразом:

$$Q = r \cdot m, \quad (5.9)$$

де r – питома теплота пароутворення; m – маса тіла.

Пароутворення відбувається двома способами – випаровуванням і кипінням.

Випаровування – це пароутворення лише з поверхні рідини, під час якого рідину залишають найшвидші молекули, завдяки чому рідина охолоджується. У відкритій ємності рідини випаровується, доки вся не перетвориться в пару. Якщо ж рідина міститься в закритій ємності, рано чи пізно настає *динамічна рівновага* – стан, при якому число молекул, що залишають рідину, дорівнює в середньому числу молекул пари, які повернулися за той же час в рідину.

Пароутворення, що відбувається одночасно як з поверхні, так і з усього об'єму рідини, називають *кипінням*. На відміну від випаровування, що відбувається за будь-якої температури, кипіння починається лише при певній температурі – *температурі кипіння*.

5.4. Реальний газ

Газ, властивості якого (на відміну від ідеального газу) залежать від взаємодії молекул, називається *реальним*.

Молекули реального газу мають власний об'єм, завдяки чому фактичний вільний об'єм, в якому можуть рухатися молекули, становитиме $V - b$, де b – об'єм, що займають самі молекули. Крім того, дія сил притягання зумовлює збільшення тиску на величину $p' = \frac{a}{V^2}$, де a – константа. Таким чином, *рівняння стану реального газу (рівняння Ван-дер-Ваальса)* має вигляд:

$$(p + p') \cdot (V - b) = RT. \quad (5.10)$$

Ізотерми реального газу наведено на рис. 5.4. При високих температурах ізотерма реального газу не відрізняється від ізотерми ідеального газу. При певній температурі $T_{кр}$ (*критична температура*) на ізотермі спостерігається перегин. Під штриховою лінією розміщується область двофазних станів $P+\Pi$ (рідина і насичена пара), ліворуч від неї – область рідкого стану P , а праворуч – область пари Π . Пара відрізняється від інших газоподібних станів Γ тим, що при ізотермічному стиску зазнає процесу скраплення. Газ Γ при температурі, вищій за критичну, не може бути перетворений у рідину.

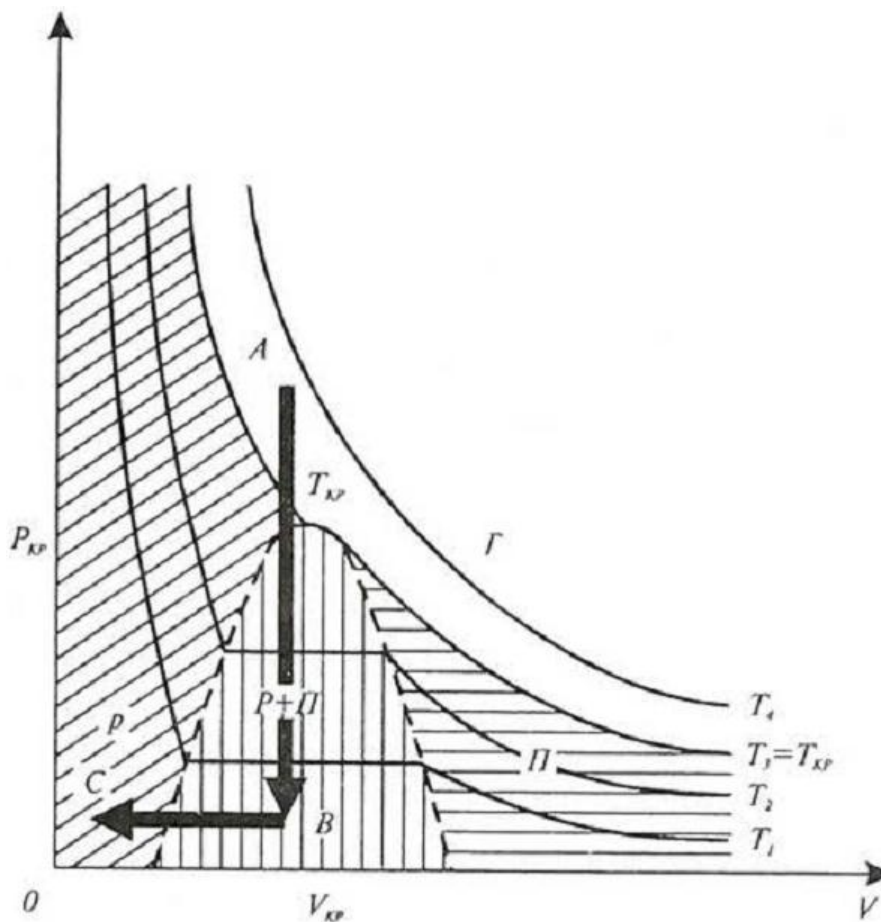


Рис. 5.4. Ізотерми реального газу (пояснення в тексті)

Ізохорний перехід із точки A в точку B і далі ізобарний перехід із точки B в точку C дають можливість утворити рідину з газу. В цьому полягає *принцип скраплення газів*.

5.5. Вологість повітря

Вплив вологості на живі організми.

Вологість відіграє значну роль у життєдіяльності. Втрати води живим організмом відбуваються з кінцевими продуктами обміну речовин. В процесі живлення та пиття організм забезпечується водою. Чим вища відносна вологість, тим менша різниця між зовнішнім та внутрішнім водними середовищами **тварини** і тим, відповідно, менша потреба в зниженні втрат води або в протидії їм. Істотно впливає вологість на поширення наземних **тварин**, які через спосіб підтримання водного балансу залишаються «водними» – земноводних, наземних ракоподібних, нематод, дощових черв'яків, молюсків тощо.

Характеристики вологості повітря.

Вода може існувати в атмосфері в трьох фазах – рідкій, газоподібній і твердій. Газоподібна фаза води називається *парою*. Пара, що перебуває в термодинамічній рівновазі з рідиною (тобто в стані, коли число молекул, що переходить із рідини в пару, дорівнює числу молекул, що повертаються в рідину за одиницю часу), називається *насиченою*.

Під *вологістю* повітря розуміють вміст водяної пари у повітрі. Повітря, що містить водяну пару, називають *вологим*, а те, що не містить – *сухим*. Розглянемо основні параметри вологості.

Абсолютна вологість повітря a – кількість водяної пари у грамах, що знаходиться в 1 м^3 повітря ($[a] - \text{г} \cdot \text{м}^{-3}$).

Пружність (парціальний тиск) водяної пари e – тиск, який матиме водяна пара, що знаходиться в газовій суміші, якщо б вона одна займала об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій же температурі.

Абсолютна вологість a зв'язана з пружністю водяної пари e і абсолютною температурою T співвідношенням:

$$a = 217 \cdot \frac{e}{T}, \quad (5.11)$$

де e вимірюється в гектопаскалях.

Пружність насиченої пари E – граничне значення тиску, що відповідає рівновазі між парою і водою, тобто насиченому стану повітря при даній температурі. Пружність насиченої пари залежить від температури.

Відносна вологість повітря r – відношення пружності водяної пари e до пружності насиченої пари E при даній температурі:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100 \% . \quad (5.12)$$

Дефіцит вологості d – різниця між пружністю насиченої пари E і пружністю водяної пари e при даній температурі:

$$d = E - e. \quad (5.13)$$

Точка роси T_d – температура, при якій повітря, якщо його охолодити при сталому тиску, стає насиченою водяною парою.

Масова частка вологи q – відношення маси водяної пари до маси вологого повітря в тому ж об'ємі ($[q]$ – $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$):

$$q = 0,622 \cdot \frac{e}{p - 0,378 \cdot e} = \frac{m}{1 - m}. \quad (5.14)$$

де m – масове відношення вологи.

Масове відношення вологи m – кількість водяної пари в сухому повітрі ($[m]$ – $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$):

$$m = 0,622 \cdot \frac{e}{p - e} = \frac{q}{1 - q}. \quad (5.15)$$

Зв'язок пружності насиченої пари E з абсолютною температурою T має вигляд:

$$\lg E = 9,4 - \frac{2345}{T}, \quad (5.16)$$

де E – в мілібарах (гектопаскалях); T – в кельвінах.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке ідеальний газ? Написати рівняння стану ідеального газу.
2. Який процес називають ізотермічним? ізобарним? ізохорним?
3. Які й вигляд мають графіки: ізобарного процесу в координатах (V, T) ? ізохорного процесу в координатах (p, T) ?
4. Дати визначення процесам пароутворення та конденсації. Яка різниця між випаровуванням і кипінням?
5. Яку пару називають насиченою?
6. Що таке реальний газ? Написати рівняння стану реального газу.
7. Який фізичний зміст констант a і b у рівнянні Ван-дер-Ваальса.
8. Які термодинамічні процеси в реальному газі слід здійснити, щоб перейти від газу до рідини?
9. Що називають вологістю повітря? Яке повітря називають вологим; сухим?
10. Що таке пружність водяної пари?
11. Що таке пружність насиченої водяної пари?
12. Дати визначення абсолютній і відносній вологості.
13. Назвати одиниці вимірювання абсолютної і відносної вологості.
14. Що називають дефіцитом вологості?
15. Що таке масова частка вологи?
16. Що таке точка роси?

6. ТЕРМОДИНАМІКА

Термодинаміка – розділ фізики, що вивчає найбільш загальні властивості макроскопічних фізичних систем, які перебувають у стані термодинамічної рівноваги, та процеси переходу між цими системами.

6.1. Температура і теплове розширення тіл

Температура.

Температура – фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи. Кількісне вимірювання температури можливе завдяки впровадженню температурних шкал. Одна з них, *міжнародна стоградусна температурна шкала (Цельсія)*, використовує як $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуру плавлення льоду і як $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуру кипіння води при нормальному ($101325\text{ Па} = 760\text{ мм рт. ст.}$) тиску. Інша – *термодинамічна температурна шкала (Кельвіна)* – використовує потрійні точки речовин – точки на діаграмі стану, що відповідають рівноважному існуванню трьох фаз речовини. Так, потрійна точка води дорівнює $273,16\text{ К}$, а температура кипіння води становить $373,15\text{ К}$. Між двома шкалами існує зв'язок:

$$t\text{ }^{\circ}\text{C} = T - 273,15. \quad (6.1)$$

Теплове розширення тіл.

Будь-які тіла складаються з атомів. Розглянемо кристалічне тіло, яке можна подати як механічну модель у формі куба, складеного з атомів. Відстань між атомами близько 10^{-10} м . Кожний атом при звичайних температурах коливається відносно свого положення з амплітудою $\approx 10^{-11}\text{ м}$ і частотою $\approx 10^{13}\text{ Гц}$. Звичайно з підвищенням температури амплітуда коливань атомів збільшується і середня відстань між ними також збільшується. Завдяки цьому тверде тіло набуває *теплого розширення* при зростанні температури, що супроводжується відповідним зростанням будь-яких розмірів (довжини, ширини, товщини). Слід зауважити, що це зростання залежить *лінійно* від температури.

Нехай тіло має довжину l при деякій температурі. При збільшенні температури на величину ΔT довжина тіла збільшується на Δl . Зв'язок між усіма цими параметрами описується рівнянням:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T, \quad (6.2)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення. Одиниця вимірювання коефіцієнта лінійного розширення $[\alpha] - \text{K}^{-1}$.

Оскільки лінійні розміри тіла змінюються з температурою, відбувається відповідна зміна й об'єму тіла, що описується рівнянням:

$$\Delta l = \beta \cdot V \cdot \Delta T = 3\alpha \cdot V \cdot \Delta T, \quad (6.3)$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення. Типові значення коефіцієнтів α і β наведено в Додатку В.

Рідини теж збільшують свій об'єм при зростанні температури; для ізотропних твердих тіл (для яких коефіцієнт лінійного розширення однаковий у всіх напрямках) коефіцієнт об'ємного розширення майже втричі більший за коефіцієнт лінійного розширення ($\beta \approx 3\alpha$). Особливе місце серед рідин займає вода, густина якої

залежить від температури, причому ця залежність характеризується максимумом при температурі близько 4 °С (рис. 6.1).

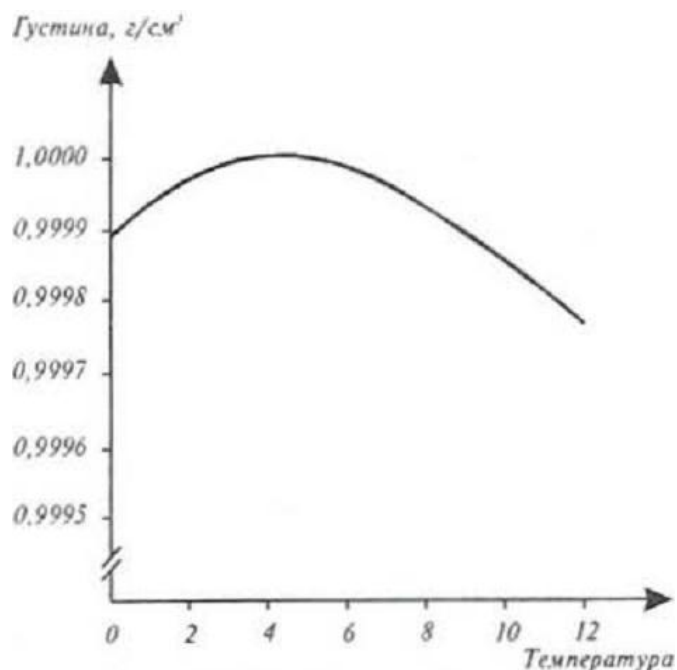


Рис. 6.1. Залежність густини води від температури

6.2. Параметри термодинамічної системи

Термодинамічна система – сукупність макроскопічних тіл, що можуть взаємодіяти між собою та з іншими тілами (зовнішнім середовищем) шляхом обміну з ними енергією та речовиною.

Є три типи термодинамічних систем:

1. *Ізольована система*, яка не обмінюється із зовнішнім середовищем ні енергією, ні речовиною;
2. *Замкнута система*, яка обмінюється з зовнішнім середовищем енергією, але в ній відсутній обмін речовиною;
3. *Відкрита система*, в якій відбувається обмін із зовнішнім середовищем енергією, речовиною і взагалі інформацією.

Будь-яка термодинамічна система характеризується *термодинамічними параметрами* – такими як тиск p , об'єм V , температура T , маса m , молярна концентрація n . Сукупність цих параметрів визначає *термодинамічний стан* системи. Зміна хоча б одного з параметрів призводить до зміни термодинамічного стану системи. Якщо параметри термодинамічної системи мають цілком певні значення і не змінюються з часом при незмінних зовнішніх умовах, то така система перебуває у *рівноважному стані*. Перехід системи з одного стану в інший, що супроводжується зміною термодинамічних параметрів, називається *термодинамічним процесом*.

6.3. Внутрішня енергія системи

Внутрішня енергія U (від лат. *Unio*) включає енергію хаотичного (теплого) руху всіх мікрочастинок системи (молекул, атомів, іонів) та енергію взаємодії цих частинок. Внутрішня енергія характеризує стан термодинамічної системи, тобто є *функцією стану системи*.

6.4. Теплоємність та питома теплоємність

Коли тіло має температуру, відмінну від температури навколишнього середовища, воно або віддає, або набуває теплової енергії, достатньої для досягнення теплової рівноваги або стаціонарного стану.

Теплоємність тіла C (від англ. *heat capacity*) – величина, чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надавати даному тілу для нагрівання на 1 К:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (6.4)$$

де Q – кількість теплоти, передана тілу для нагрівання на ΔT градусів. Одиниця вимірювання теплоємності [C] – Дж·К⁻¹ або Дж/К.

Питома теплоємність речовини c – величина, чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надати даній речовині масою 1 кг для нагрівання на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}. \quad (6.5)$$

Одиниця вимірювання питомої теплоємності [c] – Дж·кг⁻¹·К⁻¹ або Дж/(кг·К).

Зв'язок теплоємності тіла C з питомою теплоємністю речовини c виражається формулою:

$$C = c \cdot m. \quad (6.6)$$

Кількість теплоти, необхідна для зміни температури тіла масою m на величину ΔT , визначається так:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (6.7)$$

де c – питома теплоємність. Значення питомої теплоємності речовин і деяких біологічних тканин наведено в Додатку В.

6.5. Робота і енергія

Обмін енергією між закритою термодинамічною системою і зовнішніми тілами може здійснюватися двома різними способами: *шляхом виконання роботи* та завдяки *теплообміну*.

Енергія, що передається при цьому термодинамічній системі зовнішніми тілами, називається *роботою*, яка виконується над системою. Енергія, яка передається системі зовнішніми тілами шляхом теплообміну, називається *теплотою*, що отримується системою від зовнішнього середовища; цей термін може бути використаний для опису переносу енергії з одного місця в інше. Одиниці вимірювання теплоти [Q] – Дж.

Розглянемо циліндр, заповнений газом і обладнаний поршнем. В стані рівноваги газ утворює тиск p на поршень; під час руху на відстань dx виконується робота:

$$dA = F \cdot dx = p \cdot S \cdot dx = p \cdot dV, \quad (6.8)$$

де S – площа поршня; F – сила, з якою газ діє на поршень.

Загальна робота, що виконується поршнем під час зміни об'єму від V_1 до V_2 , дорівнює:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV. \quad (6.9)$$

Робота, яку виконує газ при розширенні від початкового до кінцевого стану, дорівнює площі під кривою в системі координат p, V (рис. 6.2). Причому, робота, що виконується системою, залежить від процесу, в якому бере участь система від початкового до кінцевого стану (рис. 6.3). Те ж саме можна сказати і про теплоту.

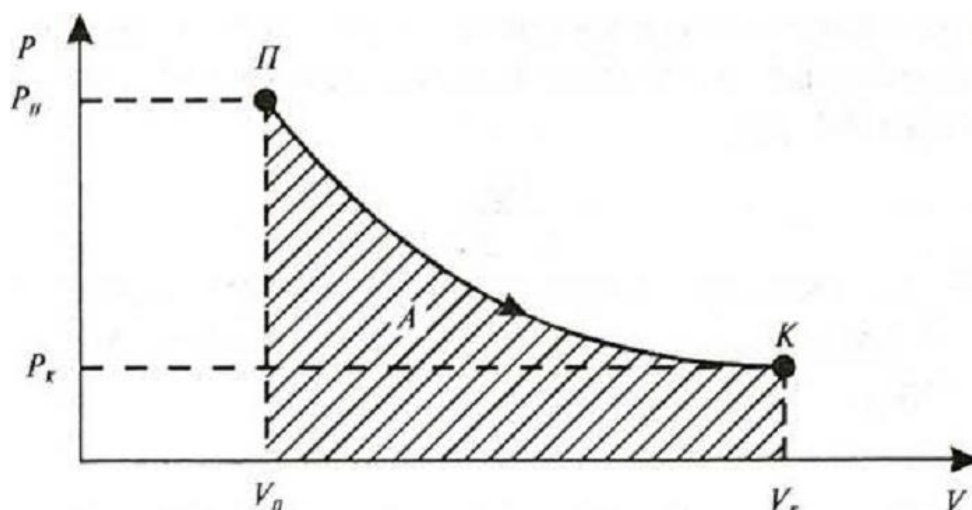
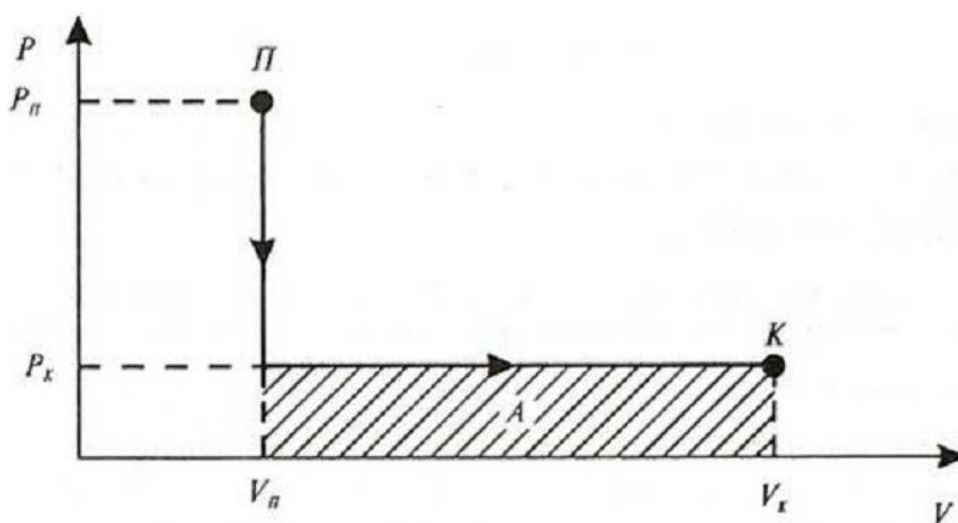


Рис. 6.2. Робота, яку виконує газ при розширенні



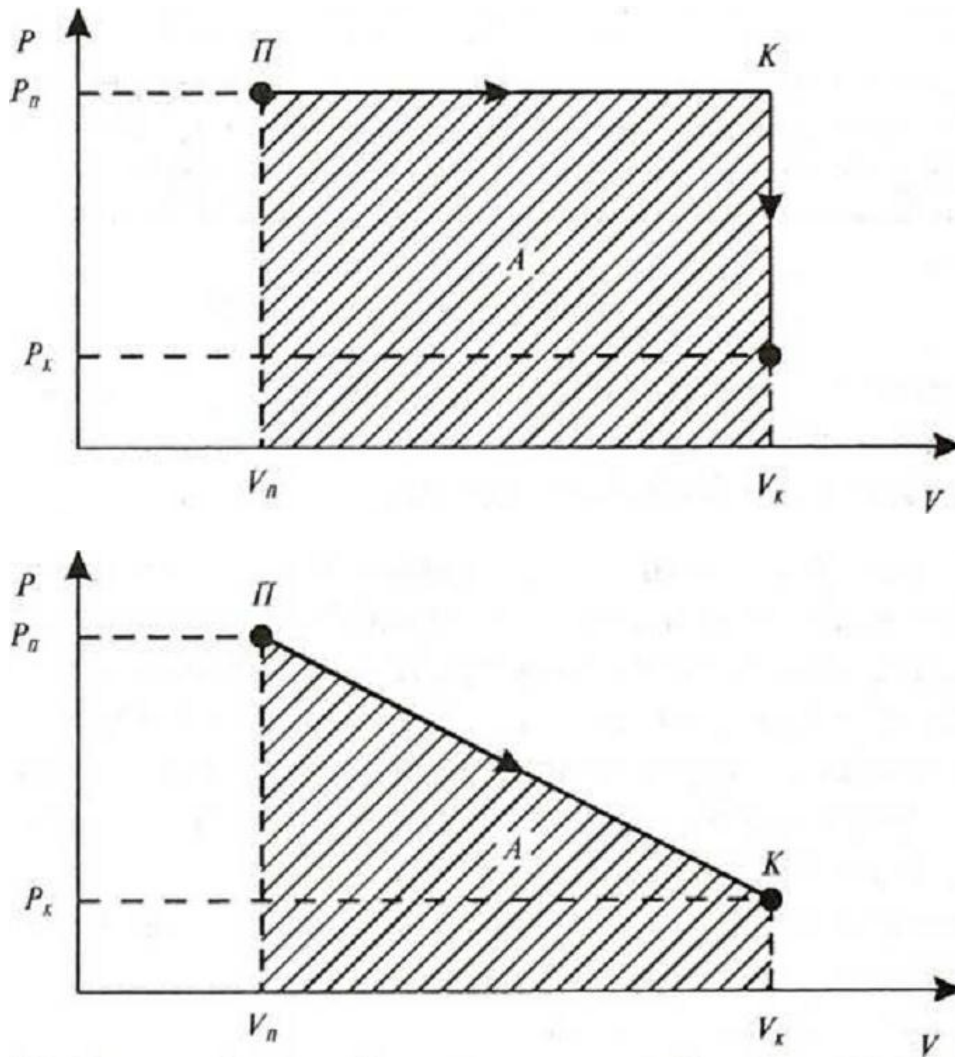


Рис. 6.3. Залежність роботи, виконуваної газом при розширенні, від процесу, в якому бере участь система

6.6. Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки являє собою узагальнення закону збереження енергії і враховує можливі зміни внутрішньої енергії.

Розглянемо термодинамічну систему, що перебуває в процесі переходу від початкового стану до кінцевого, під час якого теплота Q поглинається (або виділяється) і робота A виконується системою (або над системою). Прикладом такої термодинамічної системи може бути газ, що переходить з початкового стану p_n, V_n до кінцевого стану p_k, V_k . Якщо вимірювати різницю $Q - A$ на різних етапах даного термодинамічного процесу, можна помітити, що вона не змінюється протягом всього термодинамічного процесу. Отже, величина $Q - A$ визначається повністю початковим і кінцевим станами; називається ця величина *зміною внутрішньої енергії системи* ΔU :

$$\Delta U = U_k - U_n = Q - A. \quad (6.10)$$

Тут $A > 0$, коли робота виконується над системою, і $A < 0$, коли робота виконується системою проти зовнішніх сил.

Перехід системи з одного стану в інший супроводжується зміною ΔU внутрішньої енергії. Зміну ΔU внутрішньої енергії можна оцінювати шляхом вимірювання теплоти Q , що поглинається або виділяється системою, та виконаною роботою A . На основі останнього рівняння можна сформулювати перший закон термодинаміки: *теплота, що надається системі, витрачається на зміну внутрішньої енергії системи та на виконання системою роботи проти зовнішніх сил*

$$\Delta U = Q \pm A. \quad (6.11)$$

Коли система набуває нескінченно малих змін стану, перший закон термодинаміки записується так:

$$dU = dQ \pm dA. \quad (6.12)$$

(В літературі можна зустріти таку форму запису першого закону термодинаміки як $dU = \delta Q \pm \delta A$, де символи δ означають, що теплота Q і робота A не є функціями стану і, отже, не можуть бути повними диференціалами).

Розглянемо кілька спеціальних випадків.

1. *Ізольована система* не взаємодіє з навколишнім середовищем; тепловий потік відсутній ($Q=0$), робота дорівнює нулю ($A=0$); отже, $\Delta U=0$, тобто внутрішня енергія ізольованої системи залишається сталою ($U = \text{const}$).

2. *Циклічний процес*, що починається з одного стану і закінчується тим самим станом, характеризується зміною внутрішньої енергії $\Delta U = 0$, отже, $Q = A$.

Застосування першого закону термодинаміки до певних термодинамічних процесів.

1. *Адіабатичний процес* – термодинамічний процес, при якому система не обмінюється теплотою з навколишнім середовищем. Для такої ситуації $dQ = 0$, отже $dU = -dA$.

2. *Ізобарний процес* проходить при сталому тиску ($p = \text{const}$). Під час цього процесу відбувається передача теплоти і виконання роботи, що визначається добутком тиску на зміну об'єму, а саме: $A = p \cdot (V_2 - V_1)$.

3. *Ізохорний процес* відбувається при сталому об'ємі ($V = \text{const}$). Робота при такому процесі дорівнює нулю, отже, з першого закону термодинаміки виходить, що $\Delta U = Q$.

4. *Ізотермічний процес* проходить при сталій температурі ($T = \text{const}$). Внутрішня енергія ідеального газу залежить тільки від температури; отже, для ізотермічного процесу ідеального газу маємо $\Delta U = 0$.

6.7. Ентальпія. Закон Гесса

При дослідженні процесів, що відбуваються при сталому тиску ($p = \text{const}$), доцільно замість внутрішньої енергії U використовувати іншу функцію стану, яка буде добре описувати термодинамічну систему. Пригадаємо вираз для роботи при зміні об'єму при ізобаричному процесі:

$$A = p \cdot \Delta V. \quad (6.13)$$

З врахуванням цього виразу можна записати рівняння для першого закону термодинаміки так:

$$Q = \Delta U + A = \Delta U + p \cdot \Delta V = \Delta(U + p \cdot V) = \Delta H. \quad (6.14)$$

Тут функція $H = U + p \cdot V$ (від англ. *Heat contents*) називається *ентальпією*. Як і внутрішня енергія, ентальпія є також функцією стану термодинамічної системи.

Розглянемо, наприклад, хімічну реакцію як термодинамічний процес. Якщо під час реакції тепло поглинається з навколишнього середовища, то $\Delta H > 0$, і навпаки.

Закон Гесса: *тепловий ефект Q хімічної реакції не залежить від шляху реакції від вихідних речовин до продуктів реакції, а визначається лише різницею ентальпій кінцевих і початкових речовин*

$$Q = \sum H_k - \sum H_n. \quad (6.15)$$

Тут $\sum H_k$ і $\sum H_n$ – сума ентальпій продуктів реакції та вихідних речовин відповідно.

6.8. Тепловий обмін

Обмін енергією між закритою термодинамічною системою і зовнішніми тілами шляхом теплообміну здійснюється завдяки теплопровідності, конвекції та тепловому випромінюванню.

Теплопровідність – перенесення тепла від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, що приводить до вирівнювання температури.

Закон Фур'є: *кількість перенесеного шляхом теплопровідності тепла прямопропорційна градієнту температури*

$$\Delta Q = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta t, \quad (6.16)$$

де ΔQ – кількість теплоти, що переноситься, λ – коефіцієнт теплопровідності ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), S – площа, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ – градієнт температури, Δt – проміжок часу. Типові значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин наведено в Додатку В.

Температуропровідність χ – параметр, що характеризує швидкість зміни температури в нестационарних теплових процесах; є мірою теплоінерційних властивостей речовини. Чисельно дорівнює відношенню коефіцієнта теплопровідності речовини до добутку його питомої теплоємності при сталому тиску на густину:

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}. \quad (6.17)$$

Одиниця вимірювання температуропровідності $[\chi] = \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ або $\text{м}^2/\text{с}$.

Конвекція – процес теплообміну, що супроводжується перемішуванням нагрітих і холодних шарів рідини або газів.

6.9. Тепловий двигун

Тепловий двигун – це пристрій, що перетворює теплову енергію в інші форми енергії (наприклад, в механічну). Тепловий двигун складається з таких основних компонентів:

1.) *робочого тіла* (пари, газу), яке, нагріваючись при згорянні палива і розширюючись, здатне виконати роботу;

2.) *нагрівача* – тіла або середовища з температурою, вищою, ніж її має робоче тіло;

3.) *холодильника* – тіла або середовища з температурою, нижчою, ніж у робочого тіла.

Необхідною умовою роботи теплового двигуна є використання *колового процесу (циклу)*, тобто замкненого термодинамічного процесу, в результаті якого система повертається до початкового стану. Схему теплового двигуна наведено на рис. 6.4.

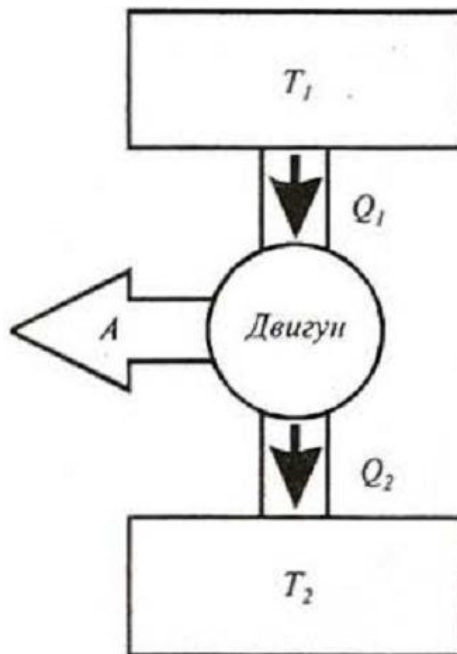


Рис. 6.4. Схема теплового двигуна

Ефективність роботи теплового двигуна характеризується його *коефіцієнтом корисної дії (ККД) η* , що дорівнює відношенню кількості теплоти, перетвореної двигуном у механічну роботу A , до кількості теплоти Q_1 , отриманої від нагрівача:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (6.18)$$

де Q_2 – кількість теплоти, яку робоче тіло віддає холодильнику ($Q_2 > 0$).

На практиці всі теплові двигуни перетворюють лише незначну частину поглинутої теплоти в механічну роботу. Так, ККД двигуна внутрішнього згорання становить близько 25 %, дизельного двигуна – від 35 до 40 %.

6.10. Цикл Карно

Оборотним називають процес переходу термодинамічної системи з одного стану в інший, що допускає можливість повернення системи у початковий стан через ту ж саму послідовність проміжних станів, що й у прямому процесі, але які відбуваються у зворотному порядку (рис. 6.5).

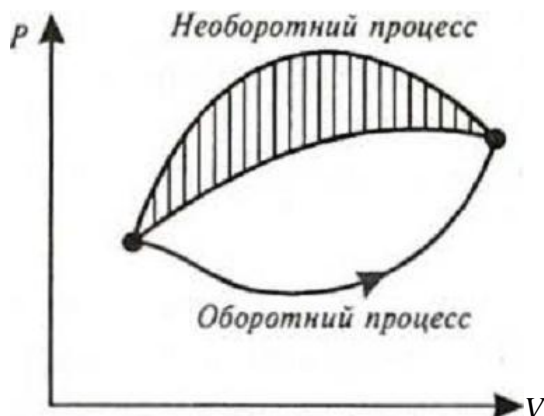


Рис. 6.5. Графіки оборотного і необоротного процесів

Необоротним називають процес, який може мимовільно відбуватися лише в одному певному напрямку. До необоротних процесів можна віднести дифузію, теплопровідність, в'язку течію тощо, тобто процеси, при яких відбувається спрямоване просторове перенесення речовини, теплоти, імпульсу. Всі необоротні процеси є *нерівноважними*. Якщо в термодинамічній системі існують градієнти концентрацій, температури або швидкостей, то нерівноважні процеси будуть сприяти встановленню рівноваги.

Усі реальні процеси в природі супроводжуються втратами енергії є необоротними. Процес теплообміну внаслідок кінцевої різниці температур також є необоротним. Термодинамічні функції стану системи (такі як внутрішня енергія U , ентальпія H , ентропія S тощо) за колових процесів знову набувають первісних значень; отже їх зміни при колових процесах дорівнюють нулю ($\Delta U = 0$, $\Delta H = 0$, $\Delta S = 0$ тощо).

Розглянемо ізотермічний процес (рис. 6.6а). Робота A , що виконується системою під час її розширення при постійній температурі T_1 (процес AB), визначається площею фігури $ABCD$. Для повернення системи у вихідний стан (якщо, наприклад, стискувати її ізотермічно при тій же температурі) необхідно затратити роботу ($-A$), яка дорівнює роботі A при розширенні (процес BA). Робота $-A$, що виконується системою при стисненні системи при постійній температурі T_1 , визначається тією ж самою площею фігури $ABCD$ (рис. 6.6 б). Сумарна робота під час прямого (AB) і зворотного (BA) термодинамічних процесів дорівнює нулю. Для того, щоб отримати корисну роботу, треба «зійти» з ізотерми AB . Це можна зробити за адіабатичним процесом BK шляхом переходу на іншу ізотерму T_2 (рис. 6.6в). Робота, що виконується системою під час прямого процесу (ABK), що складається з ізотермічного і адіабатичного розширень системи, визначається площею фігури $ABKMNA$; робота, що виконується над системою під час зворотного процесу (KLA), визначається площею фігури $ALKMNA$ (рис. 6.6г).

Коловий процес, що складається з двох ізотермічних і двох адіабатичних процесів, і в якому відбувається перетворення теплоти в роботу, називається *циклом Карно*. Корисна робота, що отримується протягом циклу, графічно зображується площею фігури *ABKLA* (рис. 6.6д).

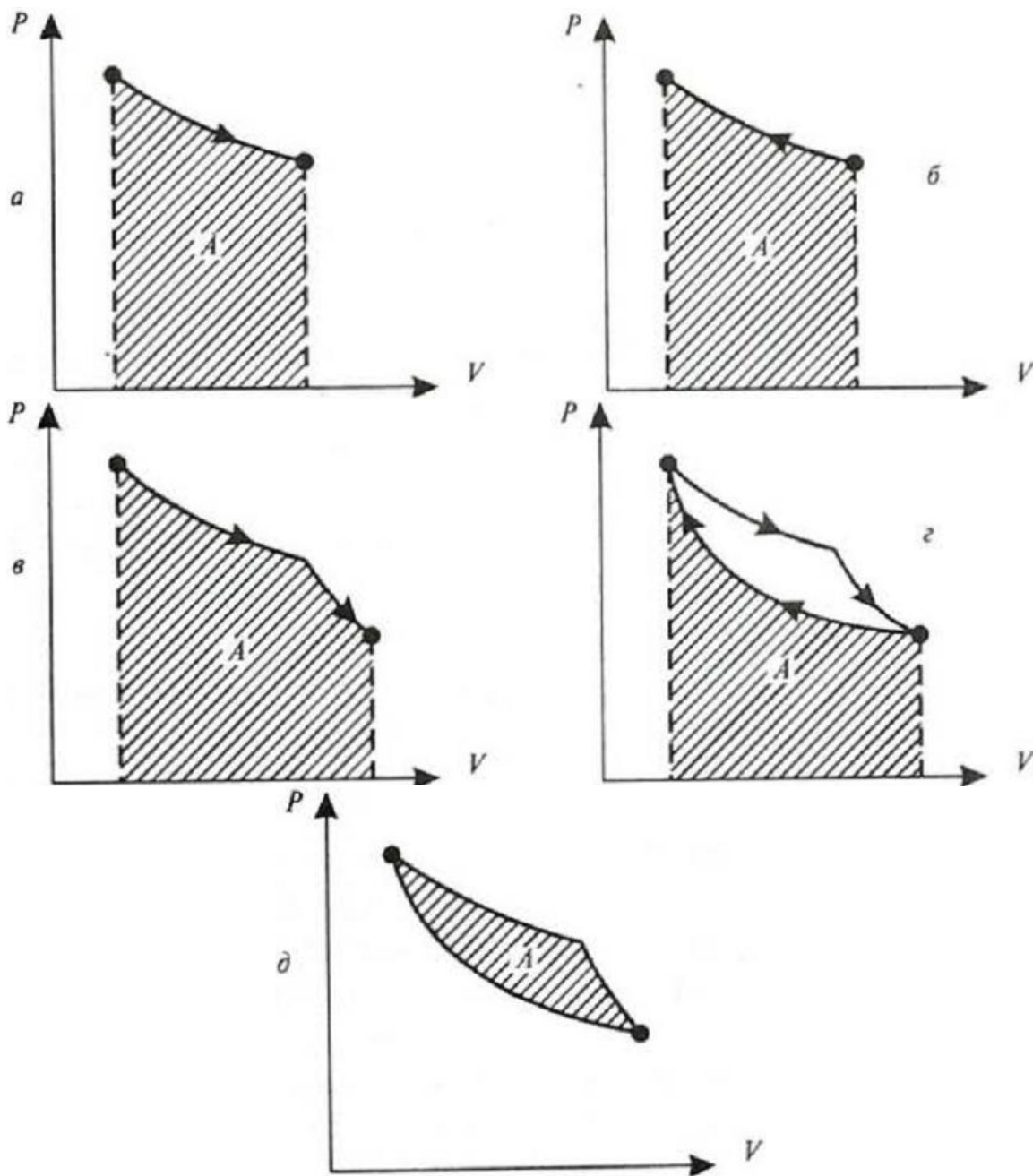


Рис. 6.6. Цикл Карно (пояснення в тексті)

Під час колового процесу система може отримувати теплоту (Q_1) і віддавати її (Q_2); з урахуванням цього вводять поняття *термічного коефіцієнта корисної дії* для колового процесу:

$$\eta_k = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (6.19)$$

З іншого боку, термічний коефіцієнт корисної дії не залежить від природи робочого тіла і визначається лише температурами T_1 нагрівача і T_2 холодильника:

$$\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6.20)$$

6.11. Другий закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки виражає загальний закон збереження і перетворення енергії, але він не здатний визначити напрям перебігу процесів.

Нагадаємо, що всі реальні процеси мають переважні напрями. Наприклад, тепловий потік прямує від нагрітого тіла до холодного, яке перебуває з ним у контакті, але не навпаки. Поява другого закону термодинаміки зумовлена необхідністю відповісти на запитання, які процеси в природі можливі, а які – ні.

Другий закон термодинаміки має кілька формулювань:

1. Р. Клаузіус, 1850 р.: *неможливий процес, єдиним результатом якого є передача теплоти від холодного тіла до гарячого;*

2. У. Томсон, 1851 р.: *неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання роботи завдяки охолодженню теплового резервуара.*

На рис. 6.7 наведено графічні ілюстрації теплових двигунів, можливість або неможливість дії яких диктується другим законом термодинаміки. Другому закону термодинаміки відповідає тепловий двигун, зображений на рис. 6.4.

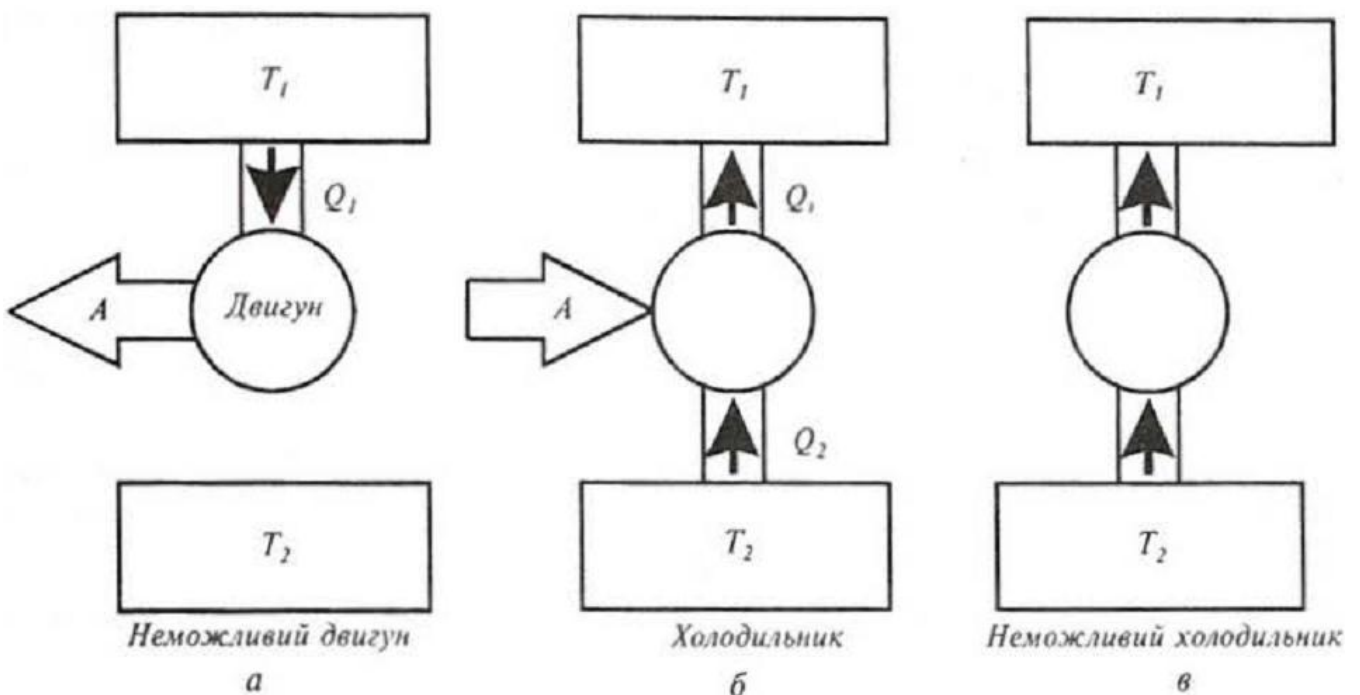


Рис. 6.7. Графічні ілюстрації теплових двигунів, можливість або неможливість дії яких диктується другим законом термодинаміки

Неможливий тепловий двигун, який би перетворював теплоту, отриману від нагрівача, в еквівалентну їй роботу (рис. 6.7а). Для передачі теплоти від холодильника нагрівачу потрібно виконати роботу над робочим тілом (рис. 6.7б); така ситуація реалізується в холодильних установках. Неможливий і такий тепловий двигун, в якому б здійснювалася передача теплоти від холодильника нагрівачу без виконання роботи (рис. 6.7в).

6.12. Ентропія та її властивості

Кількісне формулювання другого закону термодинаміки має вигляд:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (6.21)$$

де Q_1 – кількість теплоти, яку нагрівач віддає робочому тілу; Q_2 – кількість теплоти, яку забирає холодильник; T_1 – температура нагрівача; T_2 – температура холодильника. Тут знак « \leq » відповідає зворотним, а знак « $<$ » – незворотним процесам.

Розглянемо оборотний цикл Карно, для якого вираз (6.21) можна записати так:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (6.22)$$

або

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (6.23)$$

звідки:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (6.24)$$

Оскільки Q_2 віддається робочим тілом холодильнику, то $Q_2 < 0$, і останнє рівняння можна записати:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{-Q_2}{T_2} = 0. \quad (6.25)$$

або

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (6.26)$$

Відношення теплоти до абсолютної температури називається *приведеною теплою*. Таким чином, сума приведених теплот під час зворотного циклу Карно дорівнює нулю.

Будь-який коловий процес можна уявити як велику кількість елементарних циклів Карно (рис. 6.8):

$$\sum_i \frac{\Delta Q_{1i}}{T_{1i}} + \sum_i \frac{\Delta Q_{2i}}{T_{2i}} = 0. \quad (6.27)$$

Якщо перейти до нескінченної кількості елементарних циклів Карно, то суми в останній формулі перетворюються в інтеграли:

$$\int_{AaB} \frac{dQ}{T} + \int_{AbB} \frac{dQ}{T} = 0, \quad (6.28)$$

або

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0. \quad (6.29)$$

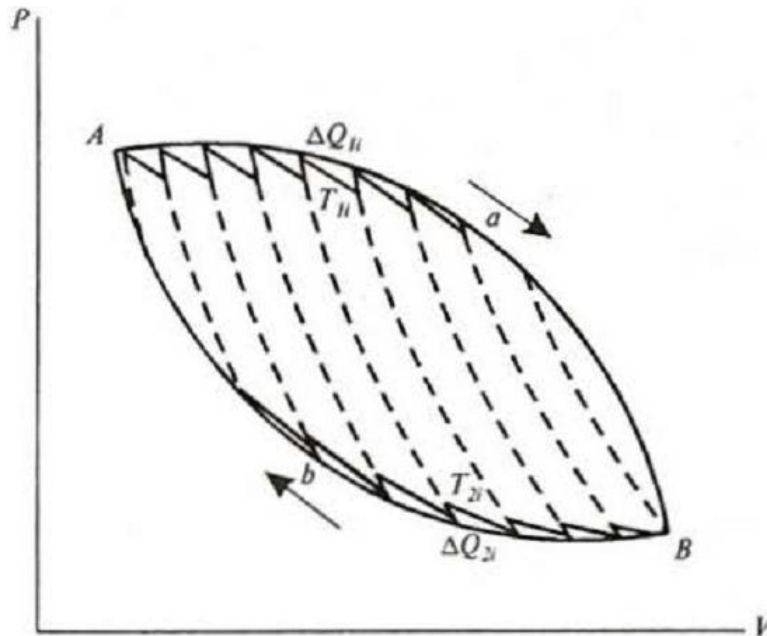


Рис. 6.8. Коловий процес як нескінченна кількість елементарних циклів Карно

Необоротний цикл Карно описується нерівністю:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0. \quad (6.30)$$

Підінтегральний вираз $\frac{dQ}{T}$ являє собою повний диференціал функції S , що залежить від стану системи і не залежить від шляху, яким система прийшла в цей стан:

$$\frac{dQ}{T} = dS. \quad (6.31)$$

Ця функція S називається *ентропією*.

Зміна ентропії визначається сумарним значенням поглинутих системою приведених теплот. При нескінченно малих змінах стану системи зміна ентропії dS дорівнює (під час зворотних процесів) або перевищує (під час незворотних процесів) значення поглинутої системою елементарної приведеної теплоти:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}. \quad (6.32)$$

Для ізольованої системи, яка не здійснює теплообмін з оточуючим середовищем $dQ \geq 0$; отже, зміна ентропії визначиться нерівністю:

$$dS \geq 0. \quad (6.33)$$

Таким чином, основні тенденції зміни ентропії можна сформулювати так:

1. В *ізольованій системі*, в якій проходять *зворотні процеси*, ентропія зберігає сталі значення:

$$dS = 0; \quad S = \text{const}. \quad (6.34)$$

2. В *ізольованій системі*, в якій проходять *незворотні процеси*, ентропія зростає:

$$dS > 0. \quad (6.35)$$

3. Під час термодинамічної рівноваги ентропія прямує до максимального значення:

$$S \rightarrow S_{\max} . \quad (6.36)$$

Другий закон термодинаміки для незворотних процесів показує напрямок процесу: *незворотні процеси завжди відбуваються у напрямку зростання ентропії*. Отже, можна ввести ще одне визначення ентропії: *це така функція стану системи, яка визначає напрямок перебігу довільного процесу: в ізольованій системі ентропія зростає з наближенням до стану рівноваги, а у рівноважному стані вона прямує до максимального значення*.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принципи утворення температурних шкал.
2. Охарактеризувати типи термодинамічних систем. Які ознаки ізольованої, замкнутої та відкритої термодинамічних систем?
3. Що таке термодинамічні параметри? термодинамічний процес?
4. Дати визначення внутрішній енергії.
5. Що називають теплоємністю тіла? питомою теплоємністю речовини?
6. Дати визначення роботи; теплоти.
7. Сформулювати перший закон термодинаміки.
8. Охарактеризувати шляхи теплообміну між термодинамічною системою і зовнішніми тілами.
9. З чого складається тепловий двигун? Від чого залежить коефіцієнт корисної дії теплового двигуна?
10. Сформулювати другий закон термодинаміки.
11. Які процеси називають оборотними? необоротними?
12. Дати визначення ентропії.
12. Охарактеризувати основні тенденції зміни ентропії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куліш В. В., Соловйов А. М., Кузнєцова О. Я., Кулішенко В. М. Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система : навч. посіб. У 2 ч. К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005.
2. Куліш В. В., Соловйов А. М., Кузнєцова О. Я. Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система : навч. посіб. У 4 ч. К. : Книжкове вид-во НАУ, 2007.
3. Лопатинський І. Є., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика : підручник. Львів : Львівська політехніка, 2009. 385 с.
4. Карамзін В. В., Семенець В. В. Курс загальної фізики : навчальний посібник для вищих навчальних закладів. К. : Кондор, 2016. 786 с.
5. Чолпан П. П. Фізика : підручник. К. : Вища школа, 2003. 567 с.
6. Сергєєва О. Є. Федосов С. Н. Основи загальної фізики. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електрика : навч. посіб. Одеса : ОНАХТ, 2018. 124 с.
7. Кучерук І. М. Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3-х т. Т.1. Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка. К.: Техніка, 2006, 536 с.
8. Кучерук І. М. Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3-х т. Т.2. Електрика і магнетизм. К. : Техніка, 2006, 452 с.
9. Кучерук І. М. Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3-х т. Т.3. Оптика. Квантова фізика. К. : Техніка, 2006, 520 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Густина деяких речовин

Речовина	Густина, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Повітря	1,293	0
Повітря	1,205	20
Повітря	1,128	40
Вода	999,8	0
Вода	1000,0	4
Вода	999,7	10
Вода	998,2	20
Вода	995,6	30
Вода	992,2	40
Гліцерин	1200	20
Рицинова олія	900	20
Спирт	790	20
Кров тварин	1052÷1060	20

Модуль Юнга для різних пружних матеріалів

Матеріал	Модуль Юнга E , $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$
Сталь	$2\cdot 10^{11}$
Кістка (вздовж осі)	$2\cdot 10^{10}$
Сухожилля	$2\cdot 10^7$
Хрящ реберний	$1,2\cdot 10^7$
Гума	$2\cdot 10^6$
Резилін	$1,7\cdot 10^6$
Еластин	$6\cdot 10^5$
Кровоносна судина	$2\cdot 10^5$

Коефіцієнт в'язкості речовин

Речовина	Коефіцієнт в'язкості, Па·с	Температура, °С
Повітря	$18 \cdot 10^{-6}$	20
Повітря	$21 \cdot 10^{-6}$	100
Вода	$1,781 \cdot 10^{-3}$	0
Вода	$1,306 \cdot 10^{-3}$	10
Вода	$1,002 \cdot 10^{-3}$	20
Вода	$0,798 \cdot 10^{-3}$	30
Вода	$0,653 \cdot 10^{-3}$	40
Суцільна кров	$(4 \div 5) \cdot 10^{-3}$	20
Плазма крові	$1,7 \cdot 10^{-3}$	20
Рицинова олія	$0,9 \cdot 10^{-3}$	20
Гліцерин	$1,5 \cdot 10^{-3}$	20

Коефіцієнти поверхневого натягу рідин

Рідина	Коефіцієнт поверхневого натягу α , Н м ⁻¹
Вода	$72,8 \cdot 10^{-3}$
Рицинова олія	$36,4 \cdot 10^{-3}$
Нафта	$26 \cdot 10^{-3}$
Спирт етиловий	$22,8 \cdot 10^{-3}$
Спирт метиловий	$22,6 \cdot 10^{-3}$
Мильний розчин	$25,0 \cdot 10^{-3}$
Плазма крові	$50,0 \cdot 10^{-3}$

Залежність коефіцієнта поверхневого натягу води від температури

Температура, °С	Коефіцієнт поверхневого натягу α , Н м ⁻¹
0	$75,6 \cdot 10^{-3}$
20	$72,8 \cdot 10^{-3}$
60	$66,2 \cdot 10^{-3}$
100	$58,9 \cdot 10^{-3}$

Типові значення коефіцієнтів лінійного α і об'ємного β розширення

Матеріал	α, K^{-1}	Матеріал	β, K^{-1}
Свинець	$29 \cdot 10^{-6}$	Повітря при 0 °С	$36,7 \cdot 10^{-4}$
Сталь	$11 \cdot 10^{-6}$	Гліцерин	$4,85 \cdot 10^{-4}$
Скло звичайне	$9 \cdot 10^{-6}$	Бензин	$1,24 \cdot 10^{-4}$
Інвар (сплав Ni-Fe)	$0,9 \cdot 10^{-6}$	Етиловий спирт	$1,12 \cdot 10^{-4}$

Питома теплоємність речовин і тканин

Речовина або тканина	Питома теплоємність $C, \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Вода	4186
Кров	3894
Молоко	3891
Мед	2229
Тканина риби	3500
Суха тканина	1674
Кісткова тканина	1256÷1675

Значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин

Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Температура, °С
Метали		
Алюміній	238	25
Золото	314	25
Залізо	80	25
Свинець	35	25
Срібло	427	25
Гази		
Повітря (сухе)	0,0237	-10
---	0,0243	0
---	0,0250	10
---	0,0257	20
---	0,0264	30

---	0,0270	40
---	0,0277	50
Гелій	0,138	20
Водень	0,172	20
Азот	0,0234	20
Кисень	0,0238	20
<hr/>		
	Неметали	
Вода	0,565	0
---	0,599	20
---	0,627	40
Бетон	2,43	20
Дерево	0,126	20
Пластик	0,04	20
<hr/>		

Навчальне видання

Федосов Сергій Анатолійович
Захарчук Дмитро Андрійович
Шигорін Павло Павлович

Фізика

Курс лекцій

Частина 1

Друкується в авторській редакції