



ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ТІЛА У РІВНОПРИСКОРЕНОМУ РУХІ

Прилади та матеріали: вимірювальна стрічка; секундомір; жолоб; набір кульок однакового розміру та різної маси; штатив з муфтою та лапкою; металевий циліндр.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Закріпіть жолоб за допомогою штатива в похилому положенні під невеликим кутом α_1 до горизонту. Біля нижнього кінця жолоба покладіть у нього металевий циліндр.
2. Пустіть по жолобу металеву кульку, одночасно увімкнувши секундомір, і вимкніть його в момент дотику кульки до циліндра. Виміряйте час руху кульки t .
3. Вимірювальною стрічкою виміряйте переміщення кульки s .
4. Повторіть дослід п'ять разів, змінюючи величину переміщення s . Величина переміщення змінюється у разі зміни положення циліндра в жолобі.
5. Визначте прискорення кульки для кожного з дослідів.
6. Обчисліть середнє значення прискорення a_c як середнє арифметичне всіх прискорень, обчислених в кожному з дослідів.
7. Для кожного з дослідів визначте відносну похибку вимірювання прискорення за допомогою формули: $\varepsilon_a = \varepsilon_s + 2\varepsilon_t$, де відносні похибки визначення переміщення s та часу t обчислюються відповідно за формулами: $\varepsilon_s = \frac{\Delta s}{s}$ і $\varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t}$.

У цих формулах $\Delta t = \pm 0,1$ с — абсолютна похибка вимірювання часу, а $\Delta s = \pm 0,0005$ м — абсолютна похибка вимірювання модуля переміщення.

8. Обчисліть абсолютну похибку вимірювання прискорення за формулою $\Delta a = \varepsilon_a \cdot a_c$.
9. Кінцеве значення прискорення подайте у вигляді $a_c \pm \Delta a$.

Додаткове завдання:

Визначте прискорення, змінивши кут нахилу жолоба на кут α_2 , а потім повторіть дослід з кулькою іншої маси. Зробіть розрахунки, запишіть значення прискорення у вигляді $a_c \pm \Delta a$ для кожного випадку, проаналізуйте отримані результати та зробіть висновки про залежність прискорення від кута нахилу жолоба та маси кульки.

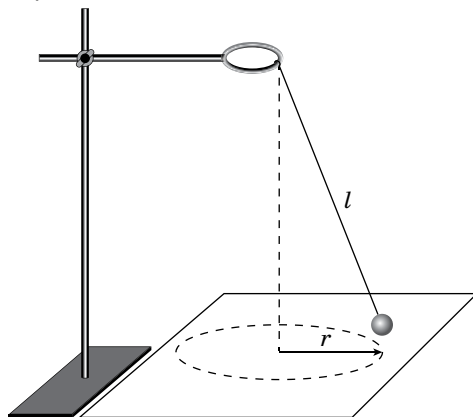
ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТІЛА ПО КОЛУ

Прилади та матеріали: кулька, підвішена на нитці; штатив з кільцем і муфтами; секундомір або годинник з секундною стрілкою; вимірювальна стрічка; аркуш паперу з накресленим колом (радіус 15 см).

Вказівки щодо виконання роботи

1. Закріпіть кульку на нитці довжиною 45 см та прикріпіть нитку до кільця штатива.
2. Рухаючи нитку біля точки підвісу, доможіться обертання кульки по колу радіусом r , яке намальовано на аркуші паперу.
3. Виміряйте час t , за який кулька здійснює N обертів (наприклад, $N = 15$). Дослід повторіть п'ять разів.

- Обчисліть період T обертання кульки.
- Обчисліть середнє значення кутової та лінійної швидкостей руху кульки, а також доцентрового прискорення.



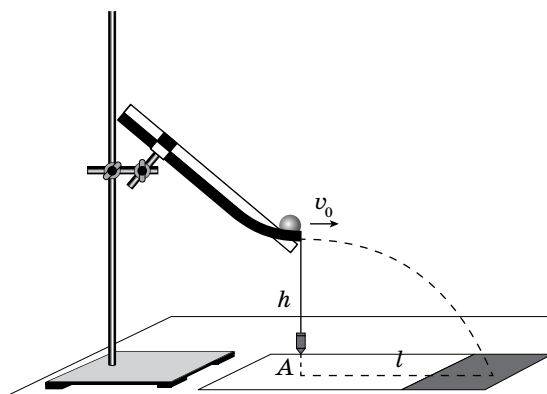
Додаткове завдання:

- З'ясуйте, чи зміниться період обертання кульки, якщо рахувати не 15, а 30 обертів.
- З'ясуйте, чи зміниться період обертання, якщо радіус обертання зменшити у 2 рази (довжину нитки залишити незмінною).
- З'ясуйте, як зміниться модуль кутової та лінійної швидкостей кульки, та її доцентрового прискорення, якщо радіус обертання збільшити у 2 рази.

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТІЛА, КИНУТОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Прилади та матеріали: лінійка з міліметровими поділками; штатив з муфтою і лапкою; металевий жолоб для пускання кульок; кулька; папір; висок; клейка стрічка (скотч); копіювальний папір.

Вказівки щодо виконання роботи



- За допомогою штатива закріпіть жолоб. Загнутий кінець жолоба повинен бути розташований горизонтально на висоті $h = 3$ см від поверхні стола.
- Зафіксуйте клейкою стрічкою на столі довгу смужку паперу. У місці можливого падіння кульки покладіть копіювальний папір. За допомогою виски визначте точку A , від якої виміряйте дальність польоту l .

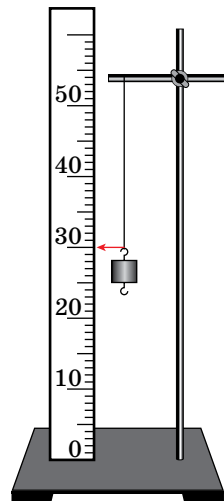
- Змінюючи висоту жолоба ($h_2 = 12$ см, $h_3 = 27$ см, $h_4 = 48$ см), виміряйте відповідні дальності польоту l_2, l_3, l_4 . У кожному випадку дослід повторюйте п'ять разів, пускаючи кульку з того самого місця жолоба і вимірюючи щоразу дальність польоту l . Обчисліть середнє значення дальності польоту для кожного випадку.
- Доведіть, що під час руху тіла у полі земного тяжіння виконується співвідношення $l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 1 : 2 : 3 : 4$.
- Використовуючи дані досліду, у якому кулька летіла з висоти $h_4 = 48$ см, обчисліть середнє значення початкової швидкості за формулою: $v_{0c} = l_c \sqrt{\frac{g}{2h}}$.
- Обчисліть відносну похибку вимірювання швидкості за формулою: $\varepsilon_v = \varepsilon_l + \frac{1}{2} \varepsilon_g + \frac{1}{2} \varepsilon_h = \frac{\Delta l}{l} + \frac{1}{2} \frac{\Delta g}{g} + \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h}$, де $\Delta l = \Delta h = 1$ мм, $\Delta g = 0,02 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ за $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
- Обчисліть абсолютну похибку вимірювання швидкості $\Delta v_0 = v_{0c} \cdot \varepsilon_v$.
- Результат вимірювання запишіть у вигляді $v_0 = (v_{0c} \pm \Delta v) \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПРУЖНОСТІ

Прилади та матеріали: гумова смужка довжиною 20 – 30 см з дрютяною петелькою на одному кінці; набір важків по 100 г; динамометр; лінійка; штангенциркуль; штатив.

Вказівки щодо виконання роботи

- Гумовий шнур, із петлею на нижньому кінці, закріпіть у штативі. Поряд закріпіть лінійку у вертикальному положенні.
- Підвісьте один тягарець. Номер поділки шкали лінійки, навпроти якої розміщено гачок тягарця, вважайте за початок відліку видовження гумового шнура. За значення сили пружності $F_{\text{пр}}$ будемо приймати вагу тягарців ($g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$).
- Підвішуйте до гумового шнура по одному тягарцю і вимірюйте видовження шнура.
- За результатами вимірювань побудуйте графік залежності сили пружності від видовження гумового шнура. Під час побудови графіка за результатами вимірювання експериментальні точки можуть не лежати на одній прямій, що відповідає формулі $F_{\text{пр}} = k|x|$. Це пов'язано з похибками вимірювань. У цьому випадку графік потрібно будувати так, щоб приблизно однакова кількість точок була по різні боки від прямої.
- За тангенсом кута нахилу графіка визначте середнє значення коефіцієнта пружності k_c .
- Обчисліть відносну похибку непрямих вимірювань (скориставшись даними першого досліду): $\varepsilon_k = \varepsilon_m + \varepsilon_g + \varepsilon_x = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta x}{x}$, де $\Delta m = 0,002$ кг, $\Delta x = 1$ мм, $\Delta g = 0,02 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ за $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
- Визначте $\Delta k = \varepsilon_k k_c$ і результат вимірювань запишіть у вигляді: $k = (k_c \pm \Delta k) \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

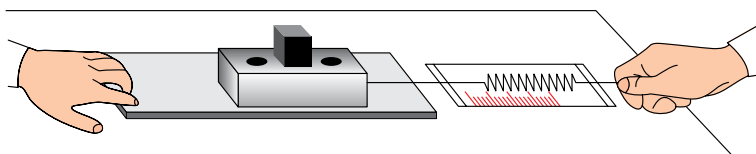


ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ

Прилади та матеріали: динамометр; дерев'яний брусок; дерев'яна дошка; набір тягарців масою по 100 г.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Покладіть брусок на горизонтально розміщену дерев'яну дошку. На брусок поставте один тягарець. Прикріпивши до бруска динамометр, рівномірно тягніть його вздовж дошки. Запишіть покази динамометра (це буде значення сили $F_{\text{тер}}$).



2. Визначте вагу бруска з тягарцем (зрозуміло, що цьому значенню дорівнює і сила нормального тиску N бруска з тягарцем на дошку).
3. Визначте коефіцієнт тертя ковзання.
4. До першого тягарця додайте по черзі другий, третій і проведіть вимірювання.
5. За результатами вимірювань побудуйте графік залежності сили тертя від сили нормального тиску. Визначте середній коефіцієнт тертя ковзання за тангенсом кута нахилу графіка.
6. За даними першого досліду обчисліть відносну похибку вимірювання коефіцієнта

тертя $\varepsilon_{\mu} = \varepsilon_{F_{\text{тер}}} + \varepsilon_N = \frac{\Delta F_{\text{тер}}}{F_{\text{тер}}} + \frac{\Delta N}{N}$, де $\Delta F_{\text{тер}} = \Delta N = 0,1 \text{ Н}$.

7. Обчисліть абсолютну похибку $\Delta\mu = \varepsilon_{\mu} \mu_c$.
8. Результат обчислень запишіть у вигляді: $\mu = \mu_c \pm \Delta\mu$.

ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНОВАГИ ТІЛ ПІД ДІЄЮ КІЛЬКОХ СИЛ

Прилади та матеріали: лінійка; динамометр; штатив з муфтою; важіль; набір тягарців масою по 100 г.

Вказівки щодо виконання роботи

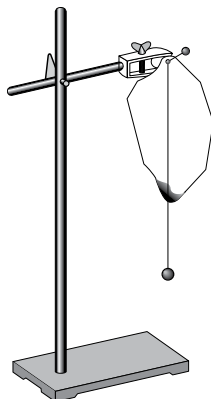
1. Встановіть важіль на штативі й урівноважте його у горизонтальному положенні за допомогою пересувних гайок, розміщених на його кінцях.
2. Підвісьте тягарець у певній точці одного з пліч важеля.
3. Підвісьте тягарці до однієї або декількох точок іншого плеча важеля так, щоб важіль залишився у рівновазі. Виміряйте лінійкою довжини плечей ($l_1, l_2, \dots$) сил (ваги тягарців $P = F_m = mg$), прикладених до плечей важеля.
4. Повторіть дослід 3 рази, змінюючи положення і кількість тягарців.
5. Визначте значення всіх моментів сил, що діють на важіль; суму моментів сил $M_{\text{за}}$, що обертають важіль за годинниковою стрілкою, та суму моментів сил $M_{\text{проти}}$, що обертають важіль проти годинникової стрілки.
6. Порівняйте відношення $\frac{M_{\text{за}}}{M_{\text{проти}}}$ з одиницею і зробіть висновок.

ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРА ТЯЖІННЯ ПЛАСКИХ ФІГУР

Прилади та матеріали: фігури, вирізані з картону; лінійка; висок; шпилька; дерев'яний корок; штатив із муфтою та затискачем.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Виріжте з картону три фігури: центрально-симетричну (круг, квадрат або ромб); таку, що має форму нерівностороннього трикутника, і фігуру неправильної форми.
2. Закріпіть у затискачі штатива дерев'яний корок. Проколите одну з фігур шпилькою і встроміть її в корок. Злегка похитуючи фігуру, переконайтеся, що вона перебуває у стані стійкої рівноваги.
3. На шпильку надіньте петельку нитки виска.
4. По лінії виска поставте мітки. Зніміть фігуру зі штатива і наведіть лінію відвісу олівцем під лінійку.
5. Повторіть дослід двічі, прокалюючи фігуру в інших місцях. Визначте центр тяжіння фігури (точку перетину проведених прямих).
6. Визначте центр тяжіння для двох інших фігур.



ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНОГО УДАРУ ДВОХ ТІЛ

Прилади та матеріали: лінійка з міліметровими поділками; штатив з муфтою і лапкою; жолоб для пускання кульок; металеві кульки різної маси; лоток з піском; терези.

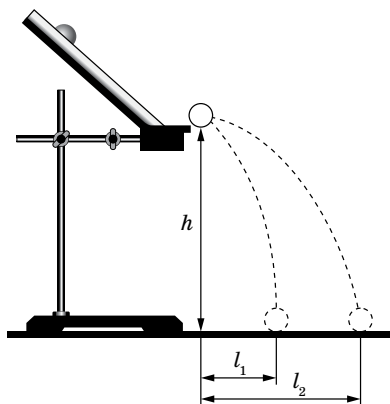
Вказівки щодо виконання роботи

1. За допомогою штатива закріпіть жолоб. Загнутий кінець жолоба повинен бути розташований горизонтально. На стіл, у місці можливого падіння кульки, покладіть лоток з піском.
2. За допомогою терезів виміряйте маси кульок m_1 та m_2 .
3. Пустіть кульку більшої маси вільно котитися по жолобу. Повторіть дослід п'ять разів, пускаючи кульку з того самого місця жолоба.
4. Виміряйте висоту h і дальність польоту l . Обчисліть середнє значення початкової швидкості кульки за формулою: $v_0 = l_c \sqrt{\frac{g}{2h}}$ та імпульс кульки: $p_1 = m_1 v_0$.

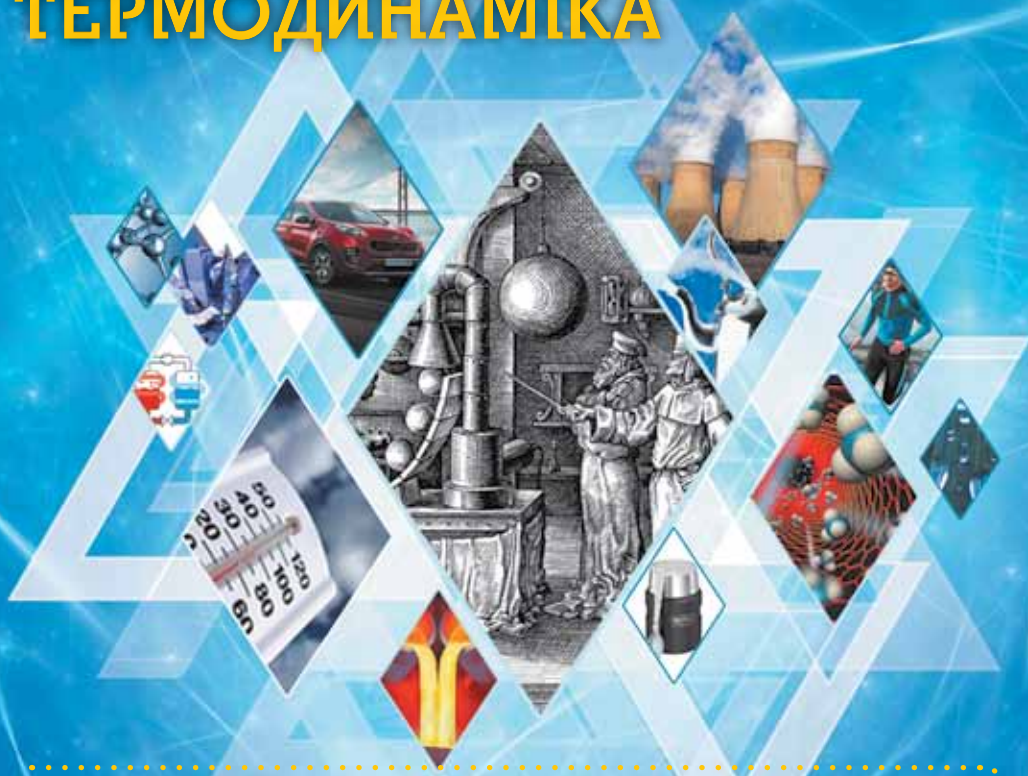
5. На краю жолоба розташуйте кульку меншої маси. Запустіть кульку більшої маси так само, як у першому досліді. Після зіткнення обидві кульки впадуть у лоток з піском. Вимірявши дальність польоту кульок l_1 і l_2 та висоту падіння, визначте швидкості кульок після удару:

$$u_1 = l_1 \sqrt{\frac{g}{2h}}, \quad u_2 = l_2 \sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

6. Перевірте виконання закону збереження імпульсу під час пружного удару: $m_1 v_0 = m_1 u_1 + m_2 u_2$. Для цього порівняйте відношення $\frac{m_1 v_0}{m_1 u_1 + m_2 u_2}$ з одиницею.



МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ БУДОВИ РЕЧОВИНИ. ТЕРМОДИНАМІКА



Молекулярною фізикою називається розділ фізики, який вивчає будову, фізичні властивості й агрегатні стани речовини на основі їх мікроскопічної (молекулярної) будови. Молекулярна фізика користується так званим статистичним методом, який дає змогу визначити середні величини, що характеризують рух і взаємодію величезної сукупності молекул. Саме тому молекулярну фізику часто називають статистичною фізикою.

Дослідженням різних властивостей тіл і змін стану речовини займається також **термодинаміка**, яка користується термодинамічним методом — вивчення макроскопічних властивостей тіл і явищ без урахування їх внутрішньої будови.

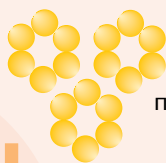
Обидва методи доповнюють один одного. Спільне їх використання дає найбільш повну характеристику властивостей систем, що складаються з величезної кількості частинок.



Ментальна карта

У **рідині** молекули перебувають на відстанях, сумірних із їхніми розмірами.

Поверхневий натяг



У **твердих тілах** структурні частинки (атоми або молекули) перебувають дуже близько одна від одної.

Плазма



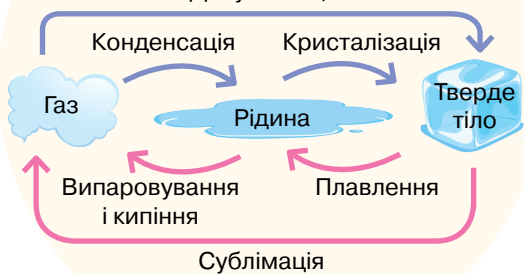
Газ — це стан речовини, у якому окремі молекули слабо взаємодіють між собою й рухаються хаотично.

Агрегатні стани речовини

ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

Температура — це фізична величина, що характеризує тепловий стан речовини і визначається середньою кінетичною енергією хаотичного руху частинок речовини.

Десублімація



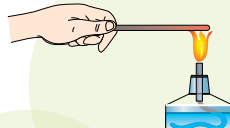
Взаємні перетворення

Рівняння теплового балансу

$$Q_{\text{від.}}^- = Q_{\text{от.}}^+$$



2 — теплопровідність



плавлення
(кристалізація)
 $Q = \lambda t$

нагрівання
(охолодження)
 $Q = cm\Delta T$

згорання
 $Q = qm$

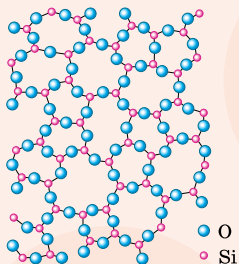
пароутворення
(конденсація)
 $Q = Lm$

ККД нагрівника

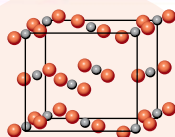
$$\eta = \frac{Q}{Q_{\text{зг}}} \cdot 100 \%$$

Кількість теплоти Q — це та частина внутрішньої енергії, яку дістає чи втрачає тіло під час теплообміну.

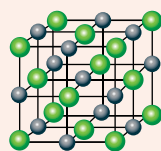
Аморфні тіла



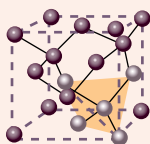
Смола



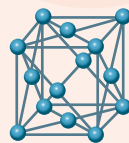
Молекулярні
(твердий
двоокис
вуглецю)



Йонні
(натрій хлорид)



Атомні
(алмаз)



Металеві
(мідь)

Види кристалічних
ґраток

Тепловим рухом

називають безперервний,
непорядкований
(хаотичний) рух молекул.



Дифузія

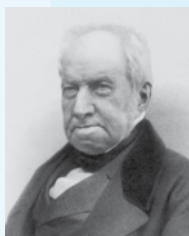
Внутрішня енергія —

це енергія руху і взаємодії
частинок, з яких складається
речовина.

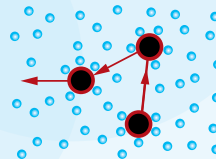


1 — конвекція

Способи
перетворення



Роберт Броун



Броунівський рух

Механічна
робота



Теплообмін —

це процес обміну
внутрішньою енергією
між тілами без
виконання
механічної роботи.



3 — теплове
випромінювання



§ 18

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини

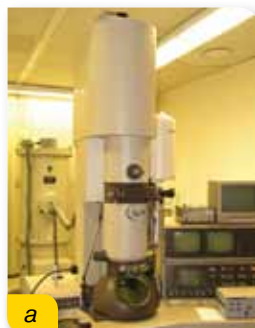
Молекулярно-кінетична теорія речовини. На основі досліджень багатьох учених у XX ст. було створено теорію будови речовини, так звану *молекулярно-кінетичну теорію*.

Молекулярно-кінетичною теорією (МКТ) називають теорію, яка пояснює будову та властивості тіл на основі закономірностей руху та взаємодії атомів і молекул.

Ця теорія прагне пов'язати характеристики руху та взаємодії окремих атомів і молекул з величинами, які описують властивості макротіл.

В основу молекулярно-кінетичної теорії речовини покладено *три положення*, сучасне формулювання яких таке:

1. Будь-які речовини мають дискретну (переривчасту) будову. Вони складаються з найдрібніших частинок — молекул або атомів (іонів).
2. Молекули перебувають у стані безперервного хаотичного (невпорядкованого) руху. Цей рух називається тепловим і в загальному випадку є сукупністю поступального, обертального та коливального рухів.



а



б

3. Молекули взаємодіють одна з одною силами притягання й відштовхування. Природа цих сил — електромагнітна.

Можна навести безліч фактів на підтвердження цих положень. Зокрема, пружність газів, твердих тіл і рідин, здатність рідин змочувати тверді тіла, процеси фарбування, склеювання, деформації твердих тіл тощо — свідчать про існування сил притягання й відштовхування між молекулами. У 1974 р. вперше вдалося сфотографувати окремі атоми та молекули за допомогою електронного мікроскопа.

Розміри та форма атомів і молекул. Нині за допомогою сучасних мікроскопів (електронних і тунельних) отримано достатню кількість фотографій різних видів молекул і атомів. На малюнку 83 зображено електронний мікроскоп і фотографія атомів Літію, отриману за його допомогою. Світлі точки на фотографії — це зображення атомів Літію. Знаючи збільшення мікроскопа, можна оцінити розміри атомів Літію.

Приблизну оцінку розмірів молекул можна дістати з досліду, вперше проведеного німецьким фізи-

Мал. 83.
Електронний
мікроскоп (а);
фотографія атомів
Літію (б)

ком Вільгельмом Конрадом Рентгеном та його англійським колегою Джоном Вільямом Стреттом (лордом Релеєм). Якщо краплина олії, об'єм якої відомий, опиниться на поверхні чистої води, то вона одразу розпливеться, утворивши тонку плівку завтовшки в один шар молекул. Товщину такої плівки можна прийняти за діаметр молекули. Вимірюючи площу плівки

S за максимального розливання олії, з відношення $d = \frac{V}{S}$ (тут V — об'єм краплини) було оцінено розмір (діаметр) молекул. Результат одного з дослідів такий: для $V = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$ площа поверхні плівки 90 см^2 , тоді

$$d = \frac{3,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3}{90 \text{ см}^2} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

Сучасними методами вже визначено розміри інших молекул. Наприклад, лінійні розміри молекул кисню становлять $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, а молекули води — $2,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, розміри молекул більшості інших речовин мають той самий порядок величини — 10^{-10} м . Проте молекули деяких органічних речовин, які складаються з тисяч атомів, мають значно більші розміри. Гігантами є, наприклад, молекули білків. Молекула дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК), яка є носієм спадкової інформації живого організму, у випрямленому стані досягає довжини десятків сантиметрів.

Сучасні уявлення про будову атома загалом базуються на уявленнях квантової механіки. На популярному рівні будову атома можна викласти в рамках так званої планетарної моделі, запропонованої Ернестом Резерфордом та удосконаленої Нільсом Бором. Коротко пригадаймо, що нам відомо з курсу хімії та фізики основної школи про будову атома. Атом з хімічної точки зору — найменша, електронейтральна, хімічно неподільна частинка речовини. Фізична модель атома докладніше розкриває подробиці його будови: ядра всіх атомів складаються з протонів (позитивний електричний заряд ${}^+e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, маса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$) і нейтронів (заряд дорівнює нулю, маса $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$). Спільна назва протонів і нейтронів — *нуклони*. Між нуклонами діють короточасні сили притягання — *ядерні сили*. Кількість протонів у ядрі позначається Z і збігається з порядковим номером елемента в таблиці Менделєєва. Заряд ядра дорівнює Ze . Кількість нейтронів у ядрі позначається N . Загальна кількість нейтронів і протонів у ядрі позначається A і називається масовим числом $A = Z + N$.

Атомні ядра позначають символами ${}_Z^AX$, де X відповідає символу атома хімічного елемента в періодичній системі Менделєєва. Наприклад, ${}_1^1\text{H}$ — ядро атома водню, ${}_2^4\text{He}$ — ядро атома гелію. Атоми, які мають однаковий заряд ядра, але різну масу, називаються *ізотопами*. Ізотопи ядра хімічного елемента мають однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів у складі ядра. Усі ізотопи одного й того самого елемента мають однакові хімічні властивості, але можуть відрізнятися радіоактивністю. Наприклад: ${}_1^2\text{H}$ — дейтерій і ${}_1^3\text{H}$ — тритій є ізотопами водню (тритій радіоактивний).

Цікавий факт виявився, коли вчені визначили розміри атома та розміри його ядра. Діаметр атома становить близько 10^{-10} м, а діаметр ядра в різних атомів — $10^{-14} \div 10^{-15}$ м, тобто діаметр ядра в 10 000 разів менший від діаметра всього атома.

Ядро оточене електронною хмарою, яка займає більшу частину його об'єму. В електронній хмарі можна виділити оболонки, для кожної з яких існує кілька можливих орбіталей. Заповнені орбіталі складають електронну конфігурацію, властиву для кожного хімічного елемента. Взаємодія атомів між собою визначається передусім властивостями їх електронних оболонок, а якщо йдеться про розмір і форму атома, мають на увазі розмір і форму його електронної оболонки.

Маса молекул. Оскільки маси молекул неорганічних речовин дуже малі, то в розрахунках зручніше використовувати не абсолютні значення мас, а відносні. Для зручності розрахунків увели поняття *відносної атомної (молекулярної) маси*.

Відотною атомною масою речовини A_r називають відношення маси атома m_0 даної речовини до $\frac{1}{12}$ маси атома Карбону C^{12} : $A_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_0(C^{12})}$.

Величину $\frac{1}{12} m_0(C^{12})$ використовують для порівняння тому, що Карбон є одним із найпоширеніших елементів у природі, а ізоотп C^{12} — найстійкіший його ізоотп. Одиницею відносної атомної (молекулярної) маси є атомна одиниця маси (1 а. о. м.).

Абсолютні значення атомних мас різних хімічних елементів лежать у межах 10^{-25} – 10^{-27} кг, а їхні відносні маси, наведені в періодичній таблиці хімічних елементів, — у межах 1–100 а. о. м. (Для практичних розрахунків наведені в цій таблиці відносні атомні маси хімічних елементів ми будемо заокруглювати до найближчого цілого числа.)

Якщо речовина складається не з атомів, а з молекул, то її відносна молекулярна маса M_r дорівнює сумі відносних атомних мас атомів, які утворюють цю молекулу. Наприклад, для води (H_2O): $M_r = 1 \cdot 2 + 16 \cdot 1 = 18$ а. о. м.

Експериментально встановлено, що 1 а. о. м. = $1,660 \cdot 10^{-27}$ кг ($1,660 \cdot 10^{-27}$ кг — це $\frac{1}{12}$ маси атома Карбону). Оскільки в періодичній систе-

мі Менделєєва вказано відносні атомні маси елементів, то легко обчислити масу будь-якого атома чи молекули. Наприклад, маса молекули води $m_{H_2O} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг $\cdot 18 = 29,88 \cdot 10^{-27}$ кг.

Кількість речовини. Кількість молекул у будь-якому макроскопічному тілі надзвичайно велика, тому в обчисленнях використовують не абсолютну кількість молекул у тілі, а відносну, тобто користуються порціями речовини, які мають однакову кількість молекул.

Кількість речовини ν — це фізична величина, яка визначається відношенням кількості молекул (атомів чи йонів) N у певному тілі до кількості N_A атомів у 0,012 кг Карбону: $\nu = \frac{N}{N_A}$.

Одиницею кількості речовини є моль: 1 моль.

Моль — одна із семи основних одиниць Міжнародної системи одиниць (СИ). В одному молі речовини міститься стільки ж структурних елементів (молекул, атомів), скільки атомів міститься в 0,012 кг ізотопу Карбону $^{12}_6\text{C}$. Отже, незалежно від агрегатного стану, 1 моль речовини містить одну й ту саму кількість молекул, що дорівнює числу Авогадро: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

У 1811 р. італійський фізик і хімік Амедео Авогадро (1776–1856) відкрив важливий для фізики та хімії закон, згідно з яким за однакових температур і тисків у рівних об'ємах різних газів міститься однакова кількість молекул. Згідно із законом, 1 кмоль будь-якого ідеального газу за *нормальних умов*¹ займає об'єм 22,4 м³.

Авогадро, виходячи із цього закону, запропонував метод визначення атомних мас елементів і молекулярних мас речовин.

Молярна маса. Крім відносної молекулярної маси, у фізиці та хімії широко використовують молярну масу M .

Молярна маса M — фізична величина, яка визначається відношенням маси речовини m до кількості речовини ν : $M = \frac{m}{\nu}$.

Іншими словами, молярною масою називають масу речовини, взятої в кількості одного моля. Відповідно до цього означення молярна маса визначається добутком маси молекули та сталої Авогадро: $M = m_0 N_A$ або $M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Молярна маса суміші, яка складається з n різних газів, визначається за формулою $M = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n}}$, де m_1, m_2, m_n — маси газів, і M_1, M_2, M_n — їх молярні маси.

Кількість атомів (або молекул) N , що містяться в речовині масою m , можна визначити за формулою $N = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A$.

Усі величини, означені в цьому параграфі, називають мікроскопічними параметрами, оскільки вони характеризують мікроскопічну будову

¹ *Нормальні умови (н.у.)* — стандартні фізичні умови, які характеризуються тиском $p = 101\,325$ Па (760 мм рт. ст.) і температурою $T = 273,15$ К ($t = 0$ °С).

речовини. Молярну масу визначають хімічними методами. Стала Авогадро з високою точністю визначена кількома фізичними методами. Маси молекул і атомів з високою точністю визначають за допомогою *маспектрографа*. Це прилад, у якому за допомогою електричних і магнітних полів відбувається розділення заряджених частинок (йонів) у просторі залежно від їх маси та електричного заряду.

Сучасні методи дослідження будови речовини. Наноматеріали. Потреби людини в різних матеріалах постійно зростають, але ресурси природних речовин на планеті обмежені. Друга половина XX ст. стала періодом інтенсивного пошуку, дослідження й виробництва штучних матеріалів. Це — полімери й пластмаси, створені на основі полімерів (поліетилен, поліпропілен, полістирен, тефлон, поліметилметакрилат, полівінілацетат, епоксидні смоли, каучуки й волокна та ін.). Важливою умовою сталого розвитку є створення новітніх матеріалів на основі біосировини.

Сучасні матеріали вражають розмаїттям (мал. 84). Їхні унікальна структура і властивості зумовлюють створення не лише принципово нових продуктів, а й галузей науки та індустрії, наприклад нанотехнології. **Нанотехнології** — це технології, засновані на маніпуляції окремими атомами та молекулами для побудови структур з наперед заданими властивостями. Властивості наносистем багато в чому відрізняються від властивостей більших об'єктів, що складаються з тих самих атомів і молекул. Наприклад, наночастинки платини набагато ефективніше очищають автомобільні викиди від токсичних забруднювачів, ніж звичні платинові



Мал. 84. Сучасні матеріали

каталізатори. Одношарові та багатшарові графітні циліндри нанометрової товщини, так звані вуглецеві нанотрубки, прекрасно проводять електрику й тому можуть стати заміною мідним провідникам. Нанотрубки також дають змогу створювати композитні матеріали виняткової міцності та принципово нові напівпровідникові й оптоелектронні пристрої. На сучасному етапі нанотехнології використовують під час виробництва особливих сортів скла, на яких не осідає бруд (застосовується в автомобілей авіабудуванні), для створення одягу, який неможливо забруднити або пожмакати. Особливого значення набуває використання нових пристроїв на основі нанотехнологій у медицині, які можуть маніпулювати на клітинному рівні.

Інтенсивному розвитку створення нових речовин сприяє те, що сучасні методи експериментальних досліджень структури речовини надзвичайно різноманітні — від нескладних визначень дефектів кристалічної будови твердих тіл за допомогою порівняно простих оптичних мікроскопів до досліджень нанокристалічної структури за допомогою сучасних електронних мікроскопів.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Обґрунтуйте вислів «Вчення про будову речовини лежить в основі всіх природничих наук».
2. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
3. Наведіть факти, що підтверджують положення молекулярно-кінетичної теорії.
4. Опишіть будову атома. (Як описується атом у квантовій фізиці? Для відповіді скористайтесь додатковими джерелами.)
5. Чому молекулярна фізика використовує відносні величини для вимірювання маси?



Експериментуємо

1. Визначте, скільки молекул містить вода в склянці. (Обладнання: посудина з водою, склянка, мензурка.)
2. Визначте кількість речовини, що міститься в певному тілі. (Обладнання: досліджуване тіло (залізне, мідне тощо), терези з важками.)
3. Визначте кількість речовини, що міститься в певному тілі правильної геометричної форми. (Обладнання: досліджуване тіло правильної геометричної форми (залізне, мідне тощо), лінійка (штангенциркуль), таблиці (густин, періодичної системи хімічних елементів).)



Виконуємо навчальні проекти

- Дослідне підтвердження основних положень молекулярно-кінетичної теорії речовини.
- Рециклінг як цивілізований спосіб утилізації твердих побутових відходів.



Приклади розв'язування задач

Задача. Де та у скільки разів міститься більше атомів: у склянці води чи склянці ртуті? Молярні маси води і ртуті: $M_{\text{в}} = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$; $M_{\text{рт}} = 200 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$, їхні густини відповідно: $\rho_{\text{в}} = 1 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Дано:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{рт}}$$

$$M_{\text{в}} = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$M_{\text{рт}} = 200 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$\rho_{\text{в}} = 1 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{рт}}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

За умовою задачі об'єми води і ртуті однакові:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{рт}}$$

Кількість молекул визначаємо за формулою

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{\rho V}{M} N_A.$$

Кількість молекул води і ртуті у склянках відпо-

$$\text{відно: } N_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{в}} V}{M_{\text{в}}} N_A \text{ і } N_{\text{рт}} = \frac{\rho_{\text{рт}} V}{M_{\text{рт}}} N_A.$$

$$\text{Звідси } \frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{рт}}} = \frac{\rho_{\text{в}} M_{\text{рт}}}{\rho_{\text{рт}} M_{\text{в}}}.$$

Зверніть увагу! У задачі запитується не про співвідношення кількості частинок (молекул) ртуті й води, а про співвідношення кількості атомів. Оскільки одна молекула води містить три атоми, то формула набуває вигляду: $\frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{рт}}} = \frac{3\rho_{\text{в}} M_{\text{рт}}}{\rho_{\text{рт}} M_{\text{в}}}.$

$$\text{Обчислення: } \frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{рт}}} = \frac{3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 200 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 2,5.$$

Відповідь: у склянці води у 2,5 рази більше атомів ніж у склянці ртуті.

ВПРАВА 17

1. Мікроскопічна порошинка вуглецю має масу 0,1 нг. Скільки молекул у ній?
2. На виріб, поверхня якого 20 см², нанесено шар срібла завтовшки 1 мкм. Скільки атомів срібла міститься в покритті?
3. Скільки молекул міститься: в 1 г заліза; в 1 г водню; в 10 г кисню?
4. Скільки моль містять: 50 г заліза; 50 г кисню?
5. Визначте масу молекул азоту, кисню, води.
6. Знаючи сталу Авогадро N_A , густину ρ певної речовини та її молярну масу M , виведіть формули для розрахунку кількості молекул в одиниці маси цієї речовини, в одиниці об'єму, у тілі масою m , у тілі об'ємом V .
7. Вважаючи, що діаметр молекули водню становить близько $2,3 \cdot 10^{-10}$ м, обчисліть довжину ланцюжка молекул, що містяться в 1 мг цього газу, якби вони були розташовані в один ряд упритул одна до одної. Порівняйте довжину цього ланцюжка із середньою відстанню від Землі до Місяця.

§ 19

Ідеальний газ у молекулярно-кінетичній теорії

Ідеальний газ. Як ми вже знаємо, вивчаючи фізичні явища, використовують метод моделювання. При цьому чинниками, які не мають суттєвого впливу на хід явища, нехтують, отримавши можливість теоретично (математично) досліджувати ідеалізоване явище. Якщо модель явища створено вдало, це дає змогу вивчати процеси, що відбуваються реально, і передбачати їх перебіг у різних випадках.

Сформульовані раніше основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини спочатку застосуємо до найпоширенішого і найпростішого за будовою стану речовини — газоподібного. Зробимо це, використавши модель — *ідеальний газ* — таку фізичну модель реального газу, у якій молекули вважають матеріальними точками, що майже не взаємодіють між собою. Точніше, в ідеальному газі:

- а) силами міжмолекулярної взаємодії нехтують;
- б) вважається, що взаємодія між молекулами відбувається тільки під час зіткнень молекул і є пружною взаємодією, між зіткненнями молекули рухаються рівномірно і прямолінійно;
- в) власним об'ємом молекул нехтують, тобто вважають молекули матеріальними точками.

На основі експериментальних результатів дослідження газів, з використанням моделі ідеального газу, було побудовано *молекулярно-кінетичну теорію газів*. Відразу зазначимо, що реальні гази набувають властивостей ідеального газу за значного розрідження, коли середня відстань між молекулами набагато більша за їхні розміри. Більшість реальних газів за кімнатної температури й нормального атмосферного тиску є близькими за своїми властивостями до ідеального газу. Найближчими до ідеального газу є водень і гелій (за нормальних умов).

За високих тисків і низьких температур реальний газ не можна вважати ідеальним, оскільки за цих умов відстані між молекулами такі, що сили притягання починають відігравати помітну роль. Істотно впливає на поведінку молекул за цих умов і власний об'єм молекул. Ці обставини враховують в описі реальних газів.

Надалі, досліджуючи властивості газу, матимемо на увазі саме ідеальний газ (навіть якщо термін «ідеальний» не вказано).

Мікроскопічні й макроскопічні параметри газу. Основним завданням вивчення властивостей газів на основі молекулярно-кінетичної теорії є встановлення кількісних зв'язків між величинами, які вимірюються експериментально (тиском, температурою тощо), і характеристиками самих молекул. Останні називають *мікроскопічними параметрами*. До них належать: маса молекули, її швидкість і кінетична енергія хаотичного поступального руху. Параметри газу як молекулярної системи, що

складається з величезної кількості частинок, називаються *макроскопічними параметрами*. Це об'єм, тиск і температура.

Іншими словами, завданням молекулярно-кінетичної теорії газів є встановлення зв'язку між макроскопічними і мікроскопічними параметрами газу.

Поняття про статистичні закономірності. У практичній діяльності ми маємо справу з явищами, у яких задіяна величезна кількість частинок. Наприклад, в 1 см^3 газу за нормальних умов міститься $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. При цьому кожна молекула зазнає близько мільярда зіткнень за секунду, внаслідок чого постійно змінюється її швидкість і напрямок руху. Навіть якщо нам вдасться дослідити закономірності руху однієї молекули, стверджувати, що ці закономірності властиві всій сукупності молекул не можна! Механічний рух великої сукупності молекул має *якісно* інші властивості порівняно з окремою молекулою.

Закони молекулярної фізики ґрунтуються на *статистичних методах*, які дають можливість досліджувати системи, що складаються з великої сукупності частинок. Фізичні закономірності таких систем мають ймовірнісний, або статистичний, характер.

Одним із прийомів статистичного методу є обчислення *середніх значень* різних величин, що зазнають індивідуальних змін. Так, досліджуючи рух сукупності молекул газу, немає потреби визначати швидкість і кінетичну енергію поступального руху кожної молекули окремо, статистичний метод дає змогу обчислити середнє значення цих величин. Швидкості окремих молекул можуть бути будь-якими, проте *середнє значення модуля швидкості* руху молекул — усталена величина. Щоб її визначити, треба додати значення швидкості руху всіх молекул і поділити цю суму на кількість молекул,
$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_N}{N}$$
 (середнє значення величини позначають рискою над її літерним символом).

Надалі нам знадобиться середнє значення не самої швидкості, а квадрата швидкості. Як відомо, від цієї величини залежить середня кінетична енергія молекул. А середня кінетична енергія молекул, як ми незабаром переконаємося, має виняткове значення в молекулярно-кінетичній теорії.

Отже, *середній квадрат швидкості руху молекул* дорівнює
$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N},$$
 де $v_1, v_2, \dots, v_N$ — модулі швидкостей окремих молекул, N — їх кількість у газі.

Середня квадратична швидкість руху молекул ($\bar{v}$) — це величина, яка визначається коренем квадратним із середнього квадрата швидкостей руху молекул: $\bar{v} = \sqrt{\overline{v^2}}$.

Середня квадратична швидкість є характеристикою хаотичного невпорядкованого руху молекул, її ще називають *тепловою*.

У молекулярній фізиці також широко використовуються *закони теорії ймовірності*. Це звільняє від потреби знати точне значення тих чи інших фізичних величин: достатньо мати відомості про найімовірніші значення цих величин. Так, визначити, скільки молекул газу, що містяться в посудині, мають швидкість, наприклад, $300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, неможливо. Ми можемо лише встановити, яка частина молекул має швидкість, що лежить, наприклад, в інтервалі $(300 \pm 10) \frac{\text{м}}{\text{с}}$, або в іншому інтервалі.

Молекулярно-кінетична теорія ідеального газу, користуючись методами статистики, дає змогу теоретично вивести газові закони, пояснити властивості газів і процесів, що відбуваються в газах.

Тиск газу в молекулярно-кінетичній теорії. Газ чинить тиск на всі тіла, з якими контактує. Цим газ принципово відрізняється від рідин і твердих тіл. З курсу фізики 7 класу ми знаємо, що тиск газу на стінки посудини (чи будь-яку іншу поверхню) зумовлений ударами об неї молекул газу. У результаті удару, наприклад, об стінку посудини кожна молекула передає їй імпульс, а отже, діє на неї з певною (дуже малою) силою. Натомість стінка діє на молекулу з такою самою силою у протилежному напрямку. Коли кількість молекул у посудині мала, ці удари відбуваються зі значними (у молекулярному масштабі) інтервалами часу і сприймаються не як безперервна дія, а як низка послідовних, дуже малих дій. Коли кількість молекул у посудині велика, що реально (крім штучно створюваних умов високого вакууму), ці удари відбуватимуться безперервно. Нескінченно малі дії окремих молекул додаються, і результуюча дія сприймається як постійно діюча сила.

Отже, згідно з молекулярно-кінетичними уявленнями, тиск газу виникає в результаті ударів молекул об стінки посудини.

Це величина, яка характеризує стан великої кількості молекул, — тобто макроскопічна величина. У випадку однієї чи кількох молекул поняття тиску взагалі втрачає сенс.

Нагадаємо, що тиск, p — це фізична величина, яка чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні перпендикулярно цій поверхні.

За одиницю тиску в СІ беруть такий тиск, за якого на 1 м^2 поверхні діє сила в 1 Н . Цю одиницю називають паскалем: $1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Використовують і

позасистемні одиниці — міліметр ртутного стовпчика ($1 \text{ мм рт. ст.} \approx 133,3 \text{ Па}$), атмосферу ($1 \text{ атм.} \approx 10^5 \text{ Па}$). Вимірюють тиск газу, нижчий і вищий, ніж атмосферний, за допомогою манометрів, атмосферний — барометрами.

Оскільки величезна кількість молекул газу рухається хаотично, то в середньому кількість ударів у будь-якому напрямку однакова, а отже, тиск на всі стінки посудини має бути однаковим, на що вказує закон Паскаля.

Виведення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу. Використовуючи модель ідеального газу, німецький фізик Рудольф Клаузіус вивів рівняння, що встановлює зв'язок між тиском ідеального газу p , масою молекули m_0 , концентрацією молекул n і середнім квадратом швидкості $\overline{v^2}$.

Точне виведення рівняння молекулярно-кінетичної теорії досить складне. Доведення майже кожного твердження у фізиці, виведення будь-якого рівняння можна виконати з різним ступенем точності й переконливості: дуже спрощено, більш-менш точно й з високою точністю, доступною сучасному стану розвитку науки. Ми обмежимося дуже спрощеним, схематичним виведенням рівняння.

Нехай усередині посудини, площа стінки якої S , міститься ідеальний одноатомний газ з молекулами масою m_0 кожна. Згідно зі статистичними закономірностями, можна вважати, що всі молекули рухаються із середньою

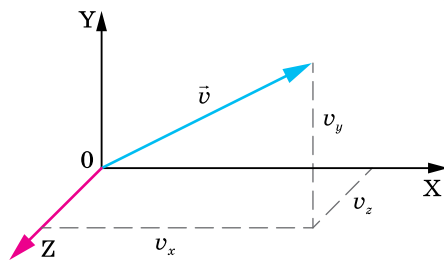
$$\text{квадратичною швидкістю } \bar{v} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}}.$$

У декартовій системі координат вектор швидкості $\vec{v}$ має три складові: v_x, v_y, v_z (мал. 85). За визначенням $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$.

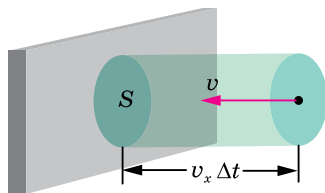
Повна хаотичність руху дає змогу стверджувати, що рух у всіх напрямках відбувається з однаковою швидкістю, тому $\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z}$, а отже, $\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$, звідки $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$.

Припустімо, що молекули газу рухаються від однієї стінки до іншої без взаємних зіткнень. Це спрощення внаслідок великої кількості молекул N і хаотичності їх руху не впливає на точність розрахунків. Під час зіткнень зі стінками посудини молекули ідеального газу взаємодіють з ними за законами механіки як абсолютно пружні тіла. Молекула діє на стінку силою $\vec{F}_1$, що, за третім законом Ньютона, дорівнює силі $\vec{F}_2$, з якою стінка посудини діє на молекулу і протилежна їй за напрямком.

Нехай молекула масою m_0 рухається зі швидкістю $\vec{v}_0$ перпендикулярно до стінки посудини, площа якої S_0 (мал. 86). Пружно вдарившись об стінку, вона передає їй імпульс: $\vec{F}_1 \Delta t = m_0 \vec{v} - m_0 \vec{v}_0$, де $\vec{v}$ —



Мал. 85. Проекції вектора швидкості $\vec{v}$ на осі системи координат



Мал. 86. До виведення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії

швидкість молекули після удару об стінку. Оскільки взаємодія пружна, модуль швидкості не змінюється, а напрямок руху змінюється на протилежний, отже $\vec{v} = -\vec{v}_0$, то $\vec{F}_1 \Delta t = m_0 \vec{v} - (-m_0 \vec{v}) = 2m_0 \vec{v}$.

Якщо швидкість руху молекули напрямлена під довільним кутом до стінки, то під час зіткнення молекули зі стінкою проекція її швидкості на вісь, перпендикулярну до поверхні стінки, змінює знак, $v_x = -v_{0x}$, а проекції швидкостей v_y та v_z на осі, паралельні поверхні стінки, лишаються без змін. Отже, зміна проекції імпульсу молекули дорівнює: $F_1 \Delta t = 2m_0 v_x$.

Щоб обчислити імпульс сили F , яка діє на стінку з боку всіх молекул, підрахуємо кількість зіткнень молекул зі стінкою за час Δt . За цей час стінки посудини досягнуть лише ті молекули, які містяться в об'ємі $V = S v_x \Delta t$. Оскільки в цьому об'ємі половина молекул рухається до стінки, а половина від неї, то кількість молекул Z , які вдаряться об стінку за час Δt , дорівнює $Z = \frac{N}{2} = \frac{nV}{2}$, де $n = \frac{N}{V}$ — концентрація молекул. Підста-

вивши значення об'єму V , отримаємо $Z = \frac{n v_x \Delta t S}{2}$.

Усі ці молекули передадуть стінці імпульс, який згідно з другим законом Ньютона дорівнює імпульсу сили $F \Delta t = 2m_0 v_x Z = \frac{2m_0 v_x^2 n \Delta t S}{2}$. Звідки $F = m_0 n S v_x^2$.

Оскільки для великих сукупностей молекул діють закони статистики, слід брати середнє значення квадрата проекції швидкості $\overline{v_x^2}$. Врахувавши, що $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$, а тиск $p = \frac{F}{S}$, одержимо вираз **основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів**:

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

Отримавши основне рівняння МКТ газів, ми виконали основне завдання молекулярно-кінетичної теорії газів — установили зв'язок між тиском (макроскопічним параметром) з такими мікроскопічними параметрами, як маса однієї молекули й середня квадратична швидкість руху молекул.

Це рівняння можна подати і в іншому вигляді. Поділимо і помножимо праву частину рівняння на 2: $p = \frac{2 \cdot n m_0 \overline{v^2}}{2 \cdot 3}$ і, враховуючи, що $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \bar{E}$, бачимо, що **тиск ідеального газу пропорційний середній кінетичній енергії хаотичного руху його молекул**: $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$.

Основне рівняння МКТ газів підтверджує такий факт: що більшими є маси молекул та їхні швидкості, а також кількість молекул в одиниці об'єму (концентрація), то більший тиск вони чинять на стінки посудини.

Парціальний тиск. Якщо газ є сумішшю кількох ідеальних газів, то молекули кожного типу газу чинять тиск на стінку посудини незалежно.

Парціальний тиск — це тиск, що його чинив би газ, який входить до складу суміші газів, коли б він сам за тієї самої температури займав увесь об'єм.

Згідно з принципом суперпозиції сил тиски газів, які утворюють суміш (парціальні тиски), додаються. Це твердження вперше сформулював у 1801 р. англійський фізик і хімік Джон Дальтон (1766–1844), тому його називають **законом Дальтона**:

тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків складових газів,

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

Закон Дальтона строго виконується для суміші ідеальних газів; наближено застосовується для реальних газів за температур і тисків, далеких від *критичних*¹. Так, атмосферний тиск складається із парціальних тисків азоту, кисню та інших газів, що містяться в атмосферному повітрі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Назвіть умови, за яких газ можна вважати ідеальним.
2. Які величини називають мікроскопічними та макроскопічними параметрами газу?
3. Чому в молекулярній фізиці використовують статистичні методи? У чому їх суть?
4. Який механізм виникнення тиску газу з погляду МКТ?
5. Які особливості основного рівняння ідеального газу й чому його називають основним?
6. Виведіть і поясніть фізичний зміст основного рівняння МКТ.
7. У чому полягає суть закону Дальтона?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Тиск розрідженого газу $p = 5 \cdot 10^4$ Па, його густина $\rho = 4,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Визначте середню квадратичну швидкість хаотичного руху молекул газу.

Дано:

$$p = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$\rho = 4,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\bar{v} = ?$$

Розв'язання:

В основному рівнянні МКТ ідеального газу для тиску

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2, \text{ добуток } n m_0 = \rho.$$

$$\text{Отже, } p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2. \text{ Звідси } \bar{v} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \approx 1900 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$\text{Відповідь: } \bar{v} = 1900 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

¹ Для кожної речовини існує свій критичний стан, який визначається критичною температурою, тиском та об'ємом.

ВПРАВА 18

1. Який тиск газу, якщо середня квадратична швидкість руху його молекул — $500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а його густина становить $1,35 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$?
2. Чому дорівнює середня квадратична швидкість руху молекул газу, якщо, маючи масу 6 кг, він займає об'єм 5 м^3 за тиску 200 кПа?
3. Визначте концентрацію молекул кисню, якщо його тиск 0,2 МПа, а середня квадратична швидкість руху молекул дорівнює $700 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
4. Визначте середню кінетичну енергію руху молекули одноатомного газу за тиску 20 кПа. Концентрація молекул цього газу за зазначеного тиску дорівнює $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.
5. У закритій посудині міститься ідеальний газ. Як зміниться його тиск, якщо середня квадратична швидкість молекул збільшиться на 20 %?

§ 20

Термодинамічний і молекулярно-кінетичний зміст температури

Термодинамічна рівновага. Температура. Як уже зазначалося, у молекулярній фізиці використовують як термодинамічні, так і статистичні методи дослідження. Згідно з термодинамічним підходом, будь-яке *макроскопічне* тіло або *групу макроскопічних* тіл називають *термодинамічною системою*. Ідеальний газ є термодинамічною системою. Величини, які характеризують стан термодинамічної системи без урахування молекулярної будови тіл, — *об'єм, тиск, температуру* — називають відповідно макроскопічними (або термодинамічними) параметрами.

Температура — це фізична величина, про яку ви знаєте з раннього дитинства як про ступінь нагрятості тіл (холодне, тепле, гаряче), характеристики теплої або холодної погоди в різні пори року, показник стану здоров'я тощо. Побутове поняття температури часто перешкоджає глибокому розумінню її фізичного змісту. Це одна з непростих фізичних величин, до розуміння якої людство йшло протягом багатьох століть.

Численні спостереження та досліді свідчать, що для будь-яких взаємодіючих макроскопічних тіл або групи тіл (термодинамічної системи) за незмінних зовнішніх умов раніше чи пізніше *настає стан теплової рівноваги*.

Тепловою, або термодинамічною, рівновагою називають такий стан системи, коли всі її макроскопічні параметри як завгодно довго лишаються незмінними.

Отже, коли між двома тілами встановлюється тепловий контакт і зовнішні умови не змінюються, тіла приходять до стану теплової рівноваги.

Термодинамічна (або абсолютна температура), T є єдиною функцією стану термодинамічної системи, яка характеризує напрямок самовільного теплообміну між тілами (системами).

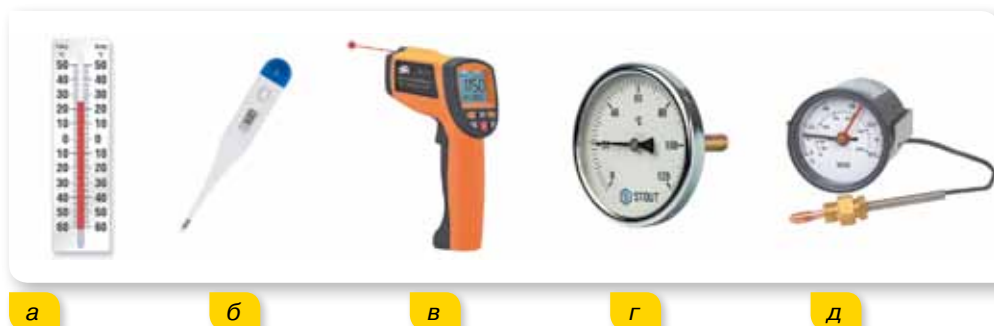
Термодинамічна система може перебувати в різних станах теплової рівноваги. У кожному із цих станів температура має певне значення. Інші величини можуть мати у стані теплової рівноваги різні (але постійні) значення. Так, об'єми різних частин системи й тиски всередині їх, за наявності твердих перегородок, можуть бути різними. Якщо до кімнати ви внесете м'яч, що був наповнений стиснутим повітрям надворі, через деякий час температура повітря в ньому та кімнаті зрівняються. А тиск повітря в м'ячі все одно буде більшим, ніж у кімнаті.

У всіх частинах системи, що перебуває в стані теплової рівноваги, температура має одне й те саме значення.

Способи вимірювання температури. Термометри. Властивість температури набувати однакового значення для тіл, що перебувають у стані теплової рівноваги, покладено в основу її вимірювання. Прилади для вимірювання температури — *термометри* (мал. 87) конструктивно складаються з вимірювального елемента й температурної шкали.

Щоб виміряти температуру певного тіла, його приводять у контакт із термометром і чекають, поки теплообмін між тілом і термометром припиниться. Термометр фіксує власну температуру, що дорівнює температурі тіла, з яким він перебуває в тепловій рівновазі.

Щоб виготовити термометр, можна скористатися зміною будь-якої макроскопічної величини залежно від температури: об'єму, тиску, електричного опору тощо. Найчастіше на практиці використовують рідинні термометри (мал. 87, а), дія яких ґрунтується на залежності об'єму рідини (ртуті або спирту) від зміни температури.



Мал. 87. Термометри різних конструкцій: а — рідинний; б — електричний, в — безконтактний (пірометр); г — біметалевий; д — газовий

Дія електричних термометрів (мал. 87, б) ґрунтується на залежності сили струму від температури. Електричними термометрами інших конструкцій температуру можна вимірювати й на основі залежності опору провідника (резистора) або напівпровідника (термістора) від температури. Ці термометри дають змогу виконувати вимірювання дистанційно.

У безконтактних термометрах (пірометрах) (мал. 87, в) для вимірювання температури використовують залежність випромінювання тіла від температури. За допомогою пірометрів вимірюють температуру тіл від $+300$ до $+6000$ °C і вище (наприклад, температуру зір).

Дія біметалевих термометрів (мал. 87, г) ґрунтується на залежності деформації біметалевої пластинки від температури.

У газових термометрах на зміну температури вказує зміна тиску газу, вміщеного у скляній посудині сталого об'єму (мал. 87, д). За постійних значень об'єму V і кількості молекул N тиск газу, який вимірюють манометром, може бути мірою температури газу, а отже, будь-якого тіла, з яким газ перебуває в тепловій рівновазі.

В оптичних пірометрах порівнюють випромінювання тіла на певній довжині хвилі та спеціальної лампи, яскравість якої можна регулювати, змінюючи значення струму. Зображення тіла й нитки лампи проєктують на одну площину. Підбираючи значення струму в лампі, досягають однакової яскравості зображень. За напругою, прикладеною до лампи, визначають температуру тіла. Індикатор в оптичному пірометрі — око експериментатора.

Абсолютна температурна шкала. Термодинамічна температура відлічується за абсолютною термодинамічною шкалою (шкалою Кельвіна), яка є основною в системі СІ. Відповідно одиницею температури є кельвін: 1 К.

У 1848 р. видатний англійський фізик Вільям Томсон (лорд Кельвін) (1824–1907) запропонував точку 0 °C температурної шкали Цельсія змістити до 273,15 К, залишивши ціну поділки незмінною.

Перехід від шкали Цельсія до абсолютної температурної шкали такий: $T(\text{К}) = (t\text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15)\text{ К}$, $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ К}$.

Температуру 0 К називають *абсолютним нулем температур*, за шкалою Цельсія йому відповідає $-273,15$ °C. Це температура, за якої мав би припинитися поступальний рух молекул. Однак доведено, що навіть за абсолютного нуля молекулярний рух не припиняється — молекули здійснюють коливальні рухи. Досягти абсолютного нуля неможливо — це один з основних законів природи. Тим більше, неможливо дістати температуру, нижчу ніж абсолютний нуль. Що ближча температура охолоджуваного тіла до абсолютного нуля, то важче проходить подальше охолодження.

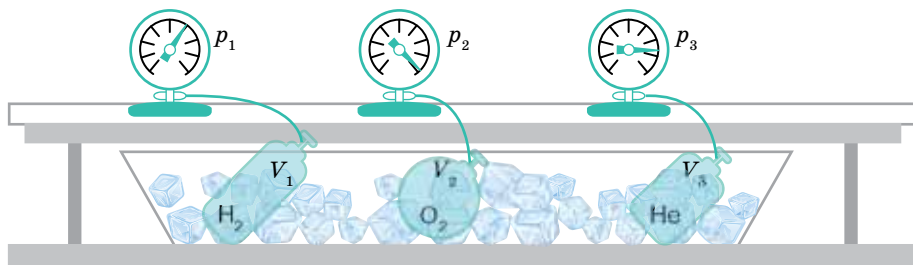
Температура й середня кінетична енергія поступального руху молекул газу. У стані теплової рівноваги макропараметри (тиск, об'єм, температура тощо) не змінюються як завгодно довго. Це означає, що в тілах не відбуваються хімічні реакції, агрегатні перетворення тощо. Однак це не означає, що всередині системи у стані теплової рівноваги не рухаються

атоми й молекули: мікропроцеси в тілах не припиняються, оскільки ні на мить не припиняється тепловий рух молекул або атомів. Положення і швидкості руху молекул у стані теплової рівноваги безперервно змінюються, а макропараметри — є сталими, бо вони визначаються поведінкою не окремих молекул, а їх усередненим результатом.

Якщо два тіла з різними температурами приведено в контакт, то їхні молекули внаслідок хаотичного руху стикаються, а отже, відбувається передавання енергії, яке триває доти, поки середні кінетичні енергії молекул зрівнюються. Саме тоді й настає *теплова рівновага*.

Можна висловити *припущення*, що середня кінетична енергія молекул і температура однаково характеризують процес встановлення теплової рівноваги, тільки перша — мікроскопічно, а друга — макроскопічно. Експериментально встановити зв'язок середньої кінетичної енергії молекул з температурою дуже важко, бо середню кінетичну енергію молекули не можна виміряти безпосередньо. Спочатку треба з'ясувати зв'язок середньої кінетичної енергії з величинами, які можна виміряти. Зробимо це на прикладі ідеального газу.

Звернімося до такого досліду. Візьмемо кілька посудин, заповнених різними газами, наприклад, воднем, гелієм і киснем. Посудини мають певні об'єми й сполучені з манометрами. Це дає змогу виміряти тиск у кожній посудині. Маса газів відома, а отже, відома кількість молекул у кожній посудині. Приведемо гази у стан теплової рівноваги. Для цього помістимо посудини в лід, що тане, і почекаємо, поки встановиться рівновага, і тиск газів перестане змінюватись (мал. 88). Після цього можна стверджувати, що всі гази мають однакову температуру 0°C . Тиск газів, їх об'єми й кількості молекул будуть різними.



Мал. 88. Установка для дослідів

За основним рівнянням МКТ, тиск ідеального газу $p = \frac{2}{3}n\bar{E}$. Ураховуючи, що $n = \frac{N}{V}$, можна записати $\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{pV}{N}$. Отже, середню кінетичну енергію молекул можна визначити, якщо виміряти тиск і об'єм газу й обчислити кількість молекул, знаючи масу газу, сталу Авогадро та молярну масу газу: $N = \frac{m}{M} N_A$.

Проведені вимірювання показали, що за однакової температури $\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{H}_2}} = \frac{p_{\text{He}} V_{\text{He}}}{N_{\text{He}}} = \frac{p_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}}{N_{\text{O}_2}}$. Отже, однаковими є і значення $\bar{E}$ для всіх газів.

Звертаємо вашу увагу на той факт, що для тисків у тисячі атмосфер, коли густина газів стає досить значною, відношення $\frac{pV}{N}$ перестає бути точно визначеним, незалежним від об'ємів, що їх займають гази. Воно справджується для розріджених газів, які можна вважати ідеальними.

Якщо всі посудини з газами поставити в киплячу воду (+100 °C) за нормального атмосферного тиску, то значення відношення $\frac{pV}{N}$, як і раніше, для всіх газів буде однаковим, але збільшиться (порівняно з 0 °C). Завдяки цьому можна стверджувати, що величина $\frac{pV}{N}$ зростає за підвищенням температури, більше того, ні від чого, крім температури, не залежить.

Цей дослідний факт дає змогу розглядати величину $\frac{pV}{N}$ як температуру, що вимірюється в енергетичних одиницях — джоулях: $\left[\frac{pV}{N} \right] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$. Проте, по-перше, це незручні для практичного застосування одиниці. Так, температурі 100 °C відповідає дуже мала величина — порядку 10^{-21} Дж. А по-друге, і це головне, уже давно температуру вимірюють у градусах. Вважатимемо величину $\frac{pV}{N}$ прямо пропорційною температурі T , яку вимірюють у градусах (за шкалою Кельвіна), $\frac{pV}{N} \sim T$ або, переходячи до знаку рівності, $\frac{pV}{N} = kT$.

Перепишемо формулу $\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{pV}{N}$ у вигляді $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$ і прирівняємо її праву частину до правої частини формули $\frac{pV}{N} = kT$. Отримаємо: $\frac{2}{3} \bar{E} = kT$.

Звідси $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$, тобто

середня кінетична енергія хаотичного руху молекул газу пропорційна абсолютній температурі.

Що вищою є температура, то швидше рухаються молекули. Отже, припущення про зв'язок температури й середньої кінетичної енергії руху молекул підтвердилось.

Стала Больцмана. Останнє співвідношення одержав австрійський фізик Больцман. Він показав, що середня кінетична енергія поступального руху молекул газу лінійно залежить від температури. Коефіцієнт про-

порційності, що входить до формули, називають *сталою Больцмана*, його значення: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Для вимірювання температури можна використати довільні одиниці енергії. Проте історично склалося так, що для вимірювання температури було запропоновано спеціальні одиниці — градуси. Причина цього в тому, що вимірювати температуру навчилися раніше, ніж було з'ясовано її фізичний зміст. Саме стала Больцмана є тим коефіцієнтом, який переводить одиниці енергії джоулі в градуси.

Стала Больцмана — це фундаментальна фізична стала, яка пов'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою в кельвінах. Чисельно вона дорівнює зміні кінетичної енергії однієї молекули ідеального газу в результаті зміни температури газу на 1 К.

Молекулярно-кінетичний зміст температури. *Абсолютна температура* (або просто температура) — це макроскопічний параметр, який характеризує внутрішній тепловий стан тіла й визначається рухом величезної кількості його структурних елементів. У цьому розумінні температура є статистичною величиною, а тому поняття температури має сенс лише для величезної кількості молекул. Не можна говорити про температуру однієї або кількох (небагатьох) молекул, про «гарячі» або «холодні» молекули.

Співвідношення між температурою й середньою кінетичною енергією руху молекул, яке було встановлено для ідеального газу, справджується для будь-яких речовин, рух атомів або молекул яких підпорядковується законам механіки Ньютона. Воно справджується для рідин і твердих тіл, у яких атоми можуть лише коливатись біля положень рівноваги у вузлах кристалічних ґраток.

Температура як термодинамічна величина характеризує тепловий стан системи, як молекулярно-кінетична величина — інтенсивність хаотичного руху молекул у цій системі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які характерні ознаки стану теплової рівноваги? Наведіть приклади встановлення теплової рівноваги тіл, які оточують вас у повсякденному житті.
2. Якою фізичною величиною характеризується стан теплової рівноваги?
3. Поясніть принцип побудови температурних шкал Цельсія та Кельвіна. Запишіть формули, що виражають співвідношення між значеннями температури, вимірюваної за шкалами Цельсія та Кельвіна.
4. Як пов'язані об'єм, тиск і кількість молекул різних газів у стані теплової рівноваги?
5. Запишіть формулу, що показує, як залежить від температури середня кінетична енергія поступального руху молекул.
6. Температура газу збільшилася від 1 до 2 °С. Чи можна сказати, що середня кінетична енергія його частинок також збільшилась удвічі?

7. Запишіть і поясніть формулу, що показує залежність тиску газу від його температури та концентрації молекул.
8. Що називають абсолютним нулем температури? Який фізичний зміст цього поняття з погляду МКТ?
9. Який фізичний зміст сталої Больцмана? Чому вона дорівнює?



Приклади розв'язування задач

Задача. Визначте середню кінетичну енергію молекул одноатомного газу та концентрацію молекул за температури 290 К і тиску 0,8 МПа.

Дано:

$$T = 290 \text{ К}$$

$$p = 0,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\bar{E} \text{ — ?}$$

$$n \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Урахувавши рівняння $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$ і співвідношення

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}, \text{ одержимо ще один вираз основного рівняння}$$

$$\text{МКТ газів: } p = nkT, \text{ а, отже: } n = \frac{p}{kT}.$$

Із цих формул легко визначити шукані величини:

$$\bar{E} = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 290 \text{ К}}{2} = 6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж},$$

$$n = \frac{0,8 \cdot 10^6 \text{ Па}}{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 290 \text{ К}} = 2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}.$$

Відповідь: $6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}; 2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}.$

ВПРАВА 19

1. За якої температури середня квадратична швидкість руху молекул азоту дорівнює $830 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?
2. На скільки відсотків збільшується середня кінетична енергія руху молекул газу в разі збільшення його температури від 7 до 35 °С?
3. У скільки разів середня квадратична швидкість руху молекул кисню менша за середню квадратичну швидкість руху молекул водню, якщо температури цих газів однакові?
4. Після підвищення температури ідеального газу на 150 К середня квадратична швидкість руху його молекул збільшилась від 400 до $500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. На скільки градусів треба нагріти цей газ, щоб збільшити середню квадратичну швидкість його молекул від 500 до $600 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?

5. У посудині об'ємом 3 дм³ міститься гелій масою 4 мг, азот масою 70 мг і $5 \cdot 10^{21}$ молекул водню. Який тиск суміші, якщо її температура 27 °С?
6. Побудуйте графік залежності густини кисню: а) від тиску (за температури $T = \text{const} = 390 \text{ K}$ в інтервалі $0 \leq p \leq 400 \text{ кПа}$ через кожні 50 кПа); б) від температури (за $p = \text{const} = 400 \text{ кПа}$ в інтервалі $200 \leq T \leq 300 \text{ K}$ через кожні 20 К).

§ 21

Рівняння стану ідеального газу. Об'єднаний газовий закон

Рівняння стану ідеального газу. Універсальна газова стала. Як уже зазначалося, ідеальний газ є найпростішою термодинамічною системою. Стан газу певної маси повністю визначений, якщо відомі його тиск, температура та об'єм. Ці величини називають *параметрами стану газу*. Якщо ці параметри змінюються, то в газі відбувається той або інший *процес*. У природі часто протікають процеси, у яких одночасно змінюються всі три величини, що характеризують стан газу. Рівняння, що зв'язує параметри стану цього газу (p, V, T), називають *рівнянням стану ідеального газу*.

Слід зазначати, що задовго до того, як рівняння стану ідеального газу було виведено на основі молекулярно-кінетичних уявлень, закономірності поведінки газів у різних умовах були досить добре досліджені експериментально. Саме тому рівняння стану ідеального газу можна розглядати як узагальнення експериментальних фактів, що знаходять своє пояснення в молекулярно-кінетичній теорії.

Нині рівняння стану ідеального газу легко можна вивести з основного рівняння МКТ. Урахувавши рівняння $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ і співвідношення

$$p = \frac{2}{3}n\bar{E}, \text{ одержимо ще один вираз основного рівняння МКТ газів:}$$

$$p = nkT,$$

де p — тиск газу, n — концентрація молекул ідеального газу, k — стала Больцмана, T — абсолютна температура газу. Далі, $p = nkT \rightarrow$

$$\rightarrow p = \frac{N}{V}kT \rightarrow pV = NkT \rightarrow pV = \frac{m}{M}N_AkT.$$

Добуток сталої Авогадро N_A на сталу Больцмана k є також сталою величиною, яку називають **універсальною (молярною) газовою сталою** й позначають $R = N_Ak$. Підрахуємо значення універсальної газової сталої:

$$R = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Отже, ми отримали з основного рівняння МКТ газів рівняння, яке містить тільки макроскопічні (термодинамічні) характеристики стану газу

і яке називають рівнянням стану ідеального газу. Це рівняння ще називають **рівнянням Менделєєва — Клапейрона**:

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Рівняння Менделєєва — Клапейрона дає змогу визначити один невідомий параметр стану ідеального газу, якщо інші параметри відомі, для газу будь-якого хімічного складу й довільної маси m . Єдина величина в цьому рівнянні, що залежить від виду газу, — це його молярна маса M .

Якщо врахувати, що густина газу $\rho = \frac{m}{V}$, то рівняння Менделєєва — Клапейрона матиме вигляд: $p = \frac{\rho}{M} RT$. Або врахувавши, що $v = \frac{m}{M}$, отримуємо: $pV = vRT$.

Для суміші газів рівняння набуває вигляду: $pV = (v_1 + v_2 + \dots + v_n) RT$, де $v_1, v_2, \dots$ — кількості речовини кожного з газів суміші.

Для одного моля ($v = 1$ моль) довільного газу це співвідношення набуває вигляду: $pV = RT$.

Отже, виведене на підставі молекулярно-кінетичних уявлень рівняння підтверджує ще один установлений експериментально закон. Якщо в це рівняння підставити значення тиску й температури, що відповідають нормальним умовам ($T = 273,15$ К (0°C), $p = 1$ атм $= 1,013 \cdot 10^5$ Па), то один моль будь-якого газу займає об'єм $V_0 = 0,0224$ м³. Це твердження називають **законом Авогадро**.

Лише за тиску в сотні атмосфер (коли виявляє себе об'єм молекул газу) і за температур, близьких до температур зрідження газу (внаслідок великої сили взаємодії молекул), відхилення від результатів розрахунків за рівнянням стану ідеального газу стають істотними.

Об'єднаний газовий закон. У природі часто відбуваються процеси, коли водночас змінюються всі три параметри стану газу, при цьому маса газу залишається незмінною ($m = \text{const}$). Якщо параметри на початку процесу, який відбувається з газом певної маси, позначити через p_1, V_1, T_1 , а їх значення в кінці процесу — через p_2, V_2, T_2 , то $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R$ і $\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R$.

Оскільки праві частини обох виразів однакові, однакові і їхні ліві частини.

Отже, для газу незмінної маси: $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$, або $\frac{pV}{T} = \text{const}$ — *під час переходу газу незмінної маси з одного стану в інший добуток його тиску на об'єм, поділений на термодинамічну температуру газу, є величиною сталою*.

Рівняння стану ідеального газу $\frac{pV}{T} = \text{const}$ виведене в 1834 р. французьким фізиком Бенуа Клапейроном (1799–1864), який протягом десяти років працював у Росії. У 1874 р. видатний російський учений Дмитро Менделєєв удосконалив формулу рівняння стану, ввівши макроскопіч-

ний параметр — масу газу. Саме тому рівняння $pV = \frac{m}{M}RT$ називають *рівнянням Менделєєва — Клапейрона*.

Співвідношення між значеннями тих чи інших параметрів на початку та в кінці процесу називається *газовим законом*. Рівняння Клапейрона

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ ще називають } \textit{об'єднаним газовим законом}.$$



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. Що таке параметри стану системи? Які величини до них належать?
2. Виведіть рівняння Менделєєва — Клапейрона для довільної маси ідеального газу.
3. Виведіть рівняння Клапейрона. Як воно формулюється?
4. Чому дорівнює універсальна газова стала в СІ?
5. Чому дорівнює об'єм одного моля будь-якого газу за нормальних умов?



Приклади розв'язування задач

Задача. У приміщенні об'ємом $V = 100 \text{ м}^3$ після роботи обігрівача температура повітря¹ збільшилася від $t_1 = 17^\circ\text{C}$ до $t_2 = 22^\circ\text{C}$. Яка маса Δm повітря, що вийшло з кімнати? Атмосферний тиск $p = 10^5 \text{ Па}$.

Дано:

$$V = 100 \text{ м}^3$$

$$t_1 = 17^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 22^\circ\text{C}$$

$$p = 10^5 \text{ Па}$$

$$M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$\Delta m = ?$$

Розв'язання:

Запишемо рівняння Менделєєва — Клапейрона для двох станів повітря:

$$1) \text{ для } t_1 = 17^\circ\text{C} (T_1 = 290 \text{ К}), pV = \frac{m_1}{M}RT_1;$$

$$2) \text{ для } t_2 = 22^\circ\text{C} (T_2 = 295 \text{ К}), pV = \frac{m_2}{M}RT_2.$$

Визначимо маси повітря в кімнаті в першому та другому станах:

$$m_1 = \frac{pVM}{RT_1} \text{ і } m_2 = \frac{pVM}{RT_2}.$$

$$\text{Маса повітря, що вийшло з кімнати: } \Delta m = m_1 - m_2 = \frac{pVM}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Після підстановки числових значень отримаємо: $\Delta m = 2,1 \text{ кг}$.

Відповідь: 2,1 кг.

¹ У цій і наступних задачах, якщо немає спеціальних застережень, повітря вважайте однорідним газом, молярна маса якого становить $0,029 \text{ кг/моль}$.

ВПРАВА 20

1. Визначте густину водню за температури $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску 830 кПа .
2. Який тиск стиснутого повітря, що міститься в балоні ємністю 20 л за $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо маса цього повітря 2 кг ?
3. Густина деякої газоподібної речовини за температури $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ й нормального атмосферного тиску дорівнює $2,5\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Визначте молярну масу цієї речовини.
4. Яка кількість речовини міститься в газі, якщо за температури 240 К і під тиском 200 кПа його об'єм дорівнює 40 л ?
5. Газ за тиску $0,2\text{ МПа}$ і температури $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ має об'єм 5 л . Визначте об'єм газу цієї маси за нормальних умов.
6. Пробірку, перевернуту догори дном, занурили у воду на деяку глибину. Яка концентрація повітря у пробірці на глибині 3 м ? Температура води та повітря однакові й дорівнюють $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосферний тиск — 760 мм рт. ст.
7. Кулю із жорсткою оболонкою масою $11,6\text{ г}$ заповнено воднем. Об'єм водню — 10 л . Температура водню та повітря, що оточує кулю, — $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначте тиск водню в кулі, якщо результуюча піднімальна сила, яка діє на кулю, дорівнює нулю.

§ 22 Ізопроееси

Ізопроееси. Процеси, які відбуваються за незмінного значення одного з параметрів газу сталої маси m і певного сорту M , називають **ізопроеесами** (від грец. *ізо* — рівний, однаковий). За допомогою рівняння стану можна досліджувати ізопроееси ідеального газу.

Оскільки жоден із параметрів газу не може бути строго фіксованим, то ізопроеес — це ідеалізована модель стану газу.

Закон Бойля — Маріотта. Графіки ізопроемічного проеесу. Розглянемо проеес, що відбувається в газі за сталої температури. Процес зміни стану термодинамічної системи за сталої температури називають *ізопроемічним* ($m = \text{const}$, $M = \text{const}$, $T = \text{const}$).

Для цих умов з рівняння Клапейрона $\frac{pV}{T} = \text{const}$ отримуємо

$$pV = \text{const} \text{ або } p_1V_1 = p_2V_2 \text{ чи } \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

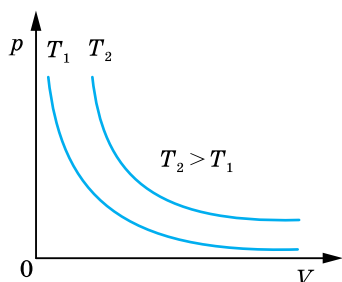
Це рівняння було отримано експериментально (до створення молекулярно-кінетичної теорії) англійським фізиком Робертом Бойлем (1662 р.) і незалежно, французьким фізиком Едмом Маріоттом (1676 р.).

Закон Бойля — Маріотта можна сформулювати так:

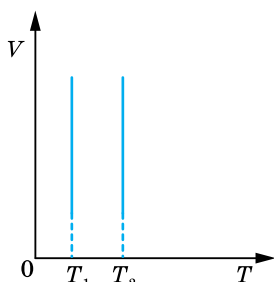
для ідеального газу деякої маси (сталого кількості речовини) за сталої температури тиск газу змінюється обернено пропорційно до об'єму.

Цей закон, як і інші газові закони, є окремим випадком рівняння стану газу й виконується для будь-яких газів, які можна вважати ідеальними, а також для їх сумішей (наприклад, для повітря).

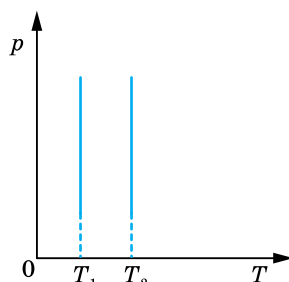
Часто закон Бойля — Маріотта записують так: $p = \frac{\text{const}}{V}$. Графічно залежність тиску газу сталої маси від об'єму за умови $T = \text{const}$ можна зобразити у вигляді гіперболи (порівняйте з $y = \frac{a}{x}$), яка для цього процесу називається *ізотермою* (мал. 89, а).



а



б



в

Мал. 89. Ізотерми: а — у координатах pV ; б — у координатах VT ; в — у координатах pT

Різним температурам відповідають різні ізотерми: що вищою є температура, то вище на координатній площині pV розташована гіпербола. Це корисно знати для розв'язування графічних задач.

На координатних площинах pT і VT ізотерми зображуються прямими, перпендикулярними до осі температур (мал. 89, б і в).

Ізотермічним можна вважати процес стиснення повітря компресором або розширення газу під поршнем насоса під час відкачування його з посудини. Процес має бути достатньо швидким, щоб не встиг відбутись теплообмін з навколишнім середовищем.

Закон Гей-Люссака. Графіки ізобарного процесу. Процес зміни стану термодинамічної системи за сталого тиску називають *ізобарним* (від грец. *барос* — вага) ($m = \text{const}$, $M = \text{const}$, $p = \text{const}$).

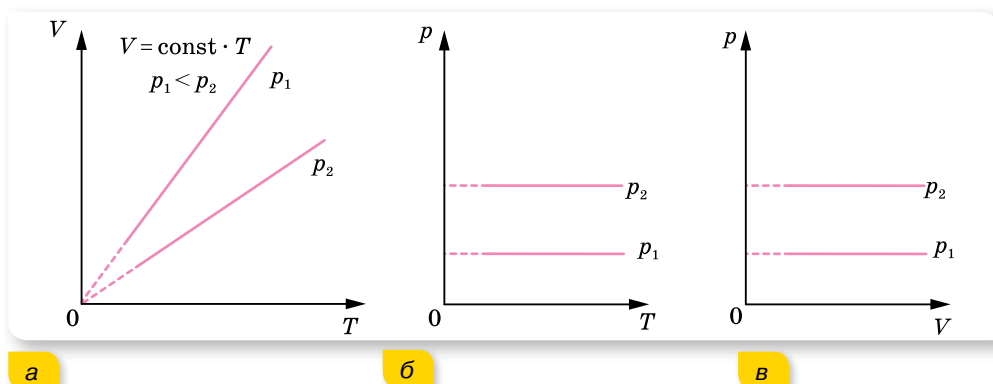
Відповідно з рівняння Клапейрона $\frac{pV}{T} = \text{const}$ для вказаних умов маємо: $\frac{V}{T} = \text{const}$ або $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$.

Цей закон у 1802 р. експериментально установив французький учений Жозеф Луї Гей-Люссак.

Закон Гей-Люссака формулюється так:

для ідеального газу певної маси з незмінним тиском відношення об'єму до температури залишається сталим.

Графік залежності об'єму від температури за сталого тиску $V = \text{const} \cdot T$ є прямою лінією (порівняйте з $y = ax$), яку називають *ізобарою*. На малюнку 90, а зображено дві ізобари в координатах V, T для різних значень тиску p_1 і p_2 , причому $p_1 < p_2$. На малюнку 90, б і в наведено графіки ізобарного процесу в координатах p, T і p, V .



Мал. 90. Ізобари

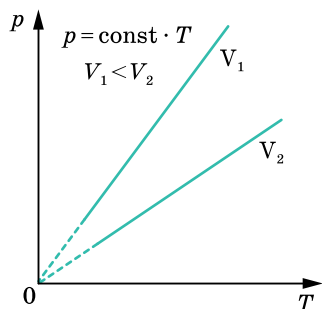
Закон Шарля. Графіки ізохорного процесу. Процес зміни стану термодинамічної системи за сталого об'єму називають ізохорним (від грец. *хорема* — місткість).

Якщо $m = \text{const}$, $M = \text{const}$, $V = \text{const}$, то з рівняння стану $\frac{pV}{T} = \text{const}$ випливає, що $\frac{p}{T} = \text{const}$ або $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

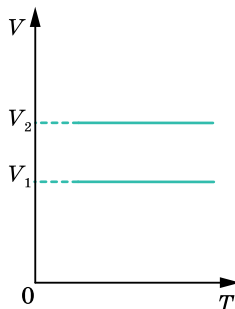
У 1787 р. французький фізик Жак Шарль експериментально встановив цей газовий закон, тому його називають **законом Шарля**.

Для ідеального газу певної маси з незмінним об'ємом відношення тиску газу до температури залишається сталим.

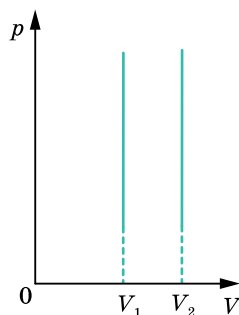
Графіком залежності тиску від температури за сталого об'єму $p = \text{const} \cdot T$ є пряма лінія (порівняйте $y = ax$), яку називають *ізохорою*. На малюнку 91, а (с. 114) в координатах p, T зображено дві ізохори для різних значень об'єму V_1 і V_2 , причому $V_1 < V_2$. На малюнку 91, б і в наведено графіки процесу в координатах V, T і p, V .



а



б



в

Мал. 91. Ізохори



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Який процес називають ізотермічним? Яким законом описується цей процес? Зобразіть і поясніть графіки ізотермічного процесу.
2. Який процес називають ізобарним? Яким законом описують ізобарний процес? Зобразіть і поясніть графіки ізобарного процесу.
3. Який процес називають ізохорним? Як формулюють і записують цей закон? Зобразіть і поясніть графіки ізохорного процесу.



Експериментуємо

Визначте атмосферний тиск двома способами. Обладнання для першого досліду: дві скляні трубки, сполучені гумовою трубкою й закріплені в штативі, вода, лійка, корок, лінійка. Обладнання для другого досліду: висока мензурка (близько 40 см) з водою, пробірка, лінійка.



Приклади розв'язування задач

Отже, ви переконалися, що газові закони Бойля — Маріотта, Гей-Люссака і Шарля — це окремі випадки рівняння Менделєєва — Клапейрона. Газові закони та їх графічні ілюстрації дають змогу вивчати довільні термодинамічні процеси з ідеальним газом.

Задача 1. Унаслідок нагрівання газу в закритій посудині на 140 К тиск збільшився в 1,5 раза. Визначте початкову температуру газу.

Дано:

$$\Delta T = 140 \text{ К}$$

$$p_2 = 1,5 p_1$$

$$T_1 = ?$$

Розв'язання:

Оскільки посудина замкнута, то маса газу та його об'єм залишаються незмінними, тому процес нагрівання можна

вважати ізохорним: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$.

Оскільки $p_2 = 1,5p_1$, $T_2 = T_1 + \Delta T$, то $\frac{p_1}{T_1} = \frac{1,5p_1}{T_1 + \Delta T}$, звідки $T_1 = \frac{\Delta T}{0,5} = 280 \text{ К}$.

Відповідь: 280 К.

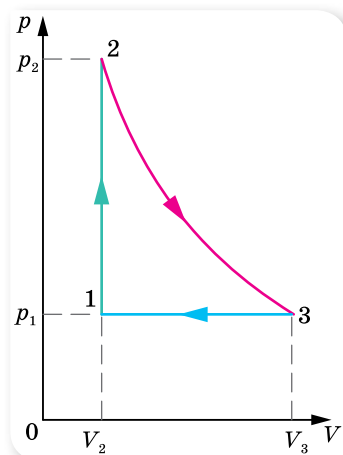
Задача 2. На малюнку 92 у координатах p, V зображено замкнений газовий процес (цикл). Побудуйте цей цикл у координатах V, T і p, T .

Розв'язання:

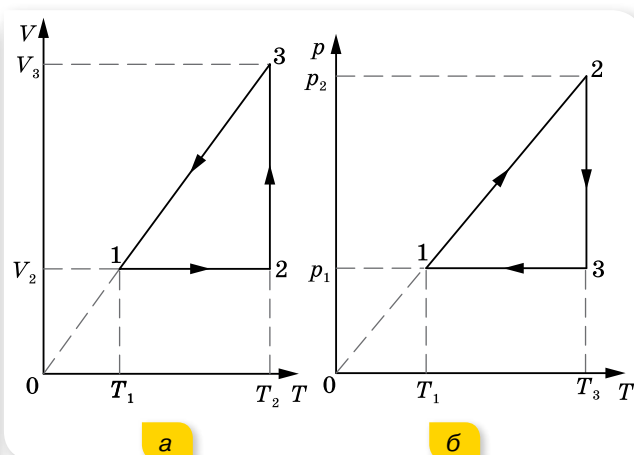
Проаналізуємо процеси, які відбуваються з газом. Перехід зі стану 1 у стан 2 відповідає ізохорному процесу, тиск збільшується від p_1 до p_2 , зрозуміло, що температура також збільшується. Перехід зі стану 2 у стан 3 — ізотермічне розширення газу від V_2 до V_3 , тиск при цьому зменшується від p_2 до p_1 . Перехід зі стану 3 у стан 1 відповідає ізобарному стисканню від V_3 до V_2 , причому $T_1 < T_3$.

Побудуємо цей цикл у координатах V, T (мал. 93, а). Лінія 1–2 зображає ізохорний процес, причому температура зростає від T_1 до T_2 . Лінія 2–3 зображує ізотермічне розширення від V_2 до V_3 . Лінія 3–1 — ізобарний процес. (Продовження цієї лінії має пройти через початок координат!)

На малюнку 93, б цей процес побудовано в координатах p, T .



Мал. 92

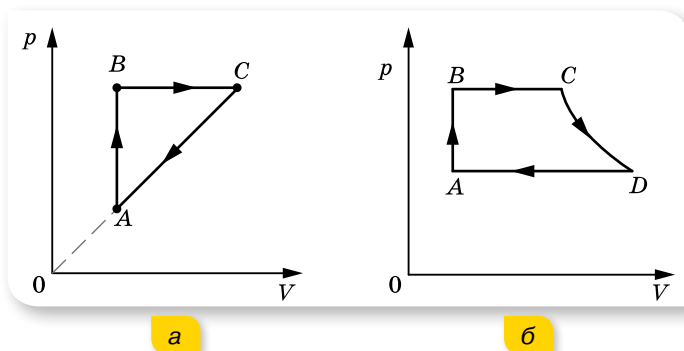


Мал. 93. Графік циклу в координатах V, T (а); у координатах p, T (б).

ВПРАВА 21

- Після стискання газу його об'єм зменшився з 8 до 5 л, а тиск підвищився на 60 кПа. Визначте початковий тиск.
- Унаслідок збільшення тиску в 1,5 раза об'єм газу зменшився на 30 мл. Визначте початковий об'єм.

3. Який об'єм займе газ за температури 77°C , якщо при 27°C його об'єм був 6 л?
4. У гумовій кулі міститься 2 л повітря за температури 20°C і нормального атмосферного тиску. Який об'єм займе повітря, якщо кулю занурити у воду на 10 м? Температура води 4°C .
5. На малюнку 94 зображено замкнуті цикли. Ділянка CD на малюнку 94, б відповідає ізотермі. Накресліть ці діаграми в координатах p, T і V, T .



Мал. 94

6. Пляшку, заповнену газом, щільно закрили корком, що має в поперечному перерізі площу $2,5\text{ см}^2$. До якої температури треба нагріти газ, щоб корок вилетів із пляшки, коли сила тертя, що утримує корок, дорівнює $11,8\text{ Н}$? Початкова температура — 3°C , атмосферний тиск — 10^5 Па .
7. Вертикальний циліндр із важким поршнем заповнили киснем, маса якого $m = 10\text{ г}$. Після збільшення температури на $\Delta T = 50\text{ К}$ поршень піднявся на висоту $h = 7\text{ см}$. Визначте масу поршня M , якщо тиск газу над ним $p_0 = 0,1\text{ МПа}$. Площа поршня $S = 100\text{ см}^2$, молярна маса кисню $\mu = 0,032\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.
8. Бульбашка повітря піднімається з дна водоймища з глибини H . Визначте залежність радіуса бульбашки r від глибини її занурення в даний момент часу, якщо її початковий об'єм дорівнював V . Силу поверхневого натягу не враховуйте. Атмосферний тиск — p_0 , густина води — ρ .
9. Відкриту пробірку з повітрям нагріли, потім герметично закрили й охолодили до температури $t_2 = 7^\circ\text{C}$. Тиск повітря у пробірці після цього зменшився в $n = 1,5$ разів. До якої температури t_1 було нагріто пробірку?



Перевірте себе (§ 18–22)



1. Маса молекули газу, який є складовою повітря, дорівнює $5,32 \cdot 10^{-26}\text{ кг}$. Який це газ?

А водень	В азот
Б вуглекислий газ	Г кисень

2. Обчисліть середню квадратичну швидкість атомів Гелію в атмосфері Юпітера. Температура атмосфери цієї планети становить $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$.

А $5,2 \cdot 10^{-19} \frac{\text{м}}{\text{с}}$

В $967 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Б $7,2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Г $935 \frac{\text{км}}{\text{с}}$

3. Який параметр x ідеального газу можна визначити за формулою $x = \frac{3p}{nm_0}$, де p — тиск газу, n — концентрація молекул, m_0 — маса молекули?

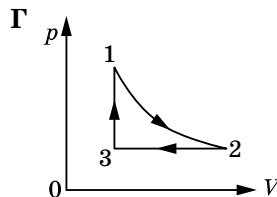
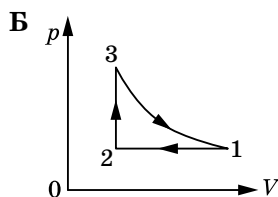
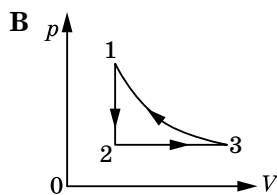
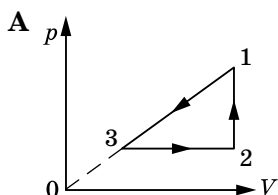
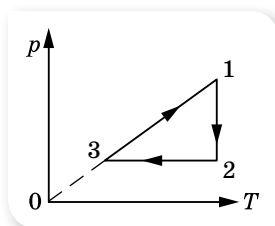
А середню квадратичну швидкість молекули

Б температуру

В об'єм

Г густину

4. На малюнку наведено графік зміни стану ідеального газу в координатах p, T . Який із графіків у координатах p, V відповідає цьому процесу?



5. Визначте середню кінетичну енергію поступального руху молекул азоту за температури 300 K .
6. Газ стиснули ізотермічно з об'єму 12 л до об'єму 10 л . Його тиск збільшився на $6 \cdot 10^4\text{ Па}$. Яким був початковий тиск газу?

§ 23

Внутрішня енергія та робота
ідеального газу

Внутрішня енергія. Ознайомимось із поняттям *внутрішньої енергії* U *ідеального газу*. У молекулярно-кінетичній теорії речовини внутрішня енергія макроскопічного тіла (термодинамічної системи) дорівнює сумі середньої кінетичної енергії теплового руху всіх молекул (атомів) і середньої потенціальної енергії їх взаємодії. Обчислити U через мікропараметри майже неможливо, тому використаємо макропараметри термодинамічної системи. (До того ж у практичних цілях важливіше знати не саму внутрішню енергію, а її зміну внаслідок зміни стану системи.) Середня кінетична енергія руху молекул пропорційна температурі, а середня потенціальна енергія взаємодії визначається відстанню між молекулами (тобто пропорційна об'єму тіла). Таким чином, внутрішня енергія U є функцією макроскопічних параметрів, які можна виміряти, — температури та об'єму: $U = f(T, V)$.

Обчислимо внутрішню енергію одноатомного ідеального газу. Оскільки молекули цього газу одна з одною не взаємодіють, то потенціальна енергія $E_{\text{п}} = 0$. Уся внутрішня енергія складається з кінетичної енергії руху $U = E_{\text{к}}$. За формулою Больцмана, середня енергія поступального руху одного атома $\bar{E}_0 = \frac{3}{2} kT$. А оскільки кількість атомів $N = \frac{m}{M} N_A$, то внутрішня енергія одноатомного ідеального газу $U = \frac{3}{2} kT \frac{m}{M} N_A$. Урахуємо, що $kN_A = R$.

Внутрішня енергія ідеального одноатомного газу пропорційна температурі й не залежить від об'єму та інших макропараметрів: $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$, де m — маса всього газу, M — молярна маса, R — універсальна газова стала, T — термодинамічна температура.

Зміна внутрішньої енергії ідеального газу сталої маси $\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$ відбувається тільки в разі зміни його температури T .

У реальних газах, рідинах і твердих тілах середня потенціальна енергія взаємодії молекул не дорівнює нулю, тому їх внутрішня енергія залежить і від об'єму речовини, і від температури.

Перетворення внутрішньої енергії в механічну і навпаки. Як відомо, робота виконується, якщо тіло переміщується (коли всі його частини здійснюють рух під дією сили в одному напрямку). Внутрішня енергія — це енергія хаотичного руху молекул. Відповідно для того, щоб за рахунок внутрішньої енергії виконувалась робота, необхідно якимось чином до-

сягти упорядкованого руху молекул. Для цього найбільш зручно використовувати циліндр із рухомим поршнем (мал. 95). Рухаючи поршень вниз або вгору, ми будемо стискати або розширювати газ, у результаті чого буде змінюватись його внутрішня енергія.

Пояснимо, чому змінюється внутрішня енергія газу, якщо змінюється його об'єм.

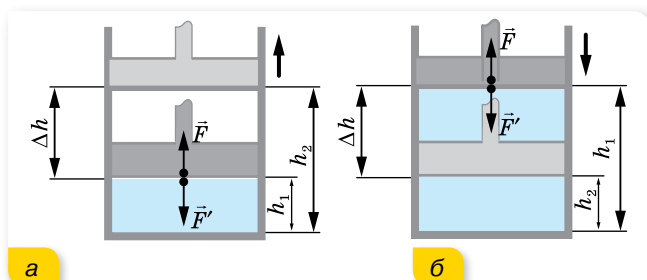
Під час руху поршня в циліндрі молекули газу внаслідок пружних зіткнень з рухомим поршнем змінюють свою кінетичну енергію. Якщо поршень рухається назустріч молекулам, він передає молекулам у момент зіткнень частину своєї механічної енергії. (Пригадайте, у механіці ми розглядали задачі на пружну взаємодію тіл і розв'язували їх, застосовуючи закони збереження імпульсу та енергії.) У результаті збільшується кінетична енергія руху молекул, а отже, і температура газу. Таким чином механічна робота, яку виконує поршень, перетворюється у внутрішню енергію газу. Кажуть, що зовнішні сили виконують роботу A' .

Стиснутий газ, тиск якого більший за зовнішній, буде розширюватись. Молекули газу, що розширюється, зіткнувшись із поршнем, який віддаляється, зменшують свої швидкості, внаслідок чого газ охолоджується. Таким чином, газ виконує роботу A за рахунок зменшення своєї внутрішньої енергії.

Під час стискання або розширення змінюється й середня потенціальна енергія взаємодії молекул, оскільки при цьому змінюється середня відстань між ними.

Обчислення роботи газу. Виконання роботи в термодинаміці пов'язане зі зміною об'єму термодинамічної системи. Зручніше обчислити не A' — роботу сили $\vec{F}'$, що діє на газ з боку зовнішнього тіла (поршня), а A — роботу, яку виконує сам газ, діючи на поршень із силою $\vec{F}$. Згідно з третім законом Ньютона, $\vec{F}' = -\vec{F}$.

Модуль сили, яка діє з боку газу на поршень, $F = pS$, де p — тиск газу, а S — площа поршня.



Мал. 95. До обчислення роботи газу під час:
а — розширення; б — стискання

Нехай газ розширюється (мал. 95, а) і поршень пересувається в напрямку дії сили $\vec{F}$ на малу відстань $\Delta h = h_2 - h_1$. Якщо переміщення мале, то тиск газу можна вважати сталим ($p = \text{const}$). Робота газу $A = F\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1)$. Оскільки $Sh_1 = V_1$ — початковий

об'єм газу, а $Sh_2 = V_2$ — кінцевий, роботу газу можна записати через зміну об'єму газу: $A = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$.

Розширюючись, газ виконує додатну роботу, оскільки напрямки сили і напрямку переміщення поршня збігаються. Розширюючись, газ передає енергію навколишнім тілам.

Якщо газ стискається (мал. 95, б; с. 149), тобто поршень пересувається у протилежному до сили $\vec{F}$ напрямку, то роботу газу визначають так само, але тепер $A < 0$, бо $V_1 > V_2$.

Робота A' , яку виконують зовнішні сили над газом, відрізняється від роботи газу A лише знаком: $A' = -A$, оскільки $\vec{F}' = -\vec{F}$, а переміщення поршня є тим самим. Робота зовнішніх сил, що діють на газ, дорівнює $A' = -A = -p\Delta V$.

Під час стискання $V_1 > V_2$, тобто $\Delta V < 0$, і робота зовнішніх сил додатна, $A' > 0$, напрямки сили та переміщення збігаються. Виконуючи над газом додатну роботу, зовнішні тіла передають йому енергію. Під час розширення, навпаки, робота зовнішніх сил — від'ємна, адже тепер напрямки сили й переміщення є протилежними.

Робота ідеального газу під час ізобарного процесу:

$$A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

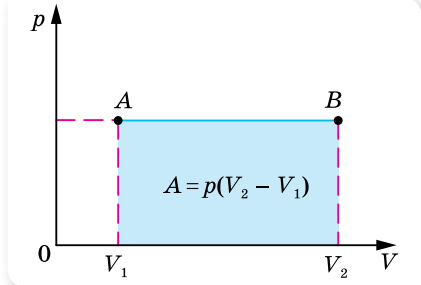
Отримані вирази для обчислення роботи правильні не тільки для стискування чи розширення газу в циліндрі, а й за *малої зміни об'єму* будь-якої термодинамічної системи. Якщо ж процес ізобарний, ці формули можна застосовувати і для більших змін об'єму.

Графічний метод обчислення роботи.

На малюнку 96 зображено *процес ізобарного розширення* газу в координатах p, V . Легко помітити, що для обчислення роботи газу достатньо визначити площу фігури під лінією графіка в цих координатах.

Якщо *процес ізохорний*, робота термодинамічної системи $A = 0$, адже $V = \text{const}$.

Робота дорівнює площі фігури під графіком і для інших процесів, якщо вони зображені в координатах p, V . Наприклад, розглянемо *графік ізотермічного процесу* (мал. 97). ΔV відмінне від нуля, отже, газ виконує роботу. Але формулу $A = p\Delta V$ використовувати не можна, оскільки її виведено для сталого тиску, а в ізотермічному процесі тиск змінюється. Якщо ж узяти такий малий приріст об'єму ΔV , за якого зміною тиску можна знехтувати, то можна використовувати цю формулу. Таким чином, розбиваючи інтервал $V_2 - V_1$ на малі інтервали ΔV , можна на кожному з них обчислювати елементарну роботу ΔA . Повну роботу газу при



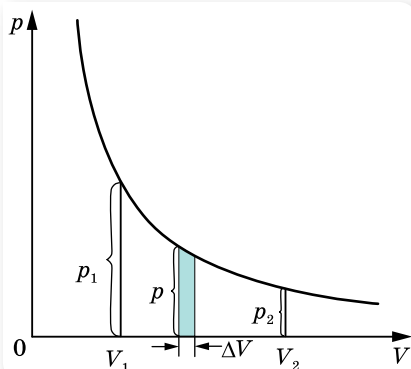
Мал. 96. Робота газу дорівнює площі прямокутника V_1ABV_2

ізотермічному процесі можна визначити як суму елементарних робіт ΔA . Це означає, що робота дорівнює площі фігури, обмеженої віссю абсцис, двома ординатами p_1 і p_2 та ізотермою.

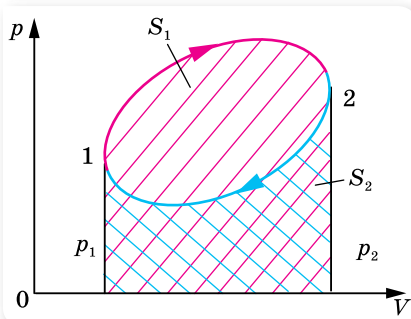
Можна довести, що робота газу за будь-якого процесу дорівнює площі фігури, обмеженої двома ординатами, віссю абсцис і графіком цього процесу в координатах p, V .

Обчислимо роботу газу, що виконується під час замкненого циклу (мал. 98). У результаті переходу $1 \rightarrow 2$ робота газу A_{1-2} дорівнює площі S_1 фігури, утвореної віссю абсцис, двома ординатами p_1 та p_2 та кривою 1–2. Ця робота додатна, оскільки об'єм газу збільшується. При переході $2 \rightarrow 1$ робота газу A_{2-1} дорівнює площі S_2 фігури, утвореної віссю абсцис, двома ординатами p_1 і p_2 та кривою 2–1. Ця робота від'ємна, оскільки об'єм газу зменшується. Таким чином, робота газу за цикл дорівнює: $A = A_{1-2} - A_{2-1} = S_1 - S_2$.

Фізичний зміст універсальної газової сталої. Зміна об'єму за сталого тиску супроводжується зміною температури тіла. Якщо в циліндрі під поршнем (мал. 95, с. 149) міститься $\nu = 1$ моль ідеального газу, то робота під час його ізобарного нагрівання $A_{\text{моль}} = p\Delta V_{\text{моль}}$. Згідно з рівнянням Мендєєлева — Клапейрона $p\Delta V_{\text{моль}} = R\Delta T$ або $A_{\text{моль}} = R\Delta T$. З одержаної рівності видно, що за $\Delta T = 1$ К, $R = A_{\text{моль}}$. Отже, **фізичний зміст універсальної газової сталої** такий: універсальна газова стала R чисельно дорівнює роботі ізобарного розширення одного моля ідеального газу під час нагрівання його на 1 К.



Мал. 97. Графічне обчислення роботи газу в ізотермічному процесі



Мал. 98. Обчислення роботи замкненого циклу



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Що розуміють під внутрішньою енергією тіла або термодинамічної системи?
2. Моль якого газу — водню чи гелію — за однакової температури має більшу внутрішню енергію? Поясніть чому.
3. Наведіть приклад процесу, під час якого газ при стисканні нагрівається.
4. Чи виконується робота у процесі ізобарного стиснення або розширення газу?
5. Чому дорівнює робота газу під час ізохорного процесу?
6. Поясніть, як графічно визначають роботу: ізобарного розширення газу; ізотермічного розширення газу.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Ідеальний газ масою m , який мав температуру T , охолоджується ізохорно так, що його тиск зменшується в n разів. Потім газ розширюється під сталим тиском. У кінцевому стані температура газу дорівнює початковій. Визначте виконану газом роботу. Вважайте, що молярна маса газу відома й дорівнює M .

Дано:

m

T

n

M

$A = ?$

Розв'язання:

Для наочності побудуємо графік процесу в координатах p, V (мал. 99). Суцільною лінією $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ зображено процес в газі. Пунктирними лініями проведено ізотерми. За умовою кінцева температура дорівнює початковій, отже, точки 1 і 3 лежать на одній ізотерімі.

За умовою перехід зі стану 1 у стан 2 — ізохорне охолодження, $V = \text{const}$, отже, газ роботи не виконує; зі стану 2 у стан 3 — ізобарне розширення, отже,

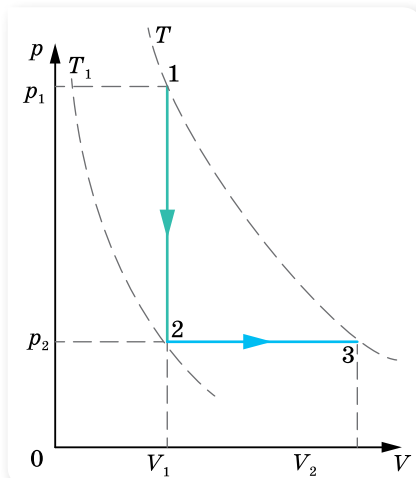
$$A = p_2(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Температуру T_1 визначимо з рівняння ізохорного процесу: $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T}{T_1} = n$,

звідки $T_1 = \frac{T}{n}$. Тоді виконана газом робота

$$\text{та } A = \frac{m}{M} R T \frac{n-1}{n}.$$

$$\text{Відповідь: } A = \frac{m}{M} R T \frac{n-1}{n}.$$



Мал. 99

Задача 2. 4 молі газу здійснюють процес, зображений на малюнку 100, а. На якій ділянці робота газу максимальна?

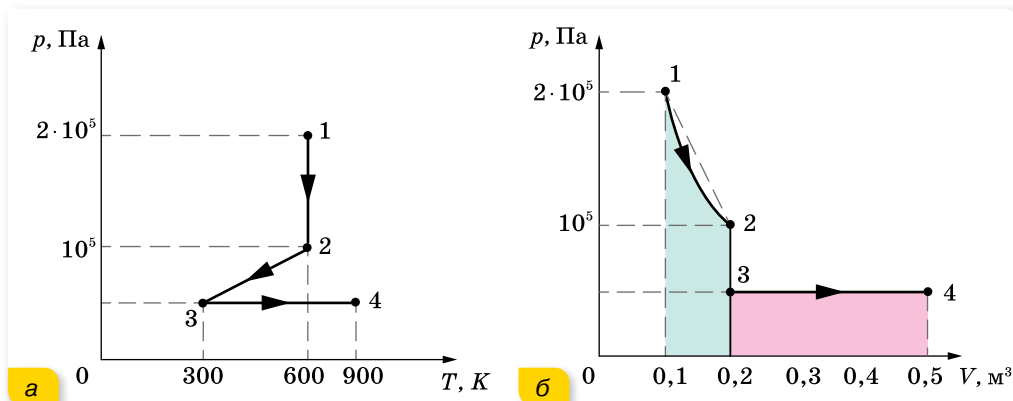
Розв'язання:

Накреслимо графік цього процесу в координатах p, V (мал. 100, б). Для цього визначимо об'єм газу в точках 1, 2, 3 і 4.

$$V_1 = \nu \frac{RT_1}{p_1}, V_1 = 0,1 \text{ м}^3, V_2 = 2 \cdot V_1, V_2 = 0,2 \text{ м}^3, V_3 = V_2 \text{ і } V_4 = 0,5 \text{ м}^3.$$

З малюнка 100, б видно, що на ділянці $2 \rightarrow 3$ робота не виконується, оскільки процес ізохорний. Отже, $A_{2-3} = 0$. На ділянці $3 \rightarrow 4$ (ізобарний процес) робота визначається площею відповідного прямокутника: $A_{3-4} = p_3(V_4 - V_3)$, $A_{3-4} = 15 \text{ кДж}$. Ізотермічний процес відповідає ділянці $1 \rightarrow 2$. Площа, обмежена ізотермою $1 \rightarrow 2$, менша від площі

трапеції $1-2-V_2-V_1$. А площа трапеції дорівнює 15 кДж , тобто вона дорівнює площі прямокутника, що відповідає ділянці $3 \rightarrow 4$. Таким чином, $A_{1-2} < A_{3-4}$; $A_{2-3} = 0$. Отже, робота газу найбільша на ділянці $3 \rightarrow 4$.



Мал. 100

Задача 3. Свинцева куля пробиває дерев'яну стіну. Швидкість кулі в момент удару була $400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а в момент вильоту — $100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Яка частина кулі розплавилась, коли вважати, що $0,6$ механічної енергії перетворилась на внутрішню? Температура кулі в момент удару — 50°C .

Дано:

$$v_1 = 400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_2 = 100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\eta = 0,6$$

$$t_1 = 50^\circ\text{C}$$

$$\frac{m}{m_0} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Під час удару кулі об стіну, частина механічної (кінетичної) енергії кулі змінилась на внутрішню, тобто: $\eta A = \Delta U$ або $\eta \Delta E_k = \Delta U$.

Зменшення кінетичної енергії:
$$\Delta E_k = \frac{m_0 v_2^2}{2} - \frac{m_0 v_1^2}{2},$$

де m_0 — початкова маса кулі.

Збільшення внутрішньої енергії кулі проявляється в підвищенні її температури до температури плавлення та плавлення певної маси кулі m :

$$\Delta U = cm_0(t_{\text{пл}} - t_1) + Lm.$$

Отже,
$$\frac{\eta m_0}{2}(v_2^2 - v_1^2) = cm_0(t_{\text{пл}} - t_1) + Lm.$$

Звідси:
$$\frac{m}{m_0} = \frac{\eta}{2L}(v_2^2 - v_1^2) - \frac{c}{L}(t_{\text{пл}} - t).$$

Підставляючи дані та значення питомої теплоємності свинцю (c), питомої теплоти плавлення свинцю (L) та температуру плавлення свинцю ($t_{\text{пл}}$), отримуємо:

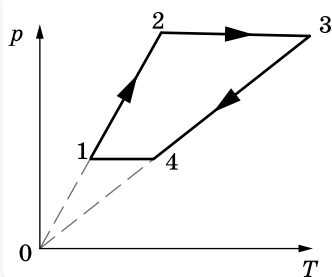
$$\frac{m}{m_0} = \frac{0,6}{2 \cdot 26,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} \left(\left(400 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 - \left(100 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 \right) -$$

$$- \frac{125,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}}{26,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} (327^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}) \approx 0,4.$$

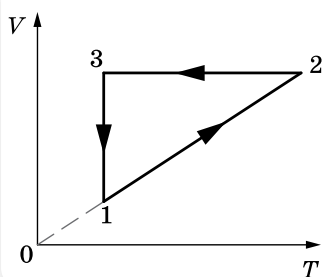
Відповідь: маса розплавленої частини кулі — $0,4 m_0$.

ВПРАВА 22

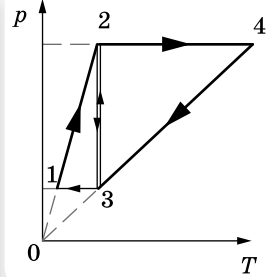
1. Визначте внутрішню енергію U гелію, що заповнює аеростат об'ємом $V = 60 \text{ м}^3$ за тиску $p = 100 \text{ кПа}$.
2. У результаті зменшення об'єму одноатомного газу в 3,6 раза його тиск збільшився на 20 %. У скільки разів змінилася внутрішня енергія?
3. У циліндрі під поршнем міститься повітря. Під час досліду вдвічі збільшилися і об'єм повітря, і його абсолютна температура, тиск газу при цьому не змінився (відбувалося протікання повітря внаслідок нещільного прилягання поршня до стінок циліндра). У скільки разів змінилася внутрішня енергія повітря (повітря вважати ідеальним газом)?
4. Який тиск одноатомного газу, що займає об'єм 2 л, якщо його внутрішня енергія дорівнює 300 Дж?
5. Обчисліть збільшення внутрішньої енергії 2 кг водню в результаті підвищення його температури на 10 К.
6. З 2 молями ідеального газу здійснюють замкнений цикл (мал. 101). Яку роботу виконує газ, якщо $\frac{p_2}{p_1} = 5$, $\frac{T_4}{T_1} = 2$ і $T_1 = 280 \text{ К}$?
7. З певною кількістю ідеального газу здійснюють замкнений цикл $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ (мал. 102). Визначте, на яких стадіях процесу газ одержував, а на яких — віддавав енергію. Побудуйте графік процесу в координатах p, V .
8. З ідеальним газом проводять два цикли: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ і $3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ (мал. 103). У якому з них газ виконує більшу роботу?



Мал. 101



Мал. 102



Мал. 103

§ 24 Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки. У середині XIX ст. Джеймс Джоуль (1818 – 1889), Юліус фон Маєр (1814 – 1878) і Герман фон Гельмгольц (1821 – 1894), спираючись на проведені досліди, встановили закон, згідно з яким *кількість енергії в природі незмінна, вона лише переходить від одних тіл до інших або перетворюється з одного виду в інший*. Це твердження, як ми вже знаємо, називають *законом збереження і перетворення енергії*. Цей закон універсальний і може бути застосований до всіх явищ природи.

Закон збереження і перетворення енергії, поширений на теплові явища, називають *першим законом термодинаміки*. Перший закон термодинаміки має загальний характер і застосовується до будь-яких без винятку явищ природи: механічне переміщення з тертям, нагрівання тіл, проходження електричного струму, світлові явища, радіоактивні перетворення хімічних елементів тощо. Усі наведені приклади супроводжуються виконанням роботи чи теплообміном.

У загальному випадку під час переходу системи (газу) з одного стану в інший внутрішня енергія змінюється одночасно і за рахунок виконання роботи, і за рахунок передавання теплоти. Для такого випадку **перший закон термодинаміки** має вигляд:

$\Delta U = Q + A'$ — зміна внутрішньої енергії системи ΔU у випадку переходу її з одного стану в інший дорівнює сумі роботи зовнішніх сил A' і кількості теплоти Q , переданої системі.

Ураховуючи, що $A = -A'$, **перший закон термодинаміки можна записати і в такому вигляді:**

$Q = \Delta U + A$ — передана системі кількість теплоти частково йде на збільшення її внутрішньої енергії і частково — на виконання системою роботи над зовнішніми тілами.

Історично встановлення цього закону було пов'язане зі спробами створення машини, яка б нескінченно довго виконувала роботу без надходження теплоти ззовні. У термодинаміці таку машину називають «вічним двигуном першого роду». Оскільки в цьому разі $Q = 0$, то $A = -\Delta U$, тобто робота може виконуватися лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії. З першого закону термодинаміки випливає неможливість побудови «вічного двигуна першого роду» — оскільки неможливо нескінченно довго виконувати роботу за рахунок скінченної кількості внутрішньої енергії якоїсь системи.

Застосування першого закону термодинаміки до ізопроцесів ідеального газу. З'ясуємо, якого вигляду набуває формула першого закону термодинаміки для різних ізопроцесів в ідеальному газі.

Якщо $T = \text{const}$ (*ізотермічний процес*), то внутрішня енергія системи не змінюється ($\Delta U = 0$). Уся передана газу кількість теплоти витрачається на виконання газом роботи над зовнішніми тілами. Отже, $Q = A$.

В *ізохорному процесі* об'єм газу не змінюється, отже, $A = 0$. Тоді, згідно з першим законом термодинаміки, $Q = \Delta U$ — уся підведена до газу кількість теплоти витрачається на збільшення його внутрішньої енергії.

В *ізобарному процесі* кількість теплоти Q , передана газу за сталого тиску, витрачається на зміну його внутрішньої енергії та на виконання ним роботи над зовнішніми тілами. Формула зберігає свій загальний вигляд $Q = \Delta U + A$.

Адіабатний процес. З першого закону термодинаміки випливає можливість процесу, у якому $Q = 0$. Цей процес має важливе практичне значення й називається *адіабатним процесом*.

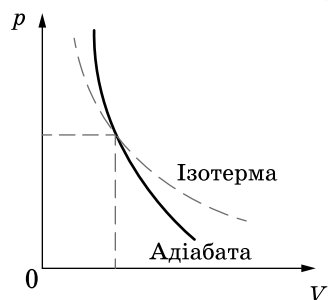
Адіабатний процес — це процес, що відбувається в теплоізованій системі (без теплообміну із зовнішніми тілами).

Перший закон термодинаміки для адіабатного процесу має вигляд $\Delta U = A'$, оскільки $Q = 0$, то *змінити внутрішню енергію системи можна лише за рахунок виконання над нею роботи*, а $\Delta U = -A$, тобто *в адіабатному процесі система може виконувати роботу над зовнішніми тілами тільки за рахунок своєї внутрішньої енергії*.

Графік адіабатного процесу в координатах p, V зображено на малюнку 104. Для порівняння на цьому ж малюнку зображено ще й ізотерму для цієї самої маси ідеального газу.

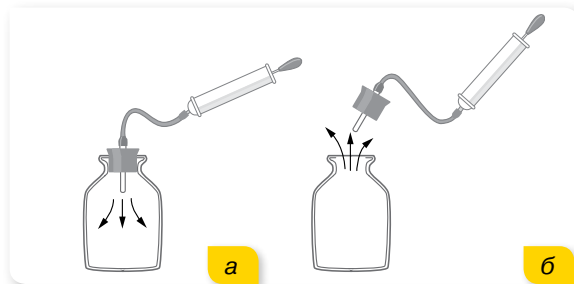
За допомогою формули $p = nkT$ неважко пояснити, чому ізотерма пологіша ніж адіабата. Під час ізотермічного стискання тиск газу зростає за рахунок збільшення концентрації молекул, а при адіабатному — ще й за рахунок збільшення температури.

Звичайно, неможливо оточити систему оболонкою, що абсолютно не пропускає тепло, але іноді можна вважати реальні процеси дуже близькими до адіабатних. Для цього вони мають здійснюватися так швидко, щоб за час процесу не відбулося теплообміну. Тому будь-який газ при швидкому стисканні нагрівається, а при швидкому розширенні — охолоджується. Це можна продемонструвати на такому досліді (мал. 105). Візьмемо скляний балон з вузькою шийкою, наллємо в нього трохи води й закупоримо пробкою, з'єднаною з насосом. За допомогою насоса будемо швидко накачувати повітря в балон. Вода в бутлі зникне, отже, температура повітря в бутлі підвищилась. Якщо нагнітати повітря в балон



Мал. 104. Адіабата й ізотерма ідеального газу

до такого тиску, що повітря виштовхне пробку, то можна помітити, що в бутлі утворюється туман. Це пояснюється тим, що повітря, швидко розширюючись, охолоджується.



Мал. 105. Демонстрація адіабатного процесу

Коли працюють потужні компресори, які стискають повітря, температура повітря настільки підвищується, що доводиться спеціально охолоджувати циліндри. Адіабатичне охолодження газу під час їх розширення використовують у машинах для зрідження газів. Нагрівання повітря від швидкого стискання застосовується в двигунах Дізеля.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Як записують і формулюють перший закон термодинаміки?
2. Як записується перший закон термодинаміки для ізотермічного, ізохорного, ізобарного процесів?
3. За яких умов здійснюється адіабатний процес? Наведіть приклади.
4. Який газ — одно- чи багатоатомний — охолоджується швидше під час адіабатного розширення? З'ясуйте причину.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. 10 г кисню перебуває під тиском $3 \cdot 10^5$ Па за температури 10°C . Після нагрівання за постійного тиску газ зайняв об'єм 10 л. Визначте кількість теплоти, яку одержав газ, зміну внутрішньої енергії та роботу, виконану газом під час розширення.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 10^{-2} \text{ кг} \\ T_1 &= 283 \text{ К} \\ p &= 3 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ V_2 &= 10^{-2} \text{ м}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= ? \\ \Delta U &= ? \\ A &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

З рівняння Менделєєва — Клапейрона $pV_1 = \frac{m}{M}RT_1$ визначимо початковий об'єм газу:

$$V_1 = \frac{m}{M} R \frac{T_1}{p}, V_1 = \frac{10^{-2} \text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \cdot 283 \text{ К}}{32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Робота розширення газу $A = p(V_2 - V_1)$,

$$A = 3 \cdot 10^5 \text{ Па} (10^{-2} \text{ м}^3 - 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3) = 2,26 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Для визначення кількості теплоти, одержаної газом, потрібно спочатку визначити кінцеву температуру. Із закону Гей-Люссака $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ ви-

$$\text{значаємо: } T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1}, T_2 = 283 \text{ К} \frac{10^{-2} \text{ м}^3}{2,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 1155 \text{ К}.$$

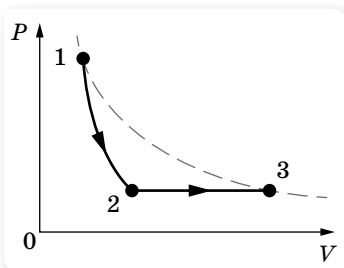
Тоді кількість одержаної газом теплоти $Q = cm(T_2 - T_1)$,

$$Q = 0,92 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} 10^{-2} \text{ кг} (1155 \text{ К} - 283 \text{ К}) = 8,02 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Зміну внутрішньої енергії визначимо з першого закону термодинаміки: $\Delta U = Q - A$, $\Delta U = 8,02 \cdot 10^3 \text{ Дж} - 2,26 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 5,76 \text{ Дж}$.

Відповідь: $8,02 \cdot 10^3 \text{ Дж}$; $5,76 \text{ Дж}$; $2,26 \cdot 10^3 \text{ Дж}$.

Задача 2. Ідеальний одноатомний газ розширюється спочатку адіабатно, а потім ізобарно (див. мал. 106, пунктирна лінія — це ізотерма). За весь процес 1–2–3 газом здійснено роботу 5 кДж. Яку роботу виконав газ під час ізобарного розширення?



Мал. 106

Дано:

$$\frac{A_{123} = 5 \text{ кДж}}{A_{23} = ?}$$

Розв'язання:

Робота за весь процес:

$$A_{123} = A_{12} + A_{23},$$

де A_{12} — робота газу під час адіабатного розширення, A_{23} — робота газу під час ізобарного розширення.

Застосуємо перший закон термодинаміки до адіабатного процесу й визначимо роботу газу A_{12} : $A_{12} = -\Delta U_{12}$, де зміна внутрішньої енергії $\Delta U_{12} = \frac{3}{2} \nu R(T_2 - T_1)$, тоді, враховуючи, що $T_1 = T_3$ (за умовою задачі):

$$A_{12} = \frac{3}{2} \nu R(T_3 - T_2).$$

Під час ізобарного розширення робота газу $A_{23} = p_2(V_3 - V_2) = \nu R(T_3 - T_2)$.

$$A_{123} = \frac{3}{2} \nu R(T_3 - T_2) + \nu R(T_3 - T_2) = \frac{5}{2} \nu R(T_3 - T_2).$$

$$\text{Звідси } (T_3 - T_2) = \frac{2}{5} \frac{A_{123}}{\nu R}. \text{ Тоді } A_{23} = \nu R(T_3 - T_2) = \frac{2}{5} \frac{\nu R A_{123}}{\nu R} = \frac{2}{5} A_{123}.$$

$$A_{23} = 2 \text{ кДж}.$$

Відповідь: 2 кДж.

ВПРАВА 23

1. Яка частина кількості теплоти, наданої одноатомному газу в ізобарному процесі, витрачається на збільшення внутрішньої енергії, а яка частина — на виконання роботи?

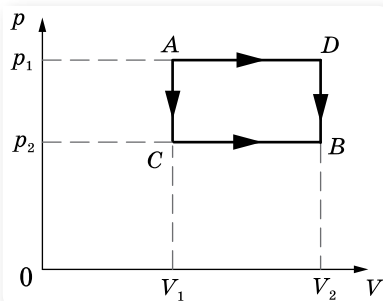
2. Водень, маса якого 6,5 г і температура 27 °С, розширюється вдвічі за $p = \text{const}$ за рахунок теплоти, яка надходить ззовні. Визначте роботу A розширення газу, зміну ΔU внутрішньої енергії газу та кількість теплоти Q , наданої газу.

3. У вертикально розташованому циліндрі, який має площу основи 1 дм², під поршнем масою 10 кг, що ковзає без тертя, міститься повітря. Під час ізобарного нагрівання повітря поршень піднявся на 20 см. Яку роботу виконало повітря, якщо зовнішній тиск дорівнює 100 кПа?

4. Кисень займає об'єм $V_1 = 3$ л за температури $t_1 = 27$ °С і тиску $p_1 = 820$ кПа (мал. 107). В іншому стані газ має параметри $V_2 = 4,5$ л і $p_2 = 600$ кПа. Визначте кількість теплоти Q , одержану газом, роботу A , виконану газом під час розширення, та зміну ΔU внутрішньої енергії газу під час переходу з першого стану в другий: а) шляхом ACB ; б) шляхом ADB .

5. Тіло масою 1 кг вільно падає з висоти 2 м і потрапляє в циліндр на легкорухомий невагомий поршень. У результаті цього повітря, що перебуває в циліндрі під поршнем, дуже швидко стискається. Зміна температури повітря під час стискання становить 90 °С. Скільки повітря міститься під поршнем?

6. Для опалення в сильні морози звичайної квартири площею 63 м² на місяць потрібна приблизно 1 гікалорія теплоти (1 кал $\approx$ 4,2 Дж). Така теплота отримується внаслідок згорання на теплоелектростанціях природного газу — метану з ККД перетворення енергії екзотермічної реакції в теплоту близько 50 %. Рівняння цієї хімічної реакції має вигляд: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + Q$, де $Q \approx 1,33 \cdot 10^{-18}$ Дж. Уявімо, що водяна пара, яка утворилася в результаті спалювання метану, сконденсувалася, замерзла на морозі й випала у вигляді снігу на даху будинку, що дорівнює за площею квартирі. Будемо вважати, що густина такого снігу — $100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Якою буде товщина h шару снігу, що випав за місяць у результаті цього процесу?



Мал. 107

§ 25

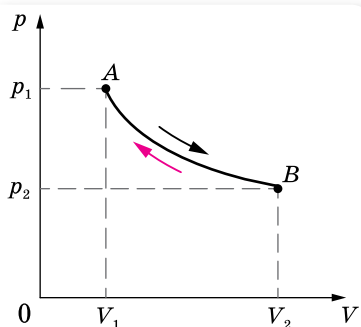
Напрямок теплових процесів. Другий закон термодинаміки. Ентропія

Оборотні та необоротні процеси. Закон збереження і перетворення енергії стверджує, що кількість енергії за будь-яких її перетворень незмінна, але нічого не говорить про те, які енергетичні перетворення можливі. Однак багато процесів, цілком допустимих з погляду закону збереження енергії, ніколи не відбуваються насправді. Наприклад, нагріте тіло, поступово охолоджуючись, передає свою енергію холоднішим тілам, які його оточують. А от зворотний процес передавання теплоти від холодного тіла до гарячого самовільно відбуватися не може. Таких прикладів можна навести безліч.

На основі багатовікових спостережень за явищами природи в людини склалося уявлення про спрямованість процесів. Умовно їх можна поділити на два класи:

- 1) *природні*, які «самі по собі» прямують до рівноважного стану, що відповідає мінімальному значенню потенціальної енергії. Наприклад, перехід тепла від більш нагрітого тіла до менш нагрітого, вирівнювання тисків, падіння тіла тощо;
- 2) *штучні*, які «самі по собі» відбуватись не можуть. Наприклад, перетворення теплоти в роботу, створення різниці тисків, піднімання тіла тощо.

Поділ процесів на природні та штучні тісно пов'язаний у термодинаміці з поняттям про оборотні й необоротні процеси. Але при цьому слід мати на увазі, що поняття оборотного й необоротного процесів стосується винятково процесів, які відбуваються в ізольованій системі. Якщо ізольована система переходить зі стану A в стан B , а потім знову повертається в стан A (мал. 108), то при цьому слід розрізняти два випадки.



Мал. 108. Прямий і зворотний процеси

1) Система може повернутися зі стану B у стан A в результаті процесу, що не залишає ніяких змін у навколишньому середовищі; у цьому разі ми називаємо процес *оборотним*.

2) Повернення системи в стан A неможливе без того, щоб у навколишньому середовищі не відбулося якихось змін; тоді процес AB називають *необоротним*.

Усі процеси в природі необоротні, оскільки вони супроводжуються теплопровідністю, випромінюванням, тертям тощо.

Можна дати ще й таке визначення оборотного процесу: оборотним процесом

називають процес, який допускає можливість такого повернення системи у вихідний стан, щоб у цьому зворотному процесі вона пройшла через ті самі проміжні стани, що й у прямому процесі. Це можливо лише тоді, коли система проходить через *рівноважні стани*, тобто оборотний процес має бути рівноважним. Строго кажучи, рівноважними можуть бути лише ті процеси, які відбуваються нескінченно повільно.

Часто процеси, близькі до оборотних, створюють штучно. Якщо, наприклад, газ, який міститься в циліндрі, стискається й розширюється швидко, то цей процес буде необоротним, бо система в прямому і зворотному напрямках проходить через різні стани. Якщо ж процес стискання й розширення відбувається настільки повільно, що в будь-який момент часу параметри системи в усіх її точках будуть однаковими, можна вважати, що газ переходить від одного стану рівноваги до іншого. Такий процес можна наближено вважати оборотним.

Другий закон термодинаміки. Напрямок можливих енергетичних перетворень вказує **другий закон термодинаміки**. Він підтверджує необоротність процесів у природі й був сформульований на основі дослідних фактів Рудольфом Клаузіусом у 1850 р.

Неможливо перевести теплоту від більш холодної системи до більш гарячої, якщо не відбувається інших одночасних змін в обох системах або тілах, які їх оточують.

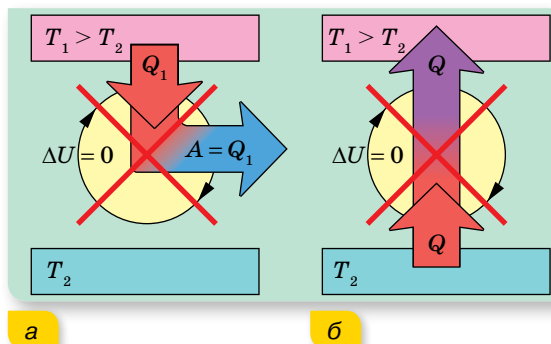
Є ще ряд формулювань другого закону.

Формулювання Анрі Пуанкаре: *неможливо привести в дію теплову машину за допомогою лише теплового резервуара.*

Формулювання Макса Планка: *неможливо побудувати періодично діючу машину, вся діяльність якої зводиться до підняття тягаря й охолодження теплового резервуара.*

Формулювання Вільяма Томсона (лорда Кельвіна): *неможливо здійснити такий періодичний процес, єдиним результатом якого буде виконання роботи за рахунок теплоти, відібраної в нагрівника.*

На малюнку 109 зображено схеми процесів, що забороняються другим законом, але які не забороняються першим законом термодинаміки.



Мал. 109. Схеми процесів, що відповідають двом формулюванням другого закону термодинаміки: а — В. Томсона; б — Р. Клаузіуса

Гіпотетичну теплову машину, у якій міг би відбуватися такий процес, називають «*вічним двигуном другого роду*». У земних умовах така машина могла б відбирати теплову енергію, наприклад, у Світового океану, і повністю перетворювати її на роботу. Маса води в Світовому океані дорівнює приблизно 10^{21} кг, і при її охолодженні на один градус виділилася б величезна кількість енергії (близько 10^{24} Дж), еквівалентна повному спалюванню 10^{17} кг вугілля. Енергії, яку щороку виробляють на Землі, приблизно в 10^4 разів менше. Тому «*вічний двигун другого роду*» був би для людства досить привабливим, і до цього часу є охочі, яких не полишає ідея його створення.

Поняття ентропії. Необхідність формулювання другого закону термодинаміки кожного разу по-новому, пристосовуючи його зміст до конкретного процесу, не могла задовольнити вчених. Тоді Клаузіусом у 1854 р. був введений у термодинаміку новий параметр, який назвали ентропія (від грец. «*ентропе*», що означає — спрямована всередину, недоступна до подальшого перетворення).

Прийнято вважати, що перехід системи з більш впорядкованого в менш впорядкований стан супроводжується збільшенням ентропії. Що більшою є ентропія, то більш неупорядкована (хаотична) система.

Виходячи з такого означення, зрозуміло, що ентропія зростає в результаті перетворення твердих речовин у рідину, рідин — у газ, а також під час розчинення речовин. У всіх цих випадках спостерігається зменшення порядку в розташуванні частинок системи. Навпаки, під час конденсації, кристалізації ентропія речовин зменшується.

Отже, ймовірність стану речовини (газу, рідини, кристалу) можна характеризувати як певну властивість системи, яка кількісно виражається ентропією.

Ентропією називають фізичну величину, що, як і внутрішня енергія, характеризує стан системи (тіла). Ентропію позначили літерою S , а її зміну — ΔS .

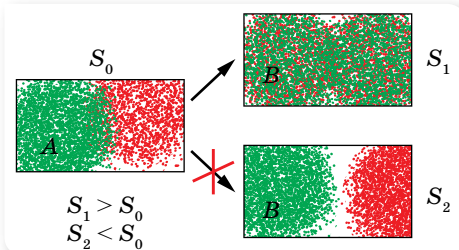
Ентропія, S — кількісна характеристика неупорядкованості системи; що більшою є хаотичність системи, то більше значення ентропії.

Незважаючи на те, що це кількісна характеристика, ми розглянемо її лише на якісному рівні, оскільки використання формули, яка пов'язує ентропію з іншими параметрами, потребує знань з математики, що виходять за межі шкільної програми.

У загальному випадку цей термін визначає напрямок процесу (мал. 110): якщо в системі в стані A ентропія менша, ніж у стані B , то система з A

B може перейти самочинно. Якщо ж A має більшу ентропію, ніж B , то система з A в B самочинно жодним способом перейти не може, навіть тоді, коли A і B мають однакові енергії.

Тепер **другий закон термодинаміки** можна сформулювати так:

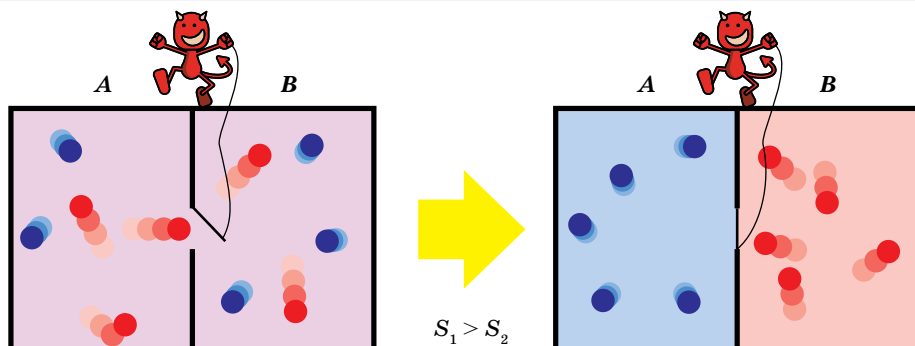


Мал. 110. Самочинно система може перейти зі стану з меншою ентропією до стану з більшою

у ізольованій макроскопічній системі ентропія залишається або незмінною, або зростає (у нерівноважних процесах), досягаючи максимуму при встановленні термодинамічної рівноваги (закон зростання ентропії).

Щоб підкреслити статистичну природу другого закону термодинаміки, Джеймс Максвелл у 1867 р. запропонував уявний експеримент з метою проілюструвати удаваний парадокс другого закону термодинаміки (мал. 111). Його головний персонаж — гіпотетична розумна істота мікроскопічного розміру (названа «демоном Максвелла»). Уявімо посудину, заповнену газом певної температури. Її розділяє перегородка із заслінкою, яку «демон» відкриває, щоб пропускати швидкі частинки в один бік, а повільні — в інший. Отже, через деякий час в одній частині посудини сконцентруються швидкі частинки, а в іншій — повільні. Таким чином, у супереч другому закону термодинаміки, виходить, що «демон Максвелла» дає змогу нагріти праву частину посудини й охолодити ліву. Але для такого функціонування «демона Максвелла» якраз і необхідна передача йому енергії від стороннього джере-

ла. За рахунок цієї енергії й проводиться поділ швидких і повільних молекул у посудині, тобто перехід у стан з меншою ентропією.



Мал. 111. Уявний експеримент на другий закон термодинаміки

Після розробки теорії термодинаміки, розглядалась гіпотеза про «теплову смерть Всесвіту». Коли Всесвіт самочинно досягне вирівнювання температури, настане так звана «теплова смерть». Це означає, що всі зорі згаснуть, уся матерія розпадеться на частинки та випромінювання. Всесвіт стане рівномірно холодним, мертвим і порожнім. На початку 1900-х, загальна теорія відносності Ейнштейна проголосила, що у Всесвіті може бути інший сценарій розвитку. Про це детальніше ви дізнаєтесь в 11 класі.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Який процес називають оборотним; необоротним?
2. У чому полягає фізичний зміст другого закону термодинаміки? Які існують формулювання цього закону?
3. Що таке ентропія? Як змінюється ентропія ізольованої системи для оборотних і необоротних процесів?



§ 26

Принцип дії теплових двигунів. Цикл Карно

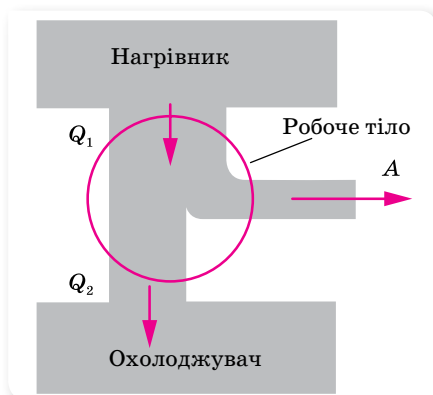
Принцип дії теплових двигунів. Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна. Запаси внутрішньої енергії в земній корі й океанах можна вважати практично не обмеженими. Але володіти запасами енергії ще недостатньо, необхідно вміти за рахунок енергії приводити в рух верстати, транспортні засоби, машини, обертати ротори генераторів електричного струму тощо. Людству потрібні двигуни, тобто пристрої, здатні виконувати роботу. Більша частина двигунів на землі — теплові двигуни,

тобто пристрої, які перетворюють внутрішню енергію палива в механічну енергію.

Незважаючи на різноманітність видів теплових двигунів, усі вони мають спільний принцип дії. У роботі двигунів можна виокремити такі загальні ознаки:

1. У будь-якому тепловому двигуні відбувається перетворення енергії палива в механічну енергію. При цьому енергія палива спершу перетворюється у внутрішню енергію газу (чи пари), що має високу температуру.
2. Для роботи теплового двигуна потрібні нагрівник, охолоджувач і робоче тіло (газ чи пара). У процесі роботи теплового двигуна робоче тіло забирає від нагрівника певну кількість теплоти Q_1 і перетворює частину цієї теплоти в механічну енергію, а не перетворену частину теплоти Q_2 передає охолоджувачу. За законом перетворення і збереження енергії $Q_1 + Q_2 = A$.
3. Робота будь-якого теплового двигуна полягає в повторюванні циклів зміни стану робочого тіла. Кожний цикл складається з: 1) отримання енергії від нагрівника; 2) робочого ходу (розширення робочого тіла й перетворення частини отриманої ним енергії в механічну); 3) передавання невикористаної частини енергії охолоджувачу.

Схематично принцип дії теплової машини зображено на малюнку 112.



Мал. 112. Схема дії теплового двигуна

Необоротність теплових процесів у природі робить неможливим повне перетворення внутрішньої енергії робочого тіла в роботу. Корисна робота, яку виконує двигун: $A = Q_1 - Q_2$, де Q_1 — кількість теплоти, яку отримало робоче тіло від нагрівника; Q_2 — кількість теплоти, віддана охолоджувачу.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) для будь-якої теплової машини дорівнює відношенню корисно використаної енергії

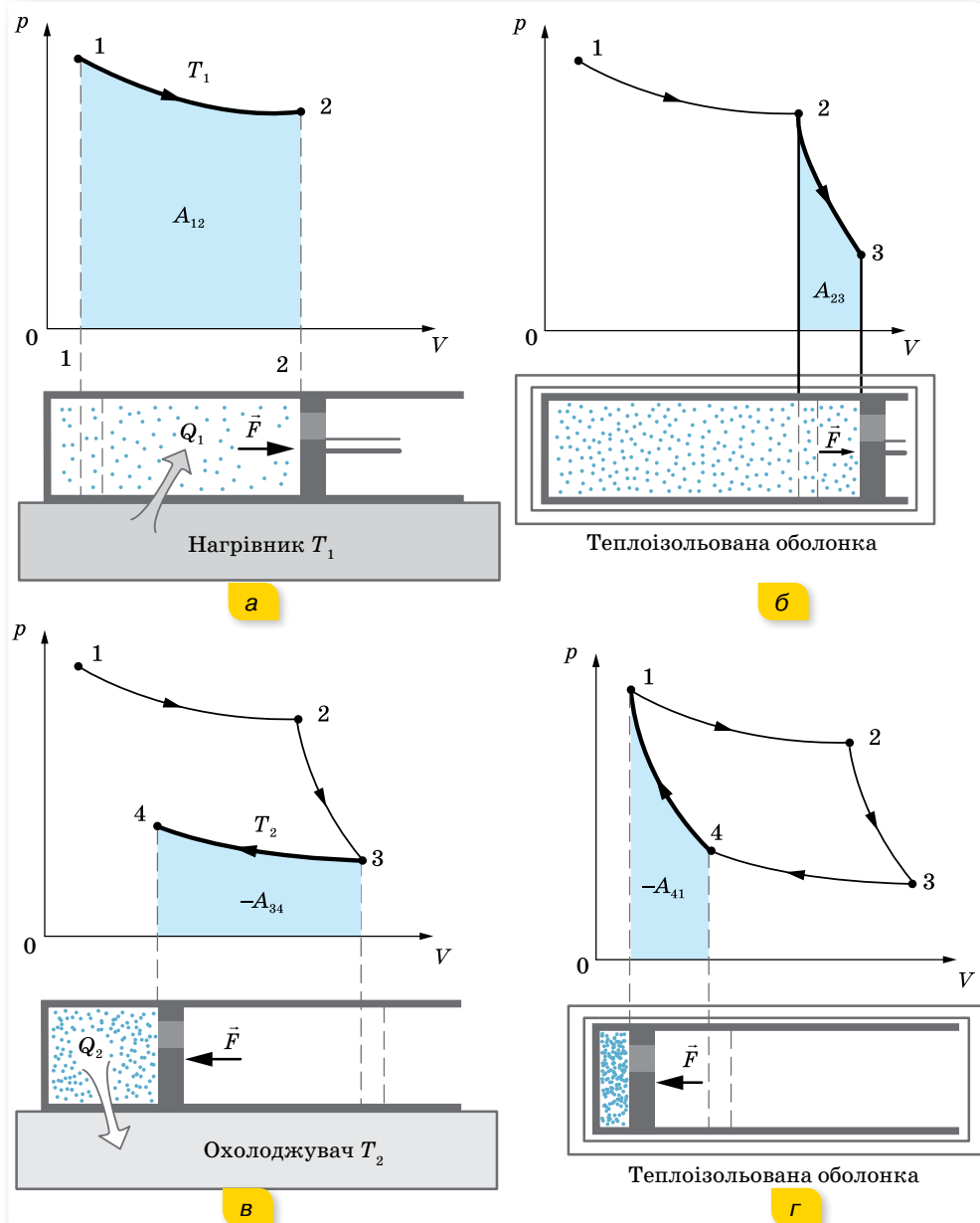
$$\eta = \frac{A}{Q_1} \quad \text{або} \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Цикл Карно. Принцип дії ідеального теплового двигуна. У 1824 р. французький інженер Саді Карно розробив цикл, вивчення якого відіграло вирішальну роль у розвитку теорії теплових машин. На основі цього циклу було з'ясовано, від чого залежить коефіцієнт корисної дії теплових машин. Такий цикл роботи теплового двигуна — найвигідніший. Його називають *циклом Карно*.

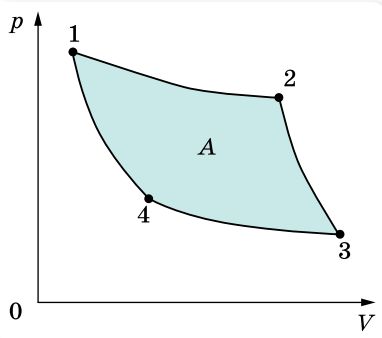
Розглянемо цикл Карно для ідеального газу. Газ, поміщений у теплопровідний циліндр із рухомим поршнем, приведемо в контакт із нагрівником, що має температуру T_1 . При цьому газ, нагріваючись до T_1 , ізотермічно розширюватиметься, переходячи зі стану 1 у стан 2 (мал. 113, а). У резуль-

таті газ отримає від нагрівника теплоту Q_1 та виконає супроти зовнішніх сил роботу $A_{12} = Q_2$.

Після досягнення газом стану 2 перервемо контакт робочого тіла (газу) з нагрівником і помістимо циліндр у теплоізольовану адіабатну оболонку. Дамо газу можливість додатково адіабатно розширитись до стану 3.



Мал. 113. Графічне зображення циклу ідеальної теплової машини



Мал. 114. Графік циклу Карно

При цьому: 1) газ виконає супроти зовнішніх сил роботу A_{23} за рахунок своєї внутрішньої енергії U ; 2) температура газу знизиться від T_1 до T_2 , оскільки його внутрішня енергія U зменшиться (мал. 113, б; с. 165).

Після досягнення газом стану 3 приведемо його в контакт з охолоджувачем, температура якого T_2 (мал. 113, в; с. 165). Газ ізотермічно стиснемо зовнішньою силою до стану 4.

Знову помістимо циліндр у теплоізолювану оболонку, і газ, у результаті адіабатного стиснення, набуде вихідного стану.

Цикл роботи ідеальної теплової машини складатиметься з двох ізотерм ($1 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 4$) і двох адіабат ($2 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 1$) (мал. 114).

Робота A_{23} , яку виконує при адіабатному розширенні газ, дорівнює роботі зовнішніх сил A_{41} над газом при адіабатному стисканні, оскільки в першому випадку температура газу зменшується від T_1 до T_2 , а в другому — підвищується від T_2 до T_1 . Тому робота, яку виконує газ, $A = A_{12} - A_{34}$, пропорційна площі фігури, обмеженої ізотермами й адіабатами (мал. 114).

ККД оборотного циклу Карно залежить від температур нагрівника T_1 і холодильника T_2 , $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, тут $\eta_{\max}$ — максимальне значення ККД теплової машини.

Із цієї формули можна зробити висновок, що збільшити ККД можна, збільшуючи температуру T_1 нагрівника або зменшуючи температуру T_2 охолоджувача.

ККД теплової машини міг би дорівнювати одиниці, якби була можливість використати охолоджувач із температурою $T_2 = 0$ К. Але абсолютний нуль температури — недосяжний. Охолоджувачами для реальних теплових двигунів є переважно атмосферне повітря або вода за температури $T \approx 300$ К. Тому основний спосіб підвищення ККД теплових двигунів — це підвищення температури нагрівника. Але її не можна підняти вище температури плавлення тих матеріалів, з яких виготовляється тепловий двигун. Наприклад, температура нагрівника сучасної парової турбіни наближається до 850 К і максимально можливе значення ККД становить майже 65 %.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Яка роль у роботі теплового двигуна в нагрівника; охолоджувача?
2. Що називають робочим тілом?
3. За якою формулою визначають ККД ідеальної теплової машини (ККД машини Карно)?
4. Як краще підвищувати ККД ідеальної теплової машини: збільшуючи температуру нагрівника чи знижуючи температуру охолоджувача?



Приклади розв'язування задач

Задача. У паровій турбіні витрачається дизельне паливо масою 0,35 кг на 1 кВт · год роботи. Температура пари, що надходить у турбіну, — 250 °С, температура охолоджувача — 30 °С. Обчисліть фактичний ККД турбіни та порівняйте його з ККД ідеальної теплової машини, що працює в тих самих температурних умовах.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 0,35 \text{ кг} \\ Pt &= 1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = \\ &= 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} \\ T_1 &= 523 \text{ К} \\ T_2 &= 303 \text{ К} \\ \eta &— ? \\ \eta_{\max} &— ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

$$\begin{aligned} \text{ККД реальної машини } \eta &= \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{з}}} = \frac{A}{Qt}, \text{ де} \\ q &= 42 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \text{ — питома теплота згорання дизельно-} \\ &\text{го палива.} \\ \eta &= \frac{3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{42 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,35 \text{ кг}} = 0,24. \end{aligned}$$

$$\text{Для ідеальної теплової машини } \eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

$$\eta_{\max} = \frac{523 \text{ К} - 303 \text{ К}}{523 \text{ К}} = 0,42.$$

Відповідь: $\eta = 24 \%$; $\eta_{\max} = 42 \%$.

ВПРАВА 24

1. Температура нагрівника ідеальної теплової машини становить 117 °С, а охолоджувача — 27 °С. Кількість теплоти, що її дістає машина від нагрівача за 1 с, дорівнює 60 кДж. Обчисліть ККД машини, кількість теплоти, яку забирає охолоджувач за 1 с, і потужність машини.
2. В ідеальній тепловій машині за рахунок кожного кілоджоуля енергії, що її надає нагрівник, виконується робота 300 Дж. Визначте ККД машини й температуру нагрівника, якщо температура охолоджувача — 280 К.
3. Який ККД теплового двигуна, якщо робоче тіло, після отримання від нагрівача кількості теплоти 1,6 МДж, виконало роботу 400 кДж? Яка кількість теплоти передана холодильнику?
4. Під час роботи електромотора потужністю 400 Вт його температура зросла на 10 К за 50 с безперервної роботи. Який ККД мотора? Теплоємність мотора $500 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.
5. У паровій турбіні витрачається 0,35 кг дизельного пального на 1 кВт · год. Температура пари, яка надходить у турбіну, дорівнює 250 °С, температура охолоджувача — 30 °С. Обчисліть фактичний ККД турбіни та порівняйте його з ККД ідеальної теплової машини, яка працює за тих самих температурних умов.
6. У скільки разів n зменшиться споживання електроенергії морозильником, що підтримує всередині температуру $t_0 = -18$ °С, якщо винести його з кімнати, температура в якій $t_1 = +27$ °С, на балкон, де температура $t_2 = -3$ °С? Швидкість теплопередачі пропорційна різниці температур тіла й середовища.



Виконємо навчальні проекти

1. Проблеми теплоенергетики: національні та локальні.
2. Визначення теплових втрат будівлі та порівняння з кількістю палива (газу, вугілля), яке витрачене неефективно. Проектування «розумного будинку».
3. Дорога забавка чи альтернатива: чи може сучасний електромобіль повністю замінити авто з двигуном внутрішнього згорання? (Порівняння енергоефективності автомобілів із двигуном внутрішнього згорання та електрокарів.)
4. Чому автомобільний парк України найстаріший у Європі: вплив законодавчо-економічних факторів на технологічне відставання автотранспортної мережі та забруднення довкілля країни.

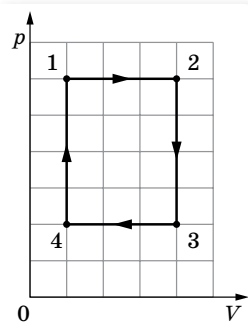


Перевірте себе (§ 23–26)



1. Як змінюється внутрішня енергія ідеального одноатомного газу за ізотермічного збільшення об'єму газу в 2 рази?
 - А не змінюється
 - Б збільшиться у 2 рази
 - В збільшиться у 3 рази
 - Г зменшиться у 2 рази
2. Під час ізобарного нагрівання 0,04 кг неону його температура змінилася на 20 °С. Яку кількість теплоти отримав газ?

А 222 Дж	В 497 Дж
Б 332 Дж	Г 831 Дж
3. Замкнений цикл, який здійснюється над певною масою ідеального газу, складається із 4 процесів. Під час яких із цих процесів газ отримує тепло?
 - А 1 → 2, 2 → 3
 - Б 4 → 1, 1 → 2
 - В 1 → 2, 3 → 4
 - Г 4 → 1, 2 → 3
4. Оберіть правильне співвідношення між кількістю теплоти Q_1 , яку отримало робоче тіло від нагрівника, кількістю теплоти Q_2 , яку передано охолоджувачу, та корисною роботою A для теплової машини, ККД якої 25 %.
 - А $A = 0,75 Q_1$
 - Б $Q_1 = 0,25 Q_2$
 - В $Q_2 = 0,75 Q_1$
 - Г $A = 0,25 (Q_1 + Q_2)$
5. Вважаючи, що внутрішня енергія ідеального газу складається з кінетичної енергії всіх його молекул, обчисліть, яку внутрішню енергію має 500 г гелію за температури $T = 300$ К.
6. Одноатомному газу, кількістю речовини 2 моль, передано кількість теплоти 1,2 кДж. При цьому газ виконав роботу 600 Дж. Як і на скільки змінилась температура газу?



§ 27 Пароутворення та конденсація

Випаровування. Як відомо, речовина може переходити з рідкого стану в газоподібний і навпаки — з газоподібного в рідкий.

Пароутворення — фазовий перехід речовини з рідкого стану в газоподібний. Процес пароутворення може відбуватися з вільної поверхні рідини (випаровування) та всередині її об'єму (кипіння) (мал. 115).

Конденсація — перехід речовини з газоподібного стану в рідкий.



Мал. 115. Випаровування та кипіння

Розглянемо процес випаровування з погляду молекулярно-кінетичної теорії. Як відомо, потенціальна енергія молекул рідини зі збільшенням відстані між ними зростає. Отже, щоб молекула змогла віддалитись на більшу відстань і, взагалі, покинути рідину, необхідно виконати роботу за рахунок зменшення її кінетичної енергії. Серед молекул рідини, які хаотично рухаються в її поверхневому шарі, завжди є такі, значення кінетичної енергії яких більше за роботу, необхідну для подолання протидії молекулярних сил.

Випаровування — це процес пароутворення, що відбувається за будь-якої температури тільки з вільної поверхні рідини, що межує з газоподібним середовищем або з вакуумом.

Молекули рідини, що покинули її, утворюють над її поверхнею *пару*.

Випаровування має такі властивості:

- ▶ Оскільки з рідини під час випаровування вилітають найшвидші молекули, середня швидкість руху молекул, що залишилися, зменшується, ось чому під час випаровування рідина охолоджується. Для підтримання температури такої рідини сталою необхідно підводити тепло.
- ▶ Інтенсивність випаровування залежить від площі відкритої поверхні рідини: що більша поверхня, то більша кількість молекул випаровується за одиницю часу. (Наведіть самостійно приклади, які підтверджують цей ефект.)
- ▶ Випаровування відбувається за будь-якої температури. Саме тому над вільною поверхнею рідини завжди є пара цієї рідини. Що меншою є густина пари рідини над її поверхнею, то інтенсивніше випаровування. Якщо вітер над посудиною відносить з повітрям пару рідини, що утворилась, рідина випаровується швидше.
- ▶ З підвищенням температури інтенсивність випаровування рідини зростає (доведіть це самостійно і проілюструйте).
- ▶ Швидкість випаровування залежить також від природи речовини, яка випаровується. Зокрема, вода випаровується швидше, ніж олія, а ефір — швидше, ніж вода. Це пояснюється різними силами взаємодії між молекулами цих речовин.

Охолодження рідини в результаті її випаровування спостерігається у природі й використовується на практиці. Завдяки тому, що $\frac{2}{3}$ поверхні

Землі вкрито водоймами, підтримується тепловий баланс нашої планети. Після купання шкіра людини охолоджується через випаровування з поверхні тіла крапель води, при цьому повітря здається холоднішим, ніж вода. Під час перевезення продуктів харчування різними транспортними засобами у спеціальних пристроях випаровують рідкий аміак або рідкий двоокис вуглецю. У місцевостях із жарким кліматом воду намагаються зберігати в пористих глиняних посудинах. Вода, просочуючись крізь пори такої посудини, випаровується, і в результаті цього залишається холодною. Через властивість швидко випаровуватися й охолоджуватися деякі рідини (ефір) використовують як знеболювальний засіб.

Ненасичена та насичена пара. Молекули пари, рухаючись хаотично, можуть набути швидкості, напрямленої в бік рідини, і до неї повернутись — відбувається конденсація.

У відкритій посудині молекули, що випарувалися, розлітаються на всі боки й можуть не повернутися назад. У цих випадках випаровування переважає над конденсацією, і кількість рідини зменшується. Утворена в таких умовах пара називається **ненасиченою**.

Накриємо посудину, що містить рідину та її пару. Через деякий час між рідиною та парою встановиться теплова рівновага. У цьому стані кількість молекул, що переходять у пару, за деякий час дорівнює кількості молекул, які повертаються в рідину (конденсуються) за такий самий час. Таку рівновагу називають **динамічною рівновагою** між процесами пароутворення та конденсації речовини. А таку систему називають **двофазною**.

Пару, що перебуває в тепловій динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають **насиченою**.

Ця назва відображає той факт, що в певному об'ємі за певної температури не може міститися більшої кількості пари. Насичена пара за певної температури має найбільшу густину й чинить найбільший тиск.

Процес кипіння. Особливим видом пароутворення є процес *кипіння*. Необхідною умовою кипіння є наявність в об'ємі рідини бульбашок розчиненого в ній газу або його молекул на стінках посудини, які відіграють таку саму роль, як пилінки або йони у процесі конденсації.

Під час нагрівання рідини вода випаровується вздовж поверхні бульбашки в її середину. З підвищенням температури бульбашка заповнюється не тільки повітрям, розчиненим у воді, а й водяною парою. Зі збільшенням кількості водяної пари в середині бульбашок їх об'єм поступово збільшується, а відповідно, збільшується й виштовхувальна архімедова сила, що діє на бульбашку. Бульбашки відриваються від поверхні стінок і дна посудини й підіймаються до поверхні рідини. Якщо вода в посудині ще не прогріта повністю й верхні її шари залишаються холодними, бульбашки стискаються, створюючи характерний шум, який ми чуємо перед початком кипіння рідини. Якщо ж вода прогрілася повністю, а ми продовжуємо її нагрівати, процес пароутворення в середину бульбашок відбувається інтенсивніше. Кількість пари всередині бульбашок збільшується, відповідно підвищується й тиск пари. Унаслідок цього об'єм бульбашок збільшується, і за певної температури рідини бульбашки починають спливати на поверхню й лопаються, а водяна пара, що містилася в бульбашках, виходить назовні. Іноді при цьому можна спостерігати туман, який утворюється над посудиною: водяна пара змішується з холодним повітрям і конденсується у вигляді маленьких крапельок. Самої пари, звичайно, не видно. При кипінні температура рідини залишається сталою, оскільки вся теплота, що надається рідині, йде на внутрішнє випаровування в усьому об'ємі.

Кипіння — процес утворення пари не тільки на поверхні рідини, а й у її об'ємі, який відбувається за сталої (за даного тиску) температури.

Щоб рідина у процесі пароутворення не змінювала своєї температури, їй треба надавати енергію. Питома теплота пароутворення (L , r) — це кількість теплоти, яку необхідно надати одиниці маси речовини в рівноважному ізобарично-ізотермічному процесі для перетворення її в пару за температури кипіння. Кількість теплоти, необхідна для *випаровування*, визначається за формулою: $Q = Lm$, де L — питома теплота пароутворення. Кількість теплоти, яка виділяється під час конденсації пари, визначається також за цією формулою.

Температура кипіння. Усі рідини мають сталу температуру кипіння, яка залежить від роду речовини та зовнішнього тиску. *Що більший зовнішній тиск, то вищою буде температура кипіння рідини, і навпаки.* Так, на висоті 5 км над рівнем моря, де тиск у 2 рази нижчий від атмосферного, температура кипіння води становить $83\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отже, рідину можна закип'ятити, не нагріваючи її; достатньо *знижити тиск над рідиною, і вона закипить*. Цю властивість рідин широко використовують у різних технологічних процесах: у процесі нафтопереробки для роз'єднання нафтопродуктів, під час цукроваріння сироп кипить завдяки зниженому тиску при незначній температурі й цукор не пригоряє тощо.

Для прискорення варіння винайшли «швидковарки» — посудини зі щільно припасованою кришкою, у якій за допомогою регульованого запобіжного клапана під час нагрівання досягається підвищений тиск і температура кипіння води сягає $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оскільки швидкість хімічних реакцій під час приготування їжі подвоюється на кожні $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, що перевищують $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, то підвищення температури кипіння на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 4 рази прискорює процес приготування їжі.

У парових котлах, де тиск сягає 15 атм ($1,5 \cdot 10^6\text{ Па}$), температура кипіння води майже $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Перегріта рідина. Ретельно відполірувавши поверхню посудини та очистивши саму рідину, можна досягти практичної відсутності в ній центрів пароутворення. Це приводить до того, що кипіння не починається навіть за температур, вищих за температуру кипіння (чи зовнішніх тисках, нижчих від тиску насиченої пари за певної температури). Таку рідину називають *перегрітою*.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. Як пояснити охолодження рідини під час її випаровування?
2. Від чого залежить температура кипіння рідини? Чому під час кипіння температура рідини не змінюється?
3. У каstrулі-швидковарці вода кипить приблизно за $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Каstrуля герметично закрита кришкою, у якій є клапан, що випускає пару за тиску 90–110 кПа (понад атмосферний). Поясніть роботу каstrулі.



Приклади розв'язування задач

Задача. В алюмінієвий калориметр масою $0,5\text{ кг}$, в якому міститься 1 кг води за $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, впустили 100 г водяної пари температурою $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначте температуру в калориметрі після встановлення теплової рівноваги. Втратами теплоти знехтуйте.

Дано:

$$m_1 = 0,5 \text{ кг}$$

$$m_2 = 1 \text{ кг}$$

$$m_3 = 0,1 \text{ кг}$$

$$t_1 = t_2 = 10^\circ \text{C}$$

$$t_3 = 100^\circ \text{C}$$

$$L = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$c_1 = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$t = ?$$

Розв'язання:

Складаємо рівняння теплового балансу: у лівій його частині запишемо кількість теплоти, яку отримали калориметр і вода в ньому; у правій частині — кількість теплоти, яку віддали пара і вода, утворена з неї, у процесі охолодження:

$$c_1 \cdot m_1 \cdot (t - 10^\circ \text{C}) + c_2 \cdot m_2 \cdot (t - 10^\circ \text{C}) = \\ = Lm_3 + c_2 \cdot m_3 \cdot (100^\circ \text{C} - t).$$

$$\text{Звідси } 5060 \cdot t = 31840^\circ \text{C},$$

$$t = 63^\circ \text{C}.$$

Відповідь: у калориметрі встановиться температура 63°C .

ВПРАВА 25

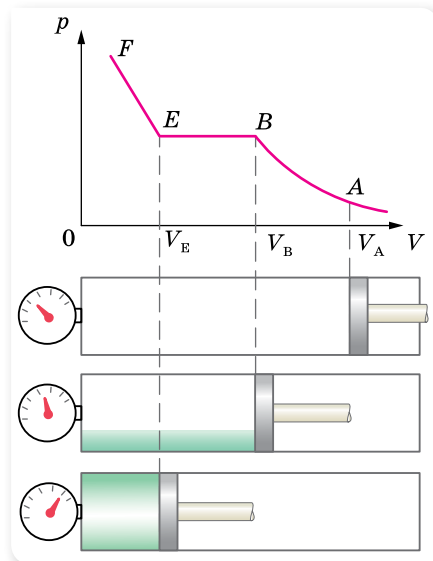
1. Перед ін'єкцією медсестра протирає місце уколу спиртом. Чому відчуття холоду при цьому значно сильніше, ніж при протиранні шкіри вологою тканиною, адже питома теплота пароутворення води набагато більша, ніж спирту, і вода, випаровуючись, має отримувати більшу кількість теплоти?
2. Що має більшу внутрішню енергію: 1 кг води за температури 100°C чи 1 кг водяної пари, взятої за такої самої температури?
3. Чи існує така температура, за якої рідина перестає випаровуватись?
4. У каструлю наливають вісім повних склянок холодної води за температури 10°C і п'ять повних склянок гарячої води за температури 80°C . Яка температура встановиться в каструлі? Теплоємністю каструлі знехтуйте.
5. Яку кількість теплоти треба надати 50 г води, температура якої 0°C , щоб довести її до кипіння й перетворити половину її в пару?
6. Яка кількість теплоти виділяється під час конденсації водяної пари, маса якої 10 кг за температури 100°C , та охолодженні води, що утворилася, до 20°C ?
7. Водяну пару масою 1 кг взято за температури 100°C . Скільки енергії передасть вона навколишньому середовищу при конденсації й подальшому охолодженні до 0°C ?
8. Металеву кульку масою 900 г нагріли до 155°C , опустили в посудину з 3 л води, температура якої становила 10°C . У результаті теплообміну встановилася температура 15°C . З якого металу виготовлено кулю? Нагріванням посудини знехтуйте.

§ 28

Властивості насиченої й ненасиченої пари

Властивості насиченої й ненасиченої пари. Ненасичена й насичена пари мають різні властивості. Дослідимо їх.

Розглянемо процес *ізотермічного стискання пари*. Нехай ненасичена пара міститься в термоізолюваній посудині (для підтримки сталої темпера-



Мал. 116. Ізотермічний перехід ненасиченої пари в рідину

тури) з поршнем. Якщо ми стискатимемо поршнем ненасичену пару, її густина і тиск зростатимуть доти, поки пара не стане насиченою. Подальше зменшення об'єму не може збільшити ні густину, ні тиск насиченої пари, бо надлишок її перетворюватиметься на рідину. Згодом уся пара перетворюється на рідину, і поршень доторкнеться до її поверхні. Тепер уже зменшення об'єму залежатиме від стискання рідини, а оскільки рідини важко стискаються, то зменшення об'єму потребує значного збільшення тиску.

Залежність тиску ненасиченої й насиченої пари від об'єму зображено на малюнку 116. Якщо під поршнем міститься тільки ненасичена пара (точка А), то зменшення її об'єму спричиняє збільшення тиску за ізотермою

AB (іншими словами, ненасичена пара підпорядковується закону Бойля — Маріотта для ідеального газу). У точці B пара стає насиченою.

Подальше ізотермічне стискання пари приводить до того, що вона починає конденсуватись (відрізок BE). Пара в цей час є насиченою, тиск не змінюється. *Густина й тиск насиченої пари за незмінної температури є сталими величинами (ділянка BE).*

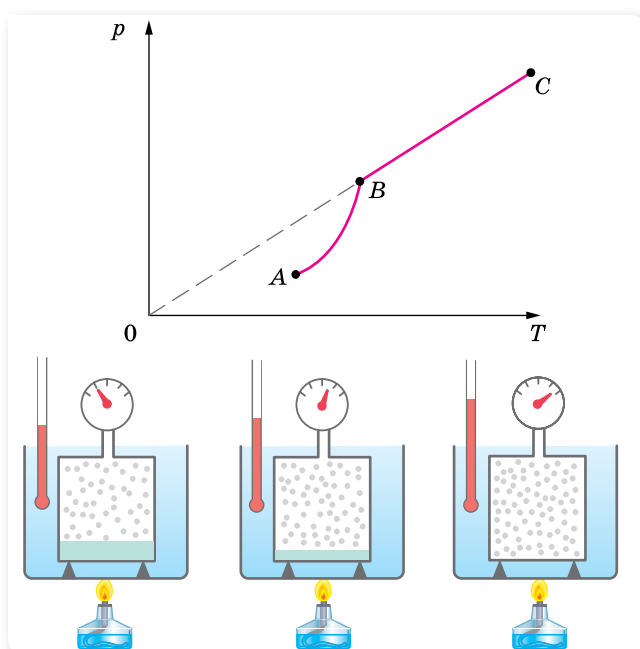
Коли вся пара сконденсується (точка E), подальше зменшення об'єму спричинить стискання рідини (ділянка EF).

Отже, для ненасиченої пари (як і для ідеального газу) виконується закон Бойля — Маріотта, для насиченої пари цей закон не виконується: *тиск і густина насиченої пари не залежать від об'єму.*

З'ясуємо, як поводитиме себе насичена й ненасичена пара в *ізохорному процесі*. Для цього візьмемо герметично закриту посудину (для підтримки сталого об'єму), з'єднану з манометром. У посудині міститься тільки рідина та її пара (інших газів немає). Нагріваючи посудину, фіксуватимемо значення температури й тиску пари. Графічно цю залежність наведено на малюнку 117.

Під час нагрівання кількість рідини в закритій посудині зменшується, отже, густина і маса пари в посудині при нагріванні збільшується. Тиск насиченої пари зростає не тільки внаслідок збільшення температури, а й внаслідок збільшення густини пари. Тож залежність тиску насиченої пари від температури (ділянка AB) не підпорядковується закону Шарля.

Коли вся рідина випарується, пара за подальшого нагрівання стане вже ненасиченою, і її тиск за сталого об'єму зростатиме прямо пропорційно абсолютній температурі (ділянка BC).

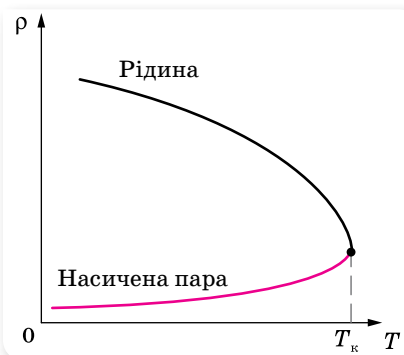


Мал. 117. Залежність тиску пари від температури

Робимо висновок: *закон Шарля до насиченої пари не застосовний.*

Зворотний перехід ненасиченої пари в насичену, а потім — у рідину, як і перехід рідини в насичену й ненасичену пару, може відбуватися двома шляхами — під час зміни об'єму пари та за зміни її температури. Якщо охолоджувати ненасичену пару за сталого тиску, вона стає насиченою, а потім конденсується в рідину (утворення туману, роси).

Як уже зазначалося, під час нагрівання густина насиченої пари зростає, а густина рідини зменшується (мал. 118). Тобто зі зростанням температури їх густини зближуються й за деякої температури T_k (критичної температури) стають однаковими. У цей момент між рідиною та парою зникає межа поділу, пару й рідину не можна розрізнити.



Мал. 118. Залежність густини рідини та її пари від температури

Критична температура — це температура, за якої зникає відмінність фізичних властивостей рідини та її насиченої пари.

За критичної температури густина й тиск насиченої пари стають максимальними, а густина рідини, що перебуває в рівновазі з парою, — мінімальною.

Для кожної речовини існує своє певне значення критичної температури.

Тепер ми можемо дати відповідь на питання, чому одні речовини існують навколо нас і в рідкому, і в газоподібному станах, а інші — тільки в якомусь одному. Особливості газоподібного стану речовини визначаються значеннями температури, яку вона має. Якщо температура газу за атмосферного тиску вища за її критичне значення для цієї речовини, то газ залишається газом, і перетворити його на рідину не можна ні за яких тисків. Парою називають газоподібний стан речовини, для якої звичайні температури виявляються нижчими від критичної температури. Така речовина за звичайних умов може перебувати як у рідкому, так і в газоподібному станах.

Перенасичена пара. Спостереження показують, якщо пара не стискається поряд з рідиною, то пару можна охолодити до температури, нижчої від критичної, але конденсуватись у рідину вона не буде. Така пара називається *перенасиченою*. Пояснюється це тим, що для конденсації необхідні так звані центри конденсації, які б могли бути зародками краплинок рідини. Центрами конденсації, як правило, є пилинки або йони. Чиста пара конденсується лише після досягнення високого ступеня перенасичення.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які властивості має насичена, а які — ненасичена пара?
2. Яку температуру називають критичною?



Експериментуємо

Яка вода замерзне швидше: холодна чи гаряча? Візьміть дві однакові склянки і наповніть їх водою, одну — окропом, іншу — водою з-під крану. У якій зі склянок вода замерзне швидше на морозі? Якими будуть результати експерименту, якщо склянки накрити кришками?



§ 29 Вологість повітря

Водяна пара в повітрі. З поверхні водойм, вологого ґрунту, листя рослин, легенів і шкіри людини і тварин в атмосферу Землі випаровується величезна кількість водяної пари $\left(10^{14} \frac{\text{т}}{\text{рік}}\right)$ і майже $\frac{1}{4}$ цієї води випадає у вигляді опадів на суходолі. Саме тому атмосферне повітря завжди воло-

ге, тобто містить воду (мал. 119). Атмосферне повітря є сумішшю різних газів ($N_2 = 78 \%$, $O_2 = 21 \%$, інертних газів, водяної пари). Хоча водяної пари в атмосфері мало, порівняно з іншими складовими, її значення для життєдіяльності всього живого — надзвичайне.



Мал. 119. Водяна пара в повітрі

Від наявності водяної пари в атмосфері залежить режим випаровування з поверхні суходолу, морів. Перехід водяної пари в рідкий і твердий стани приводить до утворення туманів, хмар, опадів. Виділення теплоти під час конденсації та замерзання є внутрішнім джерелом енергії руху повітряних мас. Здатність водяної пари поглинати сонячне та інфрачервоне випромінювання Землі впливає на тепловий режим земної поверхні й атмосфери.

Від вмісту водяної пари в атмосфері залежить випаровування води організмом людини, що складається в середньому на 67–68 % з води. За одну добу (залежно від роду занять) з поверхні шкіри й легенів людини випаровується майже 2 кг води. Тривале перебування в теплому й вологому повітрі порушує теплообмін в організмі. Людина стає в'ялою, її працездатність знижується. Саме тому про вміст водяної пари в атмосфері (вологість повітря) щоденно повідомляють у прогнозах погоди.

Важливе значення має вологість для життєдіяльності тваринного та рослинного світу, для процесів сушіння виробів тощо. Контроль і підтримання необхідної вологості дуже важливі також для зберігання книг, творів мистецтва, музичних інструментів, харчових продуктів, овочів, фруктів тощо.

Для підтримання необхідної вологості користуються *кондиціонерами*, які зволожують чи осушують повітря.

Вологість повітря. Вміст водяної пари в повітрі, тобто його вологість, можна схарактеризувати кількома величинами.

Так, *абсолютна вологість* повітря дорівнює вмісту водяної пари в грамах в одному кубічному метрі повітря (густина водяної пари). За значенням абсолютної вологості не можна судити про те, наскільки водяна пара в цих умовах близька до насичення. Саме тому ввели величину, яка показує, наскільки водяна пара за певної температури близька до насичення — *відносну вологість повітря*. Звернімо увагу на те, що атмосферний тиск дорівнює сумі тисків сухого повітря та водяної пари, що є в ньому. Тиск, який чинила б водяна пара, коли б не було інших газів, називають *парціальним тиском водяної пари*. Тепер дамо визначення.

Відносна вологість повітря — це фізична величина, що показує, наскільки водяна пара, що є в повітрі, близька до насичення, і вона вимірюється відношенням парціального тиску водяної пари p , що міститься в повітрі за певної температури, до тиску p_n насиченої пари (за тієї самої температури), вираженим у відсотках, $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100 \%$.

Оскільки, згідно з газовими законами, тиск прямо пропорційний концентрації молекул, отже і густині ρ , можна записати $\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100 \%$, де ρ — густина ненасиченої пари (*абсолютна вологість*), ρ_n — густина насиченої водяної пари.

На основі експериментальних результатів складено таблиці залежності тиску насиченої водяної пари від температури. Якщо знижується температура ненасиченої пари, то її відносна вологість зростатиме без додаткового випаровування води. Знижуючи температуру повітря, можна довести пару, яка в ньому міститься, до стану насичення, що у природі приводить до утворення туману, випадання роси.

Температура, до якої треба ізобарно охолодити повітря певної вологості, щоб водяна пара стала насиченою, називається **точкою роси**.

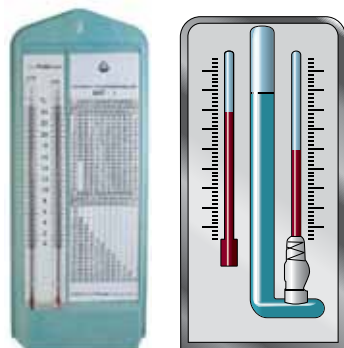
Точка роси також є характеристикою вологості повітря, оскільки вона дає змогу визначити парціальний тиск водяної пари й відносну вологість.

Прилади для вимірювання вологості повітря. Вологість повітря вимірюють спеціальними приладами — психрометром, гігрометром тощо.

Гігрометр психрометричний (мал. 120) складається з двох термометрів — сухого та вологого. Резервуар одного з них залишається сухим, він показує температуру повітря. Резервуар другого обмотаний шматком тканини, зануреної у воду. Вода випаровується, і завдяки цьому

термометр охолоджується. Що меншою є відносна вологість повітря ϕ , то інтенсивніше випаровування й тим нижчу температуру показує вологий термометр. За різницю температур термометрів і спеціальною таблицею можна визначити відносну вологість ϕ повітря. Найсприятливішою для організму людини є відносна вологість від 40 до 60 %.

Вимірюють вологість також за допомогою волосяного гігрометра, дія якого ґрунтується на властивості волосини людини змінювати свою довжину у вологому повітрі. Зі збільшенням вологості довжина волосини зростає, а зі зменшенням вологості — волосина коротшає.



Мал. 120. Гігрометр психрометричний і його схематичне зображення



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Що розуміють під вологістю повітря?
2. Відносна вологість повітря 70 %. Що це означає?
3. За допомогою яких приладів визначають вологість повітря?
4. Які суб'єктивні відчуття вологості повітря в людини?
5. Сухий термометр психрометра показує 16 °C, а вологий — 8 °C. Відносна вологість, виміряна волосяним гігрометром, дорівнює 30 %. Чи правильні показання гігрометра?



Приклади розв'язування задач

Задача. У кімнаті за температури 20 °C відносна вологість повітря 20 %. Скільки води треба додатково випаровувати для збільшення вологості до 50 %, якщо об'єм кімнати — 40 м³?

Дано:

$$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\phi_1 = 20\%$$

$$\phi_2 = 50\%$$

$$V = 40\text{ м}^3$$

$$\Delta m = ?$$

Розв'язання:

За відносної вологості ϕ_1 густина пари $\rho_1 = \phi_1 \rho_{\text{н}}$, а за ϕ_2 : $\rho_2 = \phi_2 \rho_{\text{н}}$, де $\rho_{\text{н}}$ — густина насиченої пари за $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відповідно маси водяної пари $m_1 = \phi_1 \rho_{\text{н}} V$ і $m_2 = \phi_2 \rho_{\text{н}} V$. Додатково треба випаровувати масу води $\Delta m = m_2 - m_1 = (\phi_2 - \phi_1) \rho_{\text{н}} V$.

$$\text{З таблиці знаходимо } \rho_{\text{н}} = 1,73 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Після підстановки даних отримаємо:

$$\Delta m = (0,5 - 0,2) \cdot 1,73 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 40\text{ м}^3 = 0,208\text{ кг}.$$

Відповідь: $\Delta m = 0,208\text{ кг}$.

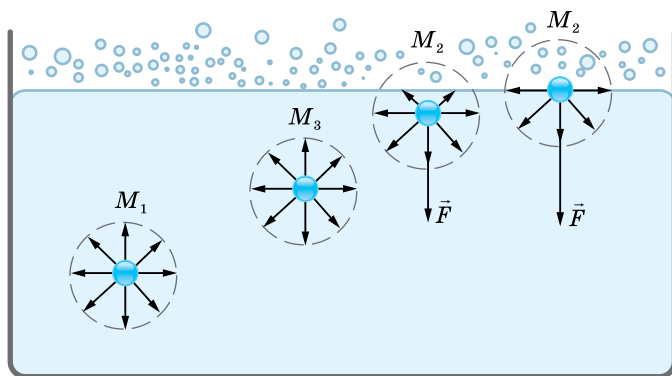
ВПРАВА 26

1. Восени перед сходом Сонця, коли температура повітря падає, часто утворюється туман. Чому утворення туману запобігає подальшому зниженню температури повітря?
2. Густина водяної пари за $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює $23 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Насичена ця пара чи ненасичена?
3. У циліндричній посудині під поршнем, площа якого 10 см^2 , міститься вода за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, причому поршень торкається поверхні води. Скільки води випарується, якщо підняти поршень на 15 см ?
4. Тиск насиченої пари ефіру за $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює $24,7\text{ кПа}$, а за $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 123 кПа . Порівняйте значення густини пари за цих температур.
5. Визначте відносну вологість повітря в кімнаті за $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо за $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ утворюється роса.
6. Відносна вологість у кімнаті за температури $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить 65% . Як зміниться відносна вологість після зниження температури повітря на 4 К , якщо парціальний тиск водяної пари залишиться таким самим?
7. Відносна вологість повітря ввечері за $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює 55% . Чи випаде роса, якщо вночі температура зменшиться до $8\text{ }^{\circ}\text{C}$?
8. Для осушення повітря, яке заповнює балон місткістю 10 л , до балону ввели шматок хлориду кальцію, що увібрав $0,13\text{ г}$ води. Якою була відносна вологість повітря в балоні, якщо його температура дорівнює $20\text{ }^{\circ}\text{C}$?

§ 30

Рідини. Властивості поверхні рідин

Явище поверхневого натягу. Найхарактернішою властивістю рідини, є те, що на межі з газом рідина утворює *вільну поверхню*. З'ясуємо, чим відрізняються дії молекулярних сил всередині рідини та на її поверхні.



Мал. 121. Сили міжмолекулярної взаємодії молекул рідини

На кожен молекулу рідини діють сили притягання сусідніх молекул (мал. 121). Ці сили для молекули M_1 , що містяться всередині рідини, взаємно скомпенсовані, тобто середнє значення рівнодійної сил притягання близьке до нуля. Випадкові зміни величини і напрямку цієї рівнодійної змушують молекулу здійснювати лише хаотичний рух всередині рідини.

Рівнодійна ж сил притягання F , що діє на молекули, які містяться на поверхні рідини, відмінна від нуля, адже над поверхнею рідини її молекул значно менше, ніж усередині. Таким чином, рівнодійна сил притягання, що діють на молекули, які розміщені в поверхневому шарі товщиною, яка дорівнює радіусу міжмолекулярної взаємодії, направлена вниз (усередину рідини). Унаслідок цього молекули поверхневого шару чинять молекулярний тиск на рідину, стягуючи її поверхню до мінімуму. Це явище називають *явищем поверхневого натягу*. Рівнодійну сил притягання, які діють між молекулами на поверхні рідини, називають *силою поверхневого натягу* F_n .

Завдяки явищу поверхневого натягу вільна поверхня води поводить себе як пружна плівка, на ній можуть утримуватися легкі (навіть металеві) предмети й рухатися комахи-водомірки (мал. 122).



Мал. 122.
Комаха-водомірка
на поверхні води

Явище поверхневого натягу з позицій молекулярно-кінетичної теорії пояснюється таким чином. Оскільки молекули рідини, розміщені в її поверхневому шарі, втягуються всередину рідини, їх потенціальна енергія більша, ніж у молекул всередині рідини. За рахунок цієї додаткової потенціальної енергії молекул поверхневого шару може бути виконана робота, пов'язана зі зменшенням вільної поверхні рідини. Або, навпаки, для того, щоб вивести молекулу M_1 (мал. 121) із середини рідини на її поверхню, треба подолати протидію молекулярних сил, тобто виконати роботу, яка потрібна для збільшення вільної енергії поверхневого шару рідини. Неважко зрозуміти, що при цьому зміна вільної енергії прямо пропорційна зміні площі вільної поверхні рідини: $\Delta E \sim \Delta S$. І оскільки зміна енергії визначається роботою, $\Delta E = A$, то $A \sim \Delta S$.

Робота молекулярних сил залежить від роду рідини й умов над поверхнею рідини. Тому, переходячи до знака рівності, введемо коефіцієнт пропорційності σ , що описує ці залежності. Його називають коефіцієнтом поверхневого натягу.

Коефіцієнт поверхневого натягу, σ — це фізична величина, яка описує залежність роботи молекулярних сил під час зміни площі вільної поверхні рідини від роду рідини й зовнішніх умов і вимірюється роботою молекулярних сил, необхідною для зменшення площі вільної поверхні

рідини на одиницю: $\sigma = \frac{A}{\Delta S}$.

Одиниця коефіцієнта поверхневого натягу в СІ — джоуль на метр у квадраті: $1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$.

Цей коефіцієнт визначено для багатьох однорідних рідин і занесено до таблиць. З підвищенням температури коефіцієнт σ зменшується через збільшення середньої відстані між молекулами на поверхні рідини. За критичної температури $T_{\text{кр}}$ поверхневий натяг зникає, оскільки немає різниці між рідиною та її парою.

Коефіцієнт поверхневого натягу може бути виражений і через силу поверхневого натягу та довжину межі вільної поверхні: $\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}$.

Силою поверхневого натягу називають силу, яка діє вздовж поверхні рідини перпендикулярно до лінії, що обмежує цю поверхню, і прагне скоротити площу вільної поверхні до мінімуму.

З формули $\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}$ видно, що одиницею коефіцієнта поверхневого натягу може бути ньютон на метр: $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Вивчаючи основи механіки, ми дізналися, що будь-яка механічна система у вільному стані намагається зайняти таке положення, у якому її потенціальна енергія мінімальна. Така ж закономірність спостерігається і в молекулярній фізиці. Під дією сил поверхневого натягу поверхневий шар рідини намагається скоротити площу своєї поверхні до мінімального для даного об'єму рідини розміру. Рідина, що перебуває у вільному стані й не взаємодіє з опорою чи посудиною (наприклад, у стані невагомості) набуває форму кулі, бо куляста форма має мінімальну площу поверхні для заданого об'єму.

Поверхнево-активні речовини. На значення коефіцієнта σ також впливає наявність домішок у самій рідині. Речовини, які послаблюють поверхневий натяг рідин, називають *поверхнево-активними*. Найвідомішими поверхнево-активними речовинами для води є мило та мийні засоби. Зокрема, мило зменшує коефіцієнт поверхневого натягу води з $72 \cdot 10^{-3}$ до $45 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$. У процесі прання білизни значення σ зменшується

як через нагрівання рідини, так і завдяки додаванню мийних засобів, це сприяє легшому проникненню розчину в тканину. З молекулярної точки зору вплив поверхнево-активних речовин пояснюється тим, що сили притягання між молекулами самої рідини більші за сили притягання між молекулами поверхнево-активної речовини. Тому молекули рідини, розміщені в поверхневому шарі, з більшою силою втягуються всередину рідини, ніж молекули домішок. Унаслідок цього молекули рідини переходять з поверхневого шару в глибину, а молекули поверхнево-активної речовини витісняються на поверхню.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Які властивості має поверхневий шар рідини? Що таке сила поверхневого натягу?
2. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу? У яких одиницях вимірюється коефіцієнт поверхневого натягу в СІ?
3. Як зміниться сила поверхневого натягу води після розчинення в ній мила?



Експериментуємо

Покладіть на поверхню води сірник і доторкніться до води шматком мила з одного боку поблизу сірника. Поясніть явище, що спостерігається при цьому. Визначте силу, яка приводить сірник у рух, якщо довжина сірника 4 см.



Приклади розв'язування задач

Задача. Тонке алюмінієве кільце радіусом 7,8 см лежить на поверхні мильного розчину. З яким зусиллям можна відірвати кільце від розчину? Температуру розчину вважати кімнатною. Маса кільця 4 г.

Дано:

$$R = 7,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$\sigma = 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$F = ?$

Розв'язання:

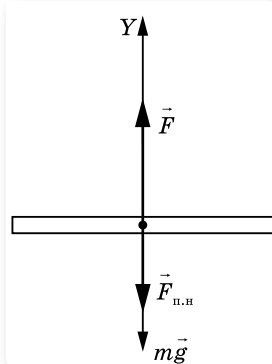
Сили, що діють на кільце, показано на малюнку 123.

Оскільки кільце дотикається до мильного розчину і із зовнішнього, і з внутрішнього боку, то сила поверхневого натягу $F_{\text{п.н}} = 2\sigma l$, де $l = 2\pi R$.

Сила, яку необхідно прикласти, щоб відірвати кільце, дорівнює $F = mg + 2\sigma l = mg + 4\pi\sigma R$.

Після підстановки даних отримуємо: $F = 0,11 \text{ Н}$.

Відповідь: 0,11 Н.



Мал. 123. Сили, що діють на кільце

ВПРАВА 27

1. Яку роботу треба виконати, щоб надути мильну бульбашку радіусом 4 см? Коефіцієнт поверхневого натягу мильного розчину дорівнює $40 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.
2. З крапельниці накрапали однакові маси води, спочатку холодної за температури 8°C , а потім гарячої — за температури 80°C . Як і в скільки разів змінився коефіцієнт поверхневого натягу води, якщо в першому випадку утворилося 40, а в другому — 48 крапель? Вважайте, що густина холодної та гарячої води — однакова.
3. Кільце, внутрішній діаметр якого 25 мм, а зовнішній — 26 мм, підвішене горизонтально до пружини й дотикається до поверхні рідини. Жорсткість пружини $9,8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$. Під час опускання поверхні рідини, кільце відривається від неї в момент, коли видовження пружини становить 5,3 мм. Визначте поверхневий натяг рідини.

§ 31 Змочування. Капілярні явища

Змочування. Розглянемо явища, що виникають на межі дотику поверхонь рідини і твердого тіла. У повсякденному житті можна спостерігати, що крапля води може розпливатись (наприклад, по чистій поверхні скла (мал. 124, а)), але може і не розпливатись і мати при цьому форму майже правильної кулі (наприклад, краплі роси) (мал. 124, б). У першому випадку кажуть, що вода змочує поверхню, у другому — не змочує.

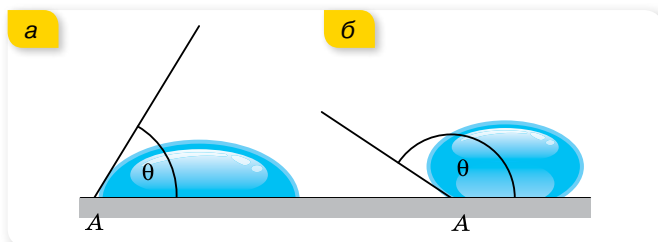
Як саме поводитиме себе рідина на поверхні твердого тіла, залежить від сил взаємодії молекул рідини з молекулами твердого тіла. Якщо взаємодія молекул рідини між собою менша, ніж їх взаємодія з молекулами контактного твердого тіла, то маємо випадок **змочування**, а коли ця взаємодія більша, — **незмочування**.

Оскільки явища змочування і незмочування визначаються відносними властивостями речовин рідини і твердого тіла, одна й та сама рідина може бути змочувальною для одного твердого тіла і незмочувальною для іншого. Наприклад, вода змочує скло і не змочує парафін.

Кількісною мірою змочування є **крайовий кут** θ (мал. 125) — кут, що утворюється поверхнею твердого тіла і дотичною, проведеною до поверхні рідини в точці дотику (рідина міститься усередині кута).



Мал. 124.
Явище змочування (а);
незмочування (б)



Мал. 125. Крайовий кут: а — гострий для змочувальних рідин; б — тупий для незмочувальних

За змочування $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ і що меншим є кут θ , то сильнішим буде змочування. Якщо крайовий кут дорівнює нулю, змочування називають повним, або ідеальним. Прикладом ідеального змочування може бути

розтікання спирту по чистій поверхні скла. У цьому випадку рідина розтікається по поверхні твердого тіла до тих пір, доки не покриє її всю.

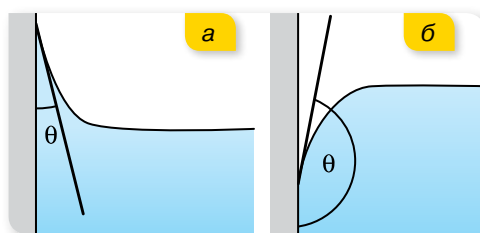
У разі незмочування $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ і що більшим є кут θ , то сильнішим буде незмочування. За значення крайового кута 180° спостерігається повне незмочування. У цьому випадку рідина не розтікається по поверхні твердого тіла і легко скочується з неї. Подібне явище можна спостерігати, коли ми намагаємося вимити жирну поверхню холодною водою. Миючі властивості мила і синтетичних порошків пояснюються тим, що мильний розчин має менший поверхневий натяг, ніж вода. Великий поверхневий натяг води заважає їй проникати в дрібні пори і проміжки між волокнами тканини.

Явища змочування і незмочування відіграють важливу роль у житті людини. У таких виробничих процесах, як склеювання, фарбування, паєння дуже важливо забезпечити змочування поверхонь. Забезпечення незмочування дуже важливе для гідроізоляції, синтезу водостійких матеріалів. У медицині явища змочування важливі для забезпечення руху крові по капілярах, у процесі дихання та інших біологічних процесах.

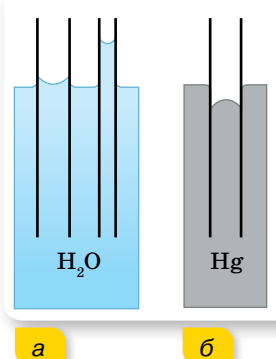
Капілярні явища. Явища змочування і незмочування чітко проявляються у вузьких трубках — капілярах. Оскільки крайовий кут утворюється і за вертикального положення твердої поверхні, це приводить до підняття змочувальної рідини або опускання незмочувальної біля країв посудини (мал. 126).

Якщо рідина змочує матеріал капіляра, то всередині його поверхня рідини — меніск — має увігнуту форму (мал. 127, а), а рівень рідини всередині капіляра — вище відкритої поверхні. Якщо рідина не змочує матеріал капіляра, то меніск має опуклу форму (мал. 127, б), а рівень рідини всередині капіляра — нижче відкритої поверхні.

Це пояснюється тим, що під увігнутим меніском змочуючої рідини тиск менший, ніж під плоскою поверхнею. Тому рідина в капілярі піднімається доти, поки гідростатичний тиск піднятої в капілярі рідини на рівні плоскої поверхні не компенсуватиме різницю тиску. Під опуклим меніском незмочувальної рідини тиск більший, ніж під плоскою поверхнею, що приводить до опускання рідини в капілярі. Додатковий тиск Δp ще називають лапласівським (на честь французького вченого П'єра Симона де Лапласа, що його досліджував).



Мал. 126. Підняття змочувальної рідини (а) й опускання незмочувальної (б)



Мал. 127.
а — підняття змочувальної і б — опускання незмочувальної рідини в капілярі

Установимо, як можна визначити висоту підняття рівня рідини в капілярі. Рідина піднімається доти, поки додатковий тиск не врівноважиться гідростатичним тиском стовпа рідин. Рівновага встановлюється за умови $\Delta p = \rho gh$. Для сферичного меніска $\Delta p = \frac{2\sigma}{R}$. Враховуючи, що радіус сферичної поверхні (меніска) R дорівнює внутрішньому радіусу капіляра r , маємо: $\frac{2\sigma}{r} = \rho gh$.

$$\text{Звідси } h = \frac{2\sigma}{\rho gr}.$$

Глибина опускання рівня незмочуючої рідини визначається тими самими формулами.

Капілярні явища мають велике значення в природі й техніці. Завдяки цим явищам відбувається проникнення вологи з ґрунту в стебла й листя рослин. Саме в капілярах відбуваються основні процеси, пов'язані з диханням і живленням організмів. У тілі кожної людини приблизно $160 \cdot 10^9$ капілярів, загальна довжина яких сягає 60 – 80 тис. км.

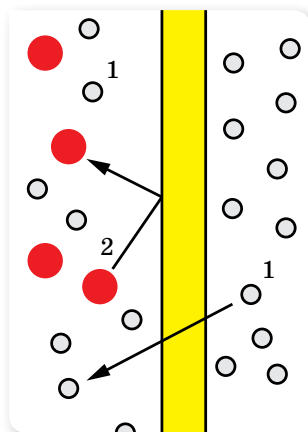
У будівництві враховують можливість підняття вологи по капілярних порах будівельних матеріалів. Для захисту фундаменту і стін від дії ґрунтових вод і вологи застосовують гідроізоляційні матеріали — толь, смоли тощо.

Завдяки капілярному підняттю вдається фарбувати тканини. Часто капілярні явища використовують і в побуті. Висушувальна дія рушників, серветок, гігроскопічної вати, марлі, промокального паперу ґрунтується на капілярних явищах.

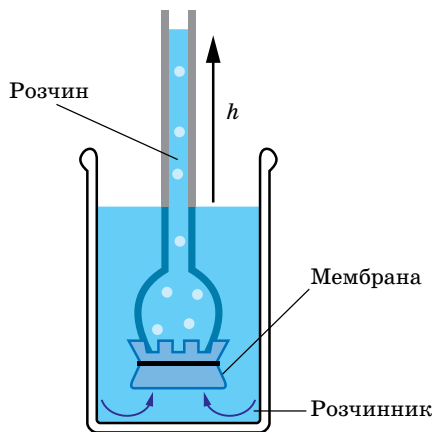
Осмотичний тиск. Якщо розчин (наприклад, цукру у воді) і розчинник (воду) розділити перетинкою, яка пропускає молекули води й не пропускає молекули цукру, то концентрація розчину вирівнюватиметься тільки внаслідок переміщення молекул води (мал. 128). Молекули води можуть рухатись із розчину в розчинник і в зворотному напрямку — з води в розчин. З більшою швидкістю відбувається дифузія в розчин, де концентрація води є меншою. Унаслідок цього об'єм розчину поступово зростає, а концентрація цукру в ньому зменшується. Сила, яка обумовлює рух розчинника через напівпроникну мембрану, називається **осмотичним тиском**.

Для визначення величини осмотичного тиску розглянемо дослід (мал. 129). Якщо розчин вмістити в посудину, яка вгорі переходить у вузьку вертикальну трубку, а знизу закрита напівпроникною мембраною, то внаслідок осмосу об'єм розчину збільшується. Але з підняттям рівня рідини в трубці виникне надлишковий тиск, що призводить до збільшення швидкості переміщення молекул води з розчину в розчинник, тобто протидіє осмосу. Коли гідростатичний тиск досягне певного значення, осмос припиниться, встановиться рівновага. Тиск стовпа й виражає величину осмотичного тиску.

Осмотичний тиск крові, лімфи і тканинної рідини має велике значення в регуляції обміну води між кров'ю і тканинами. Зміна осмотичного тиску рідини, що оточує клітини, веде до порушень водного обміну в них.



Мал. 128. Осмос



Мал. 129. До визначення осмотичного тиску



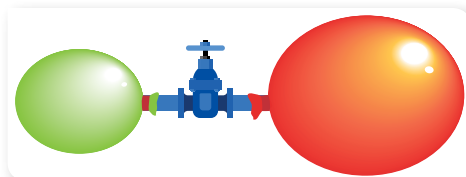
ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Розкрийте фізичну сутність явищ змочування та незмочування.
2. Чому плями жиру на одязі не вдається змити водою?
3. Поясніть, у якому випадку рідина в капілярі піднімається, а в якому — опускається.
4. Наведіть приклади врахування й використання капілярних явищ у повсякденному житті.



Експериментуємо

Дві повітряні кульки, надуті до різного розміру, надіто на трубку з краном (мал. 130). Чи будуть змінюватися розміри кульок, якщо відкрити кран? А якщо будуть змінюватися, то як саме?



Мал. 130

ВПРАВА 28

1. У капілярній трубці, радіус якої 0,5 мм, рідина піднялася на висоту 11 мм. Визначте густину цієї рідини, якщо її коефіцієнт поверхневого натягу становить $0,022 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.
2. Ртутний барометр має діаметр трубки 3 мм. Яку поправку в показання барометра треба внести, якщо врахувати капілярне опускання ртуті?

3. У двох капілярних трубках різного діаметра, занурених у воду, встановилася різниця рівнів 2,6 см. Коли ці самі трубки занурили в спирт, то різниця рівнів становила 1 см. Знаючи коефіцієнт поверхневого натягу води, визначте коефіцієнт поверхневого натягу спирту.
4. Вода піднімається в капілярній трубці на висоту 62 мм, а сірководень — на 21 мм. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу сірководню, якщо його густина $1260 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
Визначте також діаметр капілярної трубки.
5. У рідину, що добре змочує скло, вертикально опущені дві скляні трубки: одна діаметром 1 мм, друга діаметром 1,55 мм. Рідина піднялась в одній трубці вище, ніж у другій, на 5 мм. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу рідини, якщо її густина — $800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
6. У посудину з рідиною опущено капіляр, внутрішній радіус якого 2 мм. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу рідини, якщо маса рідини, що піднялась у капіляр, — 0,09 г.
7. При плавленні вертикально підвішеного свинцевого дроту діаметром $d = 1$ мм утворилось $n = 20$ крапель свинцю. Наскільки покоротшав дріт? Коефіцієнт поверхневого натягу рідкого свинцю $\sigma = 0,47 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, густина свинцю $\rho = 11,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
8. Яким має бути внутрішній діаметр капіляра, щоб у разі повного змочування вода в ньому піднімалась на 2 см? Задачу розв'яжіть для випадків, коли капіляр перебуває: а) на Землі; б) на Місяці.
9. Відкрити з обох кінців капілярну трубку радіусом 1 мм наповнено водою і встановлено вертикально. Якої висоти стовпчик води утримується в капілярі? Товщину стінок капіляра вважайте дуже малою.
10. Змочуваний водою кубик масою 20 г плаває на поверхні води. Ребро кубика має довжину 3 см. На якій відстані від поверхні води міститься нижня грань кубика? Коефіцієнт поверхневого натягу води — $0,073 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.
11. Який радіус поперечного перерізу повинен мати алюмінієвий дріт, щоб його шматок завдовжки 2 см, натертий парафіном, міг перебувати у воді у вертикальному положенні, занурившись рівно наполовину?

§ 32

Кристали й аморфні тверді тіла

Будова і властивості кристалічних тіл. Анізотропність. Твердими називають такі тіла, які зберігають власний об'єм і форму. Причиною такої стійкості є характер руху і взаємодії молекул: вони можуть лише коливатися навколо положення рівноваги, перейти в інше положення рівноваги молекула не може. Енергія й амплітуда коливань молекул тим більша, що вищою є температура тіла.

За впорядкованістю самих положень рівноваги тверді тіла поділяють на *кристалічні* й *аморфні* (мал. 131).

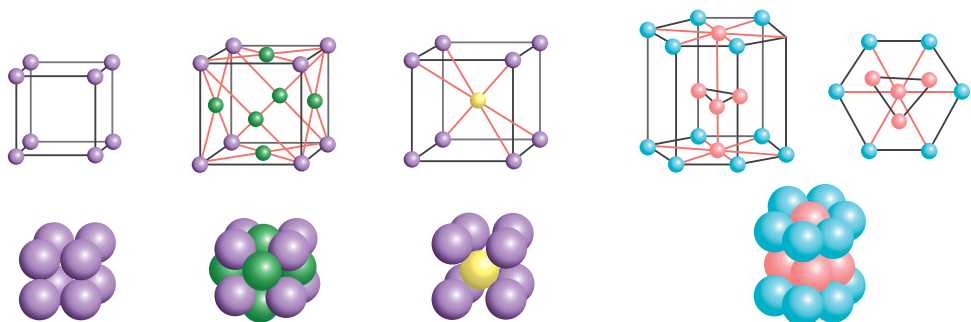
Кристали — це тверді тіла, у яких атоми або молекули розміщені впорядковано й утворюють періодично повторювану внутрішню структуру.

Періодична повторюваність структури зберігається в усіх напрямках у межах усього кристала. Говорять, що кристал має *далекий порядок* у розташуванні молекул. Можна виділити маленький об'єм (елементарну комірку), повторенням якої можна побудувати весь кристал, як будинок із цеглин. Іноді весь шматок твердої речовини являє собою один кристал. Такими є, наприклад, окремий шматочок цукру в цукровому піску, шматочок солі, гірського кришталю тощо. Такі кристалічні тіла називають *монокристалами*.

Елементарна комірка може мати форму куба, паралелепіпеда, призми тощо (мал. 132).



Мал. 131. а — кристал;
б — аморфне тіло



Мал. 132. Типи кристалічних ґраток

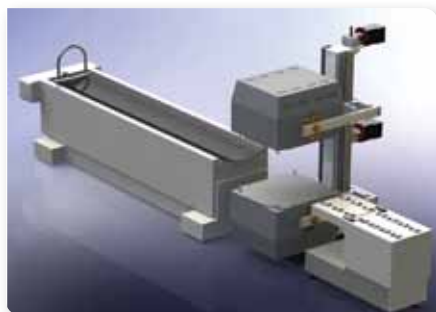
З такою будовою кристалічних тіл пов'язана **анізотропія** їхніх властивостей, тобто *неоднаковість фізичних властивостей у різних напрямках*.

Анізотропію виявляють механічні, теплові, електромагнітні й оптичні властивості кристалів, якщо за упорядкованого розміщення атомів, молекул або йонів сили взаємодії між ними й міжатомні відстані є неоднаковими в різних напрямках.

Утворення та використання кристалів. Кристали утворюються в природних умовах і штучно (мал. 133, с. 190). За припущеннями вчених, у природних умовах багато кристалів утворилося внаслідок охолодження рідкої речовини земної кори — магми, що є розплавом різних речовин. Багато мінералів виникли з перенасичених водних розчинів. Першим серед них необхідно назвати кам'яну сіль NaCl . Товщина пластів кам'яної



Мал. 133. Штучні кристали вітчизняного виробництва



Мал. 134. Вітчизняні медичні томографічні камери на основі сцинтиляційних детекторів власного виробництва

солі, що утворилися під час випаровування води солоних озер, досягає в деяких родовищах кількох сотень метрів.

Штучні кристали можна виростити з розплаву шляхом кристалізації, з розчину та газу. Останнім часом швидкими темпами розвивається технологія вирощування монокристалів усіма відомими способами на космічних орбітальних станціях. Невагомість і космічний вакуум дають змогу вирощувати монокристали небачених раніше розмірів і хімічної чистоти.

Монокристали знайшли широке застосування в сучасній фізиці й техніці. Усі напівпровідникові прилади (діоди, транзистори) є кристалами зі спеціально введеними домішками. Виникла нова галузь електроніки — молекулярна електроніка. Монокристали є основною деталлю таких сучасних приладів, як квантові підсилювачі та генератори (мазери й лазери).

В Україні (м. Харків) діє Науково-технологічний комплекс «Інститут монокристалів» Національної академії наук України, у структурі якого є один зі світових лідерів у виробництві сцинтиляційних продуктів та виробів з них, а також сучасної радіометричної та спектрометричної апаратури на їх основі, — Інститут сцинтиляційних матеріалів (ІСМА). Фахівці інституту вирощують гігантські монокристали, які вражають не тільки своїми габаритами (маса соляного велетня 504 кг), а й унікальними властивостями (мал. 133).

Технологія вирощування дозволяє контролювати у процесі росту різноманітні параметри цього кристалу, задаючи йому потрібну властивість. Після цього монокристал ріжуть на дрібніші частини. Розмір цих кристалів залежить від функціонального призначення детекторів, для яких їх виготовляють. Детектори з кристалічною начинкою

можна використовувати в усіх приладах, що працюють на основі радіоактивного випромінювання. За його допомогою кристал «бачить» живу картинку досяжної йому реальності й передає її на екран. Звідси фактично безмежна сфера використання цього продукту — атомна енергетика, геологія, комунальна галузь, медицина (мал. 134).

Сучасні технології, що запропоновані в ІСМА, дозволяють вирощувати найбільші й найдешевші сапфіри високої якості. Вони, без перебільшення, не горять у вогні й у воді не тонуть. Тобто не плавляться навіть у мартені, не розчиняються в кислоті, не руйнуються в епіцентрі ядерного вибуху. Справжню революцію сапфірові кристали спричинили в медицині, витіснивши металічні імпланти. Їх використовують скрізь, де потрібні замітники кісткової тканини, — у стоматології, ортопедії, пластиці хребта. Це стало можливим завдяки тому, що сапфір гармонійно приживається всередині організму, бо він не токсичний, не спричинює зміни функцій внутрішніх органів, не змінює характеристики білкового та жирового обміну. Тобто біоінертний і біосумісний. Сьогодні в ІСМА вже налагоджено дільницю з виробництва найрізноманітніших імплантатів, які повернули здоров'я тисячам пацієнтів як вітчизняних, так і зарубіжних клінік.

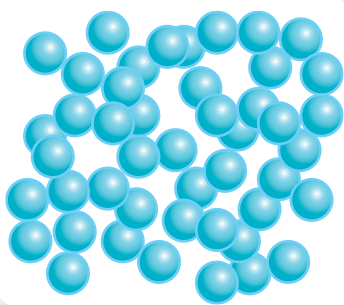
Будова та властивості аморфних тіл.

Ізотропність. Аморфні тіла за своєю будовою нагадують дуже густі рідини. В аморфних тілах існує лише *ближній порядок* у розташуванні частинок речовини (мал. 135). Прикладами аморфних тіл є шматки затверділої смоли, янтар, вироби зі скла.

Аморфні тіла, не маючи далекого порядку в структурі, значно відрізняються від кристалічних тіл своїми властивостями. Аморфні тіла *ізотропні*, тобто їх фізичні властивості однакові в усіх напрямках. Так, вони не мають певної температури плавлення й питомої теплоти плавлення, — з підвищенням температури вони поступово перетворюються на рідину. Аморфні тіла *пластичні*, тобто вони не відновлюють форму після припинення дії деформуючої сили.

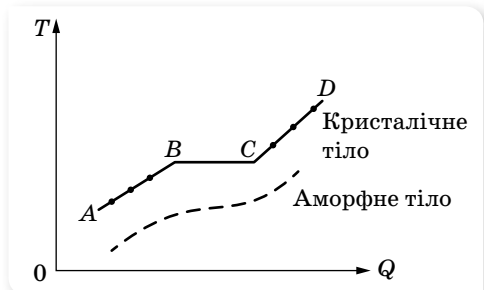
Аморфний стан нестійкий: через деякий час аморфна речовина переходить у кристалічний стан. Але часто цей час буває дуже тривалим (роки й десятиліття). До таких речовин належить скло. Будучи спочатку прозорим, протягом багатьох років воно мутніє: у ньому утворюються дрібні кристалики силікатів.

Плавлення кристалів та аморфних тіл. Значна відмінність кристалічних тіл від аморфних виявляється в процесах плавлення і тверднення. Досліди показують, що кристалічні тіла плавляться і тверднуть за певної для кожної речовини температури, яку називають *температурою плавлення*. Під час нагрівання кристалічного тіла інтенсивність коливального руху молекул у кристалі підвищується, а з досягненням температури



Мал. 135. Схема розташування молекул в аморфному тілі

плавлення коливання стають такими інтенсивними, що молекули (атоми) вже не можуть утриматися у вузлах ґратки, остання руйнується — відбувається плавлення. Для кожного кристалічного тіла температура плавлення своя.



Мал. 136. Графік залежності температури T кристалічного й аморфного тіл від наданої кількості теплоти Q

Графік залежності температури T кристалічного й аморфного тіл від наданої кількості теплоти зображено на малюнку 136. Ділянка AB графіка відповідає твердому стану кристалічної речовини й показує, що під час нагрівання температура кристалічного тіла змінюється.

Точка B відповідає температурі плавлення $T_{\text{пл}}$, з досягненням якої під час нагрівання кристалічне тіло плавиться. Ділянка BC графіка відповідає процесу плавлення кристалічного тіла, під час якого воно

існує частково в рідкому, частково у твердому стані. Температура кристалічного тіла при цьому не змінюється. Уся кількість теплоти витрачається тільки на збільшення потенціальної енергії молекул тіла, а їхня кінетична енергія не змінюється. Тому не змінюється і температура.

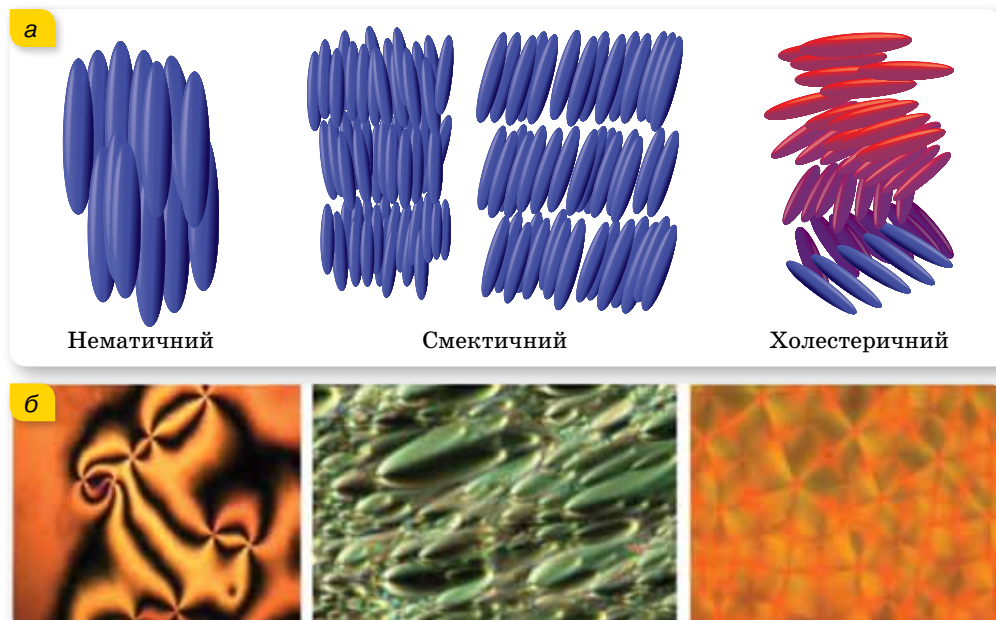
Збільшення потенціальної енергії молекул приводить до руйнування кристалічної ґратки тіла, тобто до зміни агрегатного стану речовини. Точка C відповідає повному переходу кристалічного тіла в рідину під час плавлення. Ділянка CD графіка відповідає рідкому стану речовини й показує, що під час нагрівання температура рідини змінюється.

Аморфні тіла не мають певної температури плавлення або тверднення. У процесі плавлення (або тверднення) температура аморфних тіл безперервно змінюється (мал. 136).

Рідкі кристали. Наприкінці XIX ст. були відкриті речовини, внутрішня структура яких у рідкому стані мала властивості, характерні як для рідин (велика текучість, здатність перебувати в краплеподібному стані, злиття краплин при зіткненні), так і для твердих тіл (анізотропія). Такий стан речовин було названо мезоморфним, що означає — стан із проміжною структурою, а самі речовини пізніше почали називати рідкими кристалами. Рідкі кристали довгий час не застосовувалися в техніці. Починаючи із середини 60-х років інтерес до рідких кристалів небувало зріс у зв'язку з успішним використанням їх в оптико- й мікроелектроніці, у різних індикаторних пристроях і т. д. За останні десятиліття було створено основи фізики рідких кристалів, одержано нові типи рідких кристалів, вивчено їхні властивості, які все ширше застосовуються в науці та техніці.

Молекули рідких кристалів мають витягнуту паличкоподібну форму. Саме така форма й визначає їх взаємне розташування всередині речовини — вони розташовані пліч-о-пліч одна до одної в певному порядку (мал. 137). Тому вони можуть рухатися лише вздовж своєї осі, повертати-

ся на певний кут, але при цьому не можуть змінити напрямок свого розташування (на відміну від молекул рідини, які можуть рухатися в усіх напрямках). Нині загальноприйнятою є класифікація рідких кристалів на три основні стани: нематичний, смектичний і холестеричний.



Мал. 13.7. Рідкі кристали: а — схематичне зображення розташування молекул; б — фото рідких кристалів

Ефективно використовуються рідкі кристали в медицині. Вони дуже чутливі до змін температури (десяті долі градуса) і при цьому змінюють своє забарвлення. Тому рідкі кристали дають змогу одержати картину розподілу температур на тілі людини, а отже, локалізувати запалення. Як системи відображення інформації, рідкі кристали використовують у наручних годинниках, вимірювальних приладах автомобілів. За допомогою рідких кристалів виявляють пари шкідливих хімічних сполук і небезпечні для здоров'я людини випромінювання.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим відрізняються кристалічні тіла від аморфних? Як візуально можна відрізнити кристал від аморфного тіла?
2. Що таке анізотропія; ізотропність?
3. Якщо тілу властива анізотропія, то чи означає це, що воно обов'язково кристалічне?
4. У чому полягає відмінність у процесах плавлення кристалічних та аморфних тіл?
5. Чим обумовлено широке використання рідких кристалів?

§ 33

Механічні й теплові властивості
твердих тіл

Механічна напруга. Механічні властивості матеріалів — це здатність матеріалів протистояти деформуванню та руйнуванню, пружно й пластично деформуватися під дією зовнішніх механічних сил.

Фізичною величиною, що характеризує дію внутрішніх сил, які виникають у деформованому тілі, є **механічна напруга** σ . Механічна напруга дорівнює відношенню модуля сили пружності $F_{\text{пр}}$ до площі S поперечного перерізу тіла:

$$\sigma = \frac{F_{\text{пр}}}{S}.$$

Вимірюється σ в ньютонках на метр у квадраті, або паскалях: $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па}$.

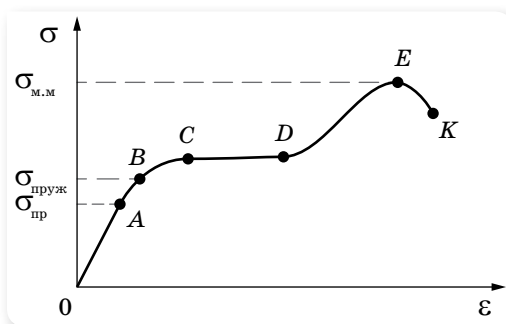
Величина, яка характеризує здатність матеріалів протидіяти деформації одностороннього розтягу (стиску), називається **модулем Юнга (модулем пружності)**.

Модуль Юнга, E дорівнює відношенню механічної напруги σ до відносного видовження ε , спричиненого цією напругою в напрямку її дії:

$$E = \frac{\sigma}{|\varepsilon|}.$$

Тут *відносне видовження* $|\varepsilon| = \frac{|\Delta l|}{l_0} = \frac{|l - l_0|}{l_0}$, де l_0 — початкова довжина стержня, l — довжина деформованого стержня.

Діаграма розтягу. На малюнку 138 показано залежність механічної напруги від відносного видовження під час розтягування.



Мал. 138. Діаграма розтягування

Ділянка OA відповідає пружній деформації — тіло повністю відновлює свої розміри після зняття зовнішнього навантаження. $\sigma_{\text{проп}}$ — межа пропорційності — максимальне значення механічної напруги, для якого виконується закон Гука.

Для деформації розтягу закон Гука можна сформулювати так: у межах пропорційності механічна напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню ε : $\sigma = E|\varepsilon|$.

На ділянці AB закон Гука не виконується, але деформація ще залишається пружною. Максимальна напруга, за якої ще не виникає помітна залишкова деформація, називається *межею пружності* $\sigma_{\text{пр}}$.

Якщо продовжувати розтягувати тіло, то в ньому виникає *залишкова деформація* (ділянка BC) — деформація, у результаті якої тіло залишається деформованим після припинення дії зовнішньої сили. Таку деформацію ще називають *пластичною*.

Подальше видовження тіла відбувається майже без збільшення напруги в ньому, тому кажуть, що «матеріал тече». Ділянка CD — текучість матеріалу.

Зі збільшенням деформації крива напруг починає трохи підніматися й досягає максимуму в точці E . Потім напруга швидко спадає, і тіло руйнується (точка K). Отже, розрив настає після того, як напруга досягне максимального значення $\sigma_{\text{м.м}}$, що називається *межею міцності*.

Дослідження поведінки тіла під зовнішніми механічними навантаженнями і їх діаграми розтягу досить важливі у практичному використанні матеріалів для різних цілей.

Модуль Юнга. Встановимо зв'язок між величинами, що входять до закону Гука, записаного у вигляді $F_{\text{пр}} = k|x|$ та $\sigma = E|\varepsilon|$.

Прирівняємо $\sigma = \frac{F_{\text{пр}}}{S}$ та $\sigma = E \left| \frac{\Delta l}{l_0} \right|$. Отримуємо: $\frac{F_{\text{пр}}}{S} = E \left| \frac{\Delta l}{l_0} \right|$, або

$$F_{\text{пр}} = \frac{ES}{l_0} |\Delta l|.$$

Ураховуючи, що $|x| = |\Delta l|$, легко бачити, що $k = \frac{ES}{l_0}$.

Модуль Юнга E , на відмінну від жорсткості тіла, не залежить від розмірів тіла, і його значення наведено в таблицях. Для сталі модуль Юнга приблизно дорівнює $2,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Чому приблизно? Та тому, що марок сталей дуже багато. Відповідно і модуль Юнга пружинної сталі більший за модуль Юнга сталі, з якої штампують цвяхи.

Свинець — м'який метал, але і він має пружність, а його модуль Юнга в 15 разів менший, ніж модуль Юнга сталі. Усі інші метали мають модуль Юнга більший, ніж у свинцю, але менший, ніж у сталі.

Іншою важливою характеристикою конструкційного матеріалу є межа міцності. Межа міцності в різних матеріалів також сильно відрізняється. У сталі межа міцності найбільша. Тому сталь — основний конструкційний матеріал. Під час проектування будь-яких конструкцій (мал. 139, с. 196)

ураховується межа міцності, і можливі напруги мають бути в кілька разів (зазвичай у 10 разів) меншими від межі міцності. Існує спеціальний розділ у прикладній науці — опір матеріалів. Його вивчають у всіх технічних вузах, що готують фахівців з конструювання та експлуатації машин і механізмів.



Мал. 139. Конструкції

Цікаво відзначити, що сталевий дріт, підвішений за один кінець, розтягується під дією власної ваги. Обрив від власної ваги відбудеться, якщо довжина сталевого дроту перевищуватиме 4,2 км. Дріт зі свинцю обірветься під дією власної ваги при довжині всього в 120 м. Усі машини та механічні конструкції — вежі, мости, аронні конструкції — розраховуються так, щоб напруги в жодному місці конструкції не перевищували межі пружності.

Теплове розширення твердих тіл. Як відомо, під час нагрівання збільшується швидкість теплового руху молекул і їхня середня кінетична енергія. Це приводить до збільшення середньої відстані між молекулами. Отже, речовини, нагріваючись, розширюються. Ступінь теплового розширення тіла залежить від речовини, з якої його виготовлено. Таким чином тіла, виготовлені з різних речовин, під час нагрівання на 1°C розширюються не однаково. Існують фізичні величини, які характеризують об'ємне та лінійне розширення тіл. Так, якщо за початкової температури t_0 об'єм тіла — V_0 , то внаслідок нагрівання до температури t об'єм тіла збільшується до V . Тобто зі зміною температури на $\Delta t = t - t_0$ об'єм тіла змінюється на $\Delta V = V - V_0$. Відношення ΔV тіла до його початкового об'єму V_0 прямо пропорційне зміні температури Δt : $\frac{\Delta V}{V_0} \sim \Delta t$. Щоб про-

порційний вираз став рівністю, потрібно ввести коефіцієнт пропорційності b , який називають коефіцієнтом об'ємного розширення: $\frac{\Delta V}{V_0} = b\Delta t$.

Коефіцієнт об'ємного розширення b показує зміну об'єму тіла внаслідок зміни його температури на 1°C , за умови, що початковий об'єм тіла становив 1 м^3 .

Аналогічні міркування застосовують щодо лінійного розширення тіл, яке притаманне лише твердим тілам й означає зміну довжини тіла: $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha\Delta t$, де α — коефіцієнт лінійного розширення.

Коефіцієнт лінійного розширення α показує зміну довжини тіла внаслідок зміни його температури на 1°C , за умови, що початкова довжина тіла становила 1 м .

Коефіцієнти об'ємного та лінійного розширення вимірюються в однакових одиницях $1\frac{1}{^\circ\text{C}}$. Для аморфних тіл і кристалів кубічної форми справджується рівність $b = 3\alpha$.

Наприклад, коефіцієнт лінійного розширення сталі становить $0,000012\frac{1}{^\circ\text{C}}$. Це означає, що нагрівання сталевого стержня завдовжки 1 м на 1°C спричинить його видовження на $0,000012\text{ м}$. Тобто внаслідок такого нагрівання довжина стержня стане $1,000012\text{ м}$. На перший погляд здається, що таке незначне видовження особливо ні на що не впливає. Однак якщо інженери та будівельники не врахують теплового розширення, то будівлі, мости, лінії електропередач, колії залізниці зазнають руйнування (мал. 140).



Мал. 140. Теплове розширення конструкцій



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Як досліджують матеріал на розтяг? Як оцінюють значення навантаження та деформації зразка під час дослідження на розтяг?
2. З якою метою використовують діаграму розтягу матеріалу?
3. У чому відмінність крихких матеріалів від пластичних?

- Чому розрахунок на міцність проводять за допустимими напруженнями, а не за межею міцності?
- Від чого, окрім температури, залежить зміна розмірів тіл під час їхнього нагрівання або охолодження?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Довжина сталевого дроту площею поперечного перерізу 3 мм^2 під дією сили $4 \cdot 10^4 \text{ Н}$ становить 2 м . Визначте абсолютне видовження дроту при збільшенні сили розтягування на 10^4 Н .

Дано:

$$S = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$l_1 = 2 \text{ м}$$

$$F = 4 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\Delta F = 10^4 \text{ Н}$$

$$\Delta l_2 = ?$$

Розв'язання:

Модуль Юнга для сталі визначаємо за таблицею (див. форзаці), $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

Визначимо початкову довжину дроту l_0 .

Прирівнюючи праві частини формул: $\sigma = \frac{F}{S}$,

$$\sigma = E \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \text{ визначаємо } l_0 = \frac{SEl_1}{F + SE}.$$

$$\text{Для більшої розтягуючої сили } \frac{F + \Delta F}{S} = E \frac{\Delta l_2}{l_0}, \text{ звідки } \Delta l_2 = \frac{(F + \Delta F)l_0}{SE}.$$

$$\text{Підставляючи вираз для } l_0, \text{ отримуємо: } \Delta l_2 = \frac{(F + \Delta F)l_1}{F + SE}.$$

$$\text{Обчислення: } \Delta l_2 = \frac{(4 \cdot 10^4 \text{ Н} + 10^4 \text{ Н}) \cdot 2 \text{ м}}{4 \cdot 10^4 \text{ Н} + 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}} \approx 0,16 \text{ м}.$$

Відповідь: $\approx 0,16 \text{ м}$.

Задача 2. На скільки збільшиться об'єм цільного залізного куба, якщо надати йому $296,4 \text{ кДж}$ енергії у вигляді теплоти?

Дано:

$$\Delta Q = 296,4 \text{ Дж}$$

$$c = 460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

$$\Delta V = ?$$

Розв'язання:

Зміну об'єму залізного куба визначаємо з формули: $\Delta V = V_0 b \Delta T$.

Зміну температури ΔT визначаємо з формули для кількості теплоти, яку отримало тіло:

$$\Delta Q = cm\Delta T = c\rho V_0 \Delta T, \text{ звідки } \Delta T = \frac{\Delta Q}{c\rho V_0}.$$

Підставляючи одержане значення ΔT у вираз для ΔV і враховуючи,

$$\text{що } b \approx 3\alpha, \text{ маємо: } \Delta V = \frac{b}{c\rho} \Delta Q = \frac{3\alpha}{c\rho} \Delta Q.$$

Підставляючи числові значення, знаходимо:

$$\Delta V = \frac{3 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \cdot 2,96 \cdot 10^5 \text{ Дж}}{460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Відповідь: $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

ВПРАВА 29

1. Два дроти, діаметри яких відрізняються в три рази, розтягують однаковими силами. Порівняйте напруги, які виникають у дротах.
2. Балка завдовжки 5 м та площею поперечного перерізу 100 см^2 під дією сил по 10 кН , прикладених до її кінців, стиснулася на 1 см. Визначте відносне стиснення та механічну напругу в балці.
3. Визначте напругу, яка виникає в сталевому тросі, відносно видовження якого дорівнює 0,001.
4. У скільки разів абсолютне видовження мідного дроту більше, ніж сталевого (такої самої довжини й такого самого поперечного перерізу), коли на них діють однакові розтягуючі сили?
5. Які сили треба прикласти до кінців сталевого дроту завдовжки 4 м з поперечним перерізом $0,5 \text{ мм}^2$, щоб видовжити його на 2 мм?
6. У скільки разів відносно видовження риболовної жилки діаметром 0,2 мм більше, ніж жилки діаметром 0,4 мм, якщо до їх кінців прикласти однакову силу?
7. До дроту було причеплено вантаж. Потім дріт зігнули навпіл і причепили той самий вантаж. Порівняйте абсолютне та відносне видовження дроту в обох випадках.
8. Довжина газопроводу Новопсков — Ужгород становить близько 1500 км. На скільки довшим став би газопровід за сезонних змін температури повітря від -30 до $+30$ °C, за умови, що сталеві труби газопроводу прокладено не в ґрунті, а в повітрі?
9. Залізнична цистерна вміщує 90 м^3 бензину. Якою буде різниця в об'ємі бензину, якщо його залили в Одесі за температури 10 °C, а розвантажили в Рівному за температури 0 °C?
10. На скільки °C потрібно нагріти воду в чайнику, щоб її об'єм збільшився з 1 л до $1,02$ л?
11. Годинник з металевим маятником поспішає на 8 с за добу за температури 3 °C і відстає на 7 с протягом доби за температури 23 °C. Визначте середній коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу маятника та температуру, за якої годинник буде йти правильно.
12. Обчисліть у відсотках, яка кількість бензину виллється з повного бензобака автомобіля, якщо він нагріється від 25 до 50 °C.

§ 34 Діаграма стану речовини

Фазові переходи речовини з погляду молекулярно-кінетичної теорії.

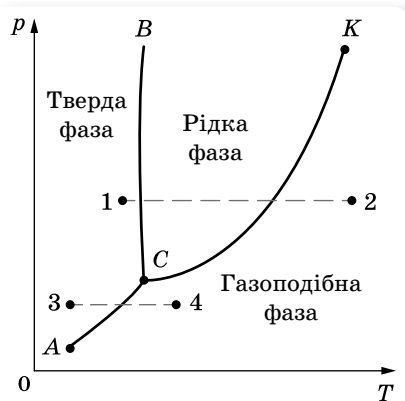
Агрегатний стан речовини з точки зору молекулярно-кінетичної теорії речовини визначається співвідношенням між складовими повної (внутрішньої) енергії: середньою потенціальною енергією взаємодії молекул та їхньою середньою кінетичною енергією. Нагрівання речовини супроводжується не просто зміною її внутрішньої енергії, а змінює співвідношення між її складовими. Допоки кількісне співвідношення між середньою кінетичною енергією руху молекул і середньою потенціальною енергією їх взаємодії залишається у визначених межах, підведення тепла до речовини не змінює її фазового стану. З подальшим нагріванням збіль-

шується середня кінетична енергія руху молекул і відповідно відстані між ними, що приводить до зменшення потенціальної енергії взаємодії. З досягненням певної температури створюються умови, коли кількісні співвідношення між складовими внутрішньої енергії вже не задовольняють умовам рівноважного стану, і речовина переходить у нову фазу. Для цієї фази кількісні співвідношення між складовими внутрішньої енергії вже будуть іншими. При цьому рівновага між фазами є динамічною: у результаті безперервного хаотичного руху молекул відбувається їх обмін. А саме, відомі вам фазові переходи: рідина $\leftrightarrow$ пара, тверде тіло $\leftrightarrow$ рідина, тверде тіло $\leftrightarrow$ пара.

Фазові переходи в термодинаміці. Кожний з однорідних станів речовини — твердий, рідкий та газоподібний — у термодинаміці повністю описується макропараметрами: тиском, температурою та об'ємом за відповідної маси. Як свідчать експериментальні дослідження, ці параметри не можуть змінюватись довільно. Зміна одного з них спричинює відповідну зміну інших параметрів.

В аналітичному вигляді залежність між макропараметрами встановлено лише для газів.

Проте в термодинаміці доведено, що рівновага між двома фазами описується функціональною залежністю між тиском і температурою. Кожному фазовому переходу (рідина $\leftrightarrow$ пара, тверде тіло $\leftrightarrow$ рідина, тверде тіло $\leftrightarrow$ пара) відповідає своя функціональна залежність, яка для кожної речовини визначається експериментальним шляхом. Якщо ці залежності графічно зобразити в координатах T, p , отримаємо відповідні три криві: випаровування, плавлення та сублімації (мал. 141).



Мал. 141. Діаграма стану речовини

Лінії фазової рівноваги між твердою, рідкою та газоподібною фазами називають *лініями фазових переходів*, а отриману діаграму — *діаграмою стану речовини* (або *фазовою діаграмою*).

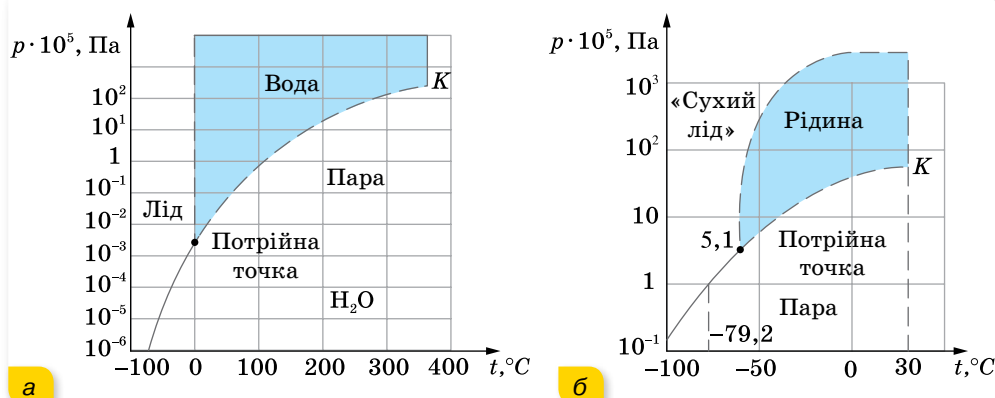
На діаграмі крива CK — це вже відома вам залежність тиску насиченої пари від температури, де K — критична точка, вище якої крива не може підніматися. Крива CK називається кривою випаровування. Крива BC — це крива плавлення, а крива AC — крива сублімації. Ці криві розбивають координатну площину на відповідні області: твердої, рідкої та газоподібної фази.

Будь-яка точка на кривих CK, BC, AC визначає динамічну рівновагу двох фаз, за якої з однієї фази в іншу переходить однакова кількість молекул. Будь-яка точка області відповідає однофазному стану речовини. Точці C відповідають єдині для певної речовини пара значень p і T , за

яких усі три фази речовини можуть перебувати в рівновазі. Цю точку називають *потрійною*.

Діаграма стану дає змогу визначити, які переходи буде зазнавати речовина в певних процесах. Наприклад, якщо взяти речовину в стані, що відповідає точці 1, та ізобарно нагрівати цю речовину, то вона буде зазнавати таких переходів: тверде тіло — рідина — пара (штрихова лінія 1–2 на діаграмі). Якщо ж узяти ту саму речовину, але у стані, що відповідає точці 3, і знову ізобарно нагрівати речовину, то вона зазнає іншого переходу: з твердого стану в газоподібний, без рідкої фази (штрихова лінія 3–4 на діаграмі).

Для прикладу розглянемо діаграми стану води (мал. 142, а) та вуглекислоти (мал. 142, б). Для води у потрійній точці тиск $p = 610$ Па, а температура $T = 0$ °С. Тому за нормального атмосферного тиску (близько 10^5 Па) перехід із твердої фази в газоподібну відбувається через рідку.



Мал. 142. Діаграма стану води (а) та вуглекислоти (б)

Для вуглекислоти значення тиску в потрійній точці $p = 5,1 \cdot 10^5$ Па, тому за атмосферного тиску для неї можливий перехід тверде тіло — газ. Вуглекислоту у твердому стані називають «сухим льодом» (за схожість її зовнішнього вигляду із звичайним льодом (мал. 143)).



Мал. 143. «Сухий лід»



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У якій точці закінчується крива випаровування на діаграмі p, T ?
2. У якій точці закінчується крива сублімації?
3. Чому «сухий лід» не плавиться за нормальних умов?

ВПРАВА 30

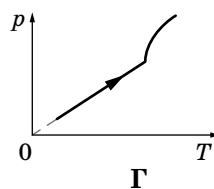
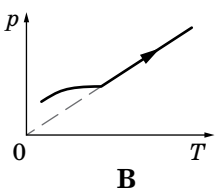
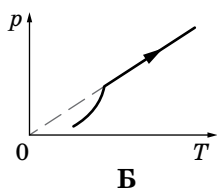
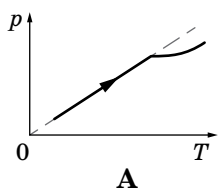
1. Сталеву деталь, розігріту до температури 800°C , загартовують, опускаючи в моторну оливу за температури 10°C . Олива при цьому нагрівається до температури 40°C . Визначте масу сталеві деталі, якщо після занурення її в оливу вона охолола на 20°C . Маса моторної оливи — 2 кг , її питома теплоємність — $1,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.
2. У скляну посудину, масою 120 г і температурою 20°C , налили гарячу воду, маса якої 200 г і температура 100°C . Через 5 хв температура посудини з водою стала дорівнювати 40°C . Яка кількість теплоти втрачається за одиницю часу? Процес втрати тепла вважайте сталим. Питома теплоємність посудини — $840 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.
3. У залізному калориметрі масою $0,1\text{ кг}$ є $0,5\text{ кг}$ води за температури 15°C . У калориметр кладуть свинець й алюміній загальною масою $0,15\text{ кг}$ за температури 100°C . Унаслідок цього температура води піднімається до 17°C . Визначте маси свинцю й алюмінію.
4. Кризь воду, що має температуру 10°C , пропускають водяну пару температурою 100°C . Скільки відсотків становить маса води, яка утворилася з пари, від маси усієї води в посудині в момент, коли її температура дорівнює 50°C ?
5. Водяну стоградусну пару впустили в калориметр, де міститься шматок льоду, маса якого 5 кг , а температура -50°C . Визначте масу впущеної пари, якщо шматок льоду розплавився.
6. У суміш, що складається з 20 л води і 10 кг льоду за температури 0°C , вливають свинець за температури плавлення. Уся суміш набуває температури 100°C і 200 г води при цьому перетворюється в пару. Визначте, скільки було влито свинцю.
7. У теплоізолюваній посудині міститься 500 г води і $54,4\text{ г}$ льоду за температури 0°C . У посудину подають суху насичену пару масою $6,6\text{ г}$ за температури 100°C . Якою буде температура після встановлення теплової рівноваги?
8. У посудину з водою за температури 20°C вмістили 100 г льоду за температури -8°C . Яка температура встановиться в посудині? Теплоємність посудини з водою — $1,67 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}$.
9. Розжарений алюмінієвий куб кладуть на лід, температура якого -20°C , при цьому куб повністю заглиблюється в лід. Визначте початкову температуру куба. Зміною об'єму куба внаслідок його охолодження знехтуйте.



Перевірте себе (§ 27–34)



1. Який графік залежності тиску від температури всередині герметичної посудини, у якій міститься краплина води та насичена пара відповідає процесу її нагрівання? Після випаровування краплини нагрівання продовжують.



2. На яку висоту піднімається спирт за $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ у скляній капілярній трубці, внутрішній діаметр якої $0,55\text{ мм}$? Змочування вважаєте повним.

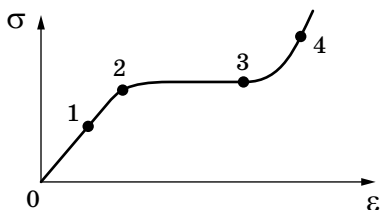
А $0,25\text{ см}$

В 1 см

Б $0,5\text{ см}$

Г 2 см

3. На графіку залежності механічної напруги від відносного видовження вкажіть точку, що відповідає межі пропорційності.



А 1

В 3

Б 2

Г 4

4. За температури $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ довжина алюмінієвого дроту становила 2000 м . Визначте довжину дроту за температури $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

А $2004,8\text{ м}$

В $2009,6\text{ м}$

Б $1990,4\text{ м}$

Г $2008,5\text{ м}$

5. Відносна вологість повітря ввечері за температури $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює 69% . Визначте температуру (у градусах Цельсія), за якої вночі почне випадати роса.

6. У посудині лежить шматок льоду. Температура льоду $t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо надати йому кількість теплоти $Q = 50\text{ кДж}$, то $\frac{3}{4}$ льоду розтане. Яку кількість теплоти q потрібно після цього надати вмісту посудини додатково, щоб увесь лід розтанув й утворена вода нагрілася до температури $t_2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$? Тепловими втратами на нагрівання посудини знехтуйте.



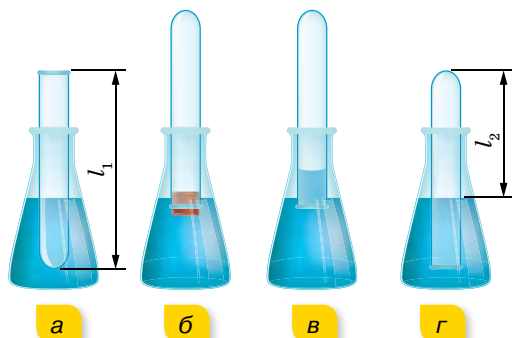
ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОПРОЦЕСУ

Прилади та матеріали: скляний циліндр висотою 60 см і діаметром 40–50 мм; скляна трубка довжиною 60 см і діаметром 8–10 мм, закрита з одного кінця; лінійка; склянка; пластилін; холодна й гаряча вода; термометр.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Скляну трубку опустіть відкритим кінцем догори на 3–5 хв у циліндричну посудину з гарячою водою (мал. 144, а). Виміряйте довжину скляної трубки l_1 і температуру води T_1 у циліндричній посудині. У цьому випадку об'єм повітря V_1 дорівнює об'єму скляної трубки, а температура повітря — температурі гарячої води.



Мал. 144

2. Щоб під час зміни фізичних властивостей повітря його кількість не змінилась, відкритий кінець скляної трубки, що міститься в гарячій воді, закрийте пластиліном. Опустіть у склянку з водою кімнатної температури (мал. 144, б) трубку закритим кінцем униз і зніміть під водою пластилін (мал. 144, в). Щоб тиск повітря в трубці знову дорівнював атмосферному, потрібно збільшувати глибину занурення трубки в склянку доти, поки рівні води в трубці та склянці не будуть збігатися (мал. 144, г). Виміряйте довжину l_2 повітряного стовпа в трубці й температуру навколишнього повітря T_2 , результати вимірювань запишіть у таблицю.
3. Обчисліть відношення $\frac{l_1}{l_2}$ і $\frac{T_1}{T_2}$.

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ ТІЛА

Прилади та матеріали: металеве тіло; калориметр; мензурка; термометр; посудина з водою; електроплитка; терези навчальні з набором важків.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Визначте за допомогою терезів масу металевого тіла m_2 . Опустіть тіло в посудину з киплячою водою.

2. Налийте в калориметр 100 см^3 води за кімнатної температури. Виміряйте початкову температуру води і калориметра t_1 °С. Опустіть у калориметр тіло, нагріте до температури 100 °С, і визначте температуру t_c °С в калориметрі після встановлення теплової рівноваги.
3. Змініть воду в калориметрі й повторіть вимірювання.
4. Скориставшись рівнянням теплового балансу, обчисліть питому теплоємність тіла:

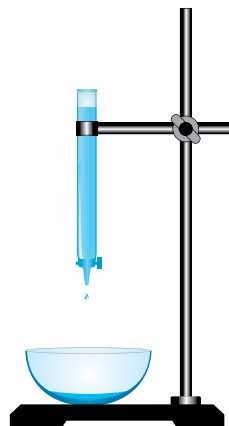
$$c = \frac{(C_k + m_1 c)(t_c - t_1)}{m_2(t_2 - t_c)}$$
, де C_k — теплоємність алюмінієвого калориметра, m_1 — маса води в калориметрі, m_2 — маса тіла, c — питома теплоємність води.

ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ

Прилади та матеріали: бюретка звичайна з краном; лійка хімічна; терези навчальні з набором важків; посудина з дистильованою водою; штангенциркуль; склянка.

Вказівки щодо виконання роботи

1. За допомогою штангенциркуля виміряйте діаметр отвору бюретки.
2. Підставивши під отвір бюретки посудину з водою і поступово відкриваючи кран, доможіться повільного відривання крапель від бюретки, щоб краплі падали одна за одною через 1–2 с.
3. Зважте порожню склянку з точністю до десятих часток грама. Поставте її під краплі, що рівномірно падають, і відррахуйте 50–100 крапель.
4. Зважте склянку знову й визначте масу води.
5. Повторіть дослід для інших кількостей крапель, визначаючи щоразу їхню масу.
6. Користуючись даними та формулою $\sigma = \frac{mg}{n\pi d}$, визначте поверхневий натяг для кожного окремого вимірювання. Знайдіть середнє значення σ_c .



ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ГУМИ

Прилади та матеріали: гумовий шнур з гачком; штатив; набір важків; лінійка; штангенциркуль.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Олівцем (або ручкою) нанесіть на гумовий шнур дві мітки. Лінійкою виміряйте відстань (l_0) між мітками.
2. До нижнього кінця шнура підвісьте два важки. Виміряйте відстань (l) між мітками на розтягнутому шнурі.
3. Якщо шнур має круглий переріз, то виміряйте діаметр шнура (D) штангенциркулем. Якщо шнур має прямокутний переріз, то виміряйте лінійкою довжину (a) і штангенциркулем ширину (b) прямокутного перерізу шнура в розтягнутому стані.
4. Модуль Юнга обчисліть за допомогою розрахункової формули: для шнура, що має круглий переріз: $E = \frac{4Fl_0}{\pi D^2(l - l_0)}$; для шнура, що має прямокутний переріз: $E = \frac{Fl_0}{ab(l - l_0)}$.

Відповіді до вправ

Вправа 1

3. 4 м, 2 м. **4.** т. А (20 м, 20 м); т. В (60 м, -10 м); 0 м; -30 м; 50 м. **5.** 5 м, 4 м, -3 м. **6.** 5 м.

Вправа 2

2. 30 с; 150 м; 60 м.

Вправа 3

1. 14 м/с. **2.** 40 с. **3.** $y \frac{n+1}{n-1}$ раз; у 3 рази; у 1,2 раза. **4.** 71° . **5.** а) 20 м/с, 90 с; б) 20 с, 30 с.

Вправа 4

1. 54 км/год, 36 км/год. **3.** 25 км/год. **4.** 3 м/с. **5.** 7 м/с. **6.** 7,5 м/с.

Вправа 5

1. 2 м/с, 8 м/с. **2.** 90 см. **3.** $y \sqrt{2}$ раза. **4.** $a = 10 \text{ м/с}^2$; $v_4 = 40 \text{ м/с}$; $v_{10} = 100 \text{ м/с}$; $s_4 = 15 \text{ м}$; $s_5 = 45 \text{ м}$; $s_2 + s_3 = 40 \text{ м}$. **5.** $a = \frac{2(n-1)s}{(n+1)t^2} = 0,24 \text{ м/с}^2$. **6.** $(2 + \sqrt{2})t_0$.
7. а) $v_{1x} = 10 + 0,8t$ — прискорений; б) $v_{2x} = 2 - 2t$ — сповільнений, через 1 с прискорений; в) $v_{3x} = -4 + 4t$ — сповільнений, через 1 с прискорений; г) $v_{4x} = -1 - 12t$ — прискорений.
8. 8 м/с, 0,8 м/с², -1,6 м/с², 15 с, 4 м/с. **9.** 2,6 м/с. **10.** $v_{1x} = 1,25t$; $v_{2x} = 5 + 5t$; $v_{3x} = 20 - 4t$; $x_1 = 0,625t^2$; $x_2 = 5t = 2,5t^2$; $x_3 = 20t - 2t^2$. **11.** —. **12.** 10 с; 40 м; 45 м; 120 м.

Вправа 6

1. 50 с. **2.** зменшується у 2 рази. **3.** 1: 20. **4.** 1 км/с². **5.** а) 1: 2; б) 2: 1).

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Б. **2.** А. **3.** Г. **4.** Б. **5.** 3 м/с². **6.** 1,8 м.

Вправа 7

1. 0,02 Н. **2.** $2,1 \cdot 10^4 \text{ Н}$; 0,82 м. **3.** $2 \cdot 10^2 \text{ Н}$. **4.** $m_3 > m_2 > m_1$. **6.** 64 Н.

Вправа 8

1. 3,8 м/с². **2.** 4,4 м/с². **3.** У точці, віддаленій на 6 земних радіусів від центра Місяця.

4. $g = \frac{4}{3} \pi G \rho R = 8,8 \text{ м/с}^2$. **5.** $5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. **6.** $h = 2,16 R$.

Вправа 9

1. 0,45 с; 0,05 с; 24 м/с. **2.** 28 м. **3.** 35 м. **4.** $\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{v_1 + v_2 + \sqrt{v_1^2 + 2gh} - \sqrt{v_2^2 + 2gh}}{g}$.

5. 20 м. **6.** 10, 13 м.

Вправа 10

1. 6 см. **2.** 35 кН. **3.** 0,04. **4.** $\approx 800 \text{ кг}$. **5.** $x = \frac{m}{k\rho_1} (\rho_1 g + \rho_1 a - \rho_2 g)$. **6.** 220 Н; 20 Н.
7. 3,92 м/с². **8.** 15 кН. **9.** 1,5 Н. **10.** 0,2. **11.** 2 м/с², 2,4 Н. **12.** 720 Н; 480 Н; 480 Н; 720 Н.
13. У 0,0034 раза; 1 год 25 хв.

Вправа 11

1. 490 Н, 294 Н. **2.** На відстані 0,2 м від середини дошки ближче до хлопчика. **3.** 3 кН; 1,6 кН.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Б. **2.** Б. **3.** А. **4.** А. **5.** 2 м/с². **6.** 300 Н/м.

Вправа 12

1. 16 (кг · м)/с; 48 (кг · м)/с. **2.** 2 (кг · м)/с. **3.** 1 м/с в напрямку руху більшого тіла. **4.** на 0,04 м/с. **5.** а) 3 м/с; б) -0,5 м/с.

Вправа 13

1. 1,4 кДж. **2.** 60 м. **3.** 12 кДж; 66 %. **4.** 5085 Дж. **5.** 9,8 Дж.

Вправа 14

1. 47 кДж. **2.** 26 кДж. **3.** 700 кДж. **4.** 0,3 Дж.

Вправа 15

1. $4 \cdot 10^{10}$ Дж. 2. 200 кДж; 1000 кг. 3. -200 кДж. 4. 240 кДж; -30 кДж; 210 кДж. 5. 0,2 м.

Вправа 16

1. 0,714 · с. 2. $1,3 \cdot c$; $0,93 \cdot c$. 3. 0,994 · с. 4. 0,662 · с. 5. $2,6 \cdot 10^8$ м/с. 6. У 7,1 раза.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Б. 2. В. 3. Б. 4. В. 5. 2 м/с. 6. 1,5 м/с.

Вправа 17

1. $5 \cdot 10^{12}$. 2. $1,2 \cdot 10^{20}$. 3. $1,1 \cdot 10^{22}$; $3 \cdot 10^{23}$; $1,9 \cdot 10^{23}$. 4. 0,89; 1,56. 5. $4,66 \cdot 10^{-26}$ кг; $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг; $3 \cdot 10^{-26}$ кг. 6. $\frac{N_A}{M}$; $\frac{N_A \rho}{M}$; $\frac{N_A m}{M}$; $\frac{N_A \rho V}{M}$.

Вправа 18

1. 0,11 МПа. 2. 710 м/с. 3. $2,3 \cdot 10^{25}$ м⁻³. 4. 10^{-21} Дж. 5. Збільшиться на 44 %.

Вправа 19

1. 774 К. 2. На 10 %. 3. У 4 рази. 4. На 183 К. 5. 9,8 кПа.

Вправа 20

1. 0,5 кг/м³. 2. 8,2 МПа. 3. 0,058 кг/моль. 4. 4 моль. 5. 9,5 л. 6. $3,2 \cdot 10^{21}$ м⁻³. 7. $1,5 \cdot 10^5$ Па.

Вправа 21

1. 100 кПа. 2. 90 мл. 3. 7 л. 4. 0,92 л. 6. 127 °С. 7. 85 кг. 8. $r = \sqrt[3]{\frac{3(p_0 + \rho g H)V}{4\pi(p_0 + \rho g h)}}$. 9. 12,3 см.

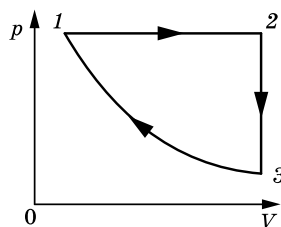
ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Г. 2. В. 3. А. 4. Г.

Вправа 22

1. 9 МДж. 2. Зменшилась у 3 рази. 3. Збільшилась у 2 рази. 4. $p = \frac{2U}{3V} = 100$ кПа. 5. 200 кДж. 6. 18600 Дж.

8. Див. мал. 145. 9. Оскільки робота в циклі визначається площею фігури, яка зображує цикл у координатах p, V , то з малюнка до умови задачі видно, що в циклі 3→2→4→3 газ виконує більшу роботу.



Мал. 145

Вправа 23

1. 0,6; 0,4. 2. $A = 8,1$ кДж; $\Delta W = 20,2$ кДж; $Q = 28,3$ кДж. 3. 200 Дж. 4. а) $Q = 1,55$ кДж, $A = 0,92$ кДж, $\Delta W = 0,63$ кДж; б) $Q = 1,88$ кДж, $A = 1,25$ кДж, $\Delta W = 0,63$ кДж. 5. 0,5 кг. 6. 6,3 см.

Вправа 24

1. 23 %; 46 кДж; 14 кВт. 2. 30 %; 400 К. 3. 25 %, $1,2 \cdot 10^6$ Дж. 4. 75 %. 6. $n = 2$.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. А. 2. Г. 3. Б. 4. В. 5. $4,67 \cdot 10^5$ Дж. 6. Збільшилась на 24 К.

Вправа 25

4. 37 °С. 5. 78,5 кДж. 6. 26 МДж. 7. 2,72 МДж. 8. $c = 500$ Дж/(кг · °С) — сталь.

Вправа 26

2. Насичена. 3. 2,6 мг. 4. При 40 °С — у 4,34 раза більше. 5. 59 %. 6. Збільшиться на 19 %. 7. Не випаде. 8. 75 %.

Вправа 27

1. 1,6 мДж. 2. Зменшиться в 1,2 раза. 3. 0,032 Н/м.

Вправа 28

1. 820 кг/м³. 2. 5,1 мм. 3. 22 мН/м. 4. 0,031 Н/м; 0,29 мм. 5. 0,029 Н/м. 6. 0,07 Н/м. 7. 34 см. 8. а) 1,5 мм; б) 8,8 мм. 9. 3 см. 10. 0,023 м. 11. 0,34 мм.

Вправа 29

1. У дротині більшого діаметра — у 9 разів менший. 2. -0,002; 1 МПа. 3. 200 МПа. 4. В 1,67 раза. 5. 50 Н. 6. У 4 рази. 7. Абсолютне видовження зменшилось у 4 рази, а відносне — у 2 рази.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Б. 2. Г. 3. А. 4. —. 5. 10 °С. 6. 33,6 кДж.

Предметний покажчик

- Абсолютно тверде тіло 72
 Адіабатний процес 156
 Анізотропія 189
 Вага тіла 61
 Відносність руху 22
 Відносність одночасності 102
 Відносність інтервалів часу 103
 Відносність довжин 104
 Вологість повітря 178
 Енергія внутрішня 148
 Енергія кінетична 95
 Енергія потенціальна 90, 92
 Ентропія 162
 Закон Авогадро 139
 Закон Бойля — Маріотта 141
 Закон всесвітнього тяжіння 50
 Закон Гей-Люссака 142
 Закон Гука 59, 195
 Закон Дальтона 130
 Закон додавання переміщень 23
 Закон додавання швидкостей (класичний) 23
 Закон додавання швидкостей (релятивістський) 106
 Закон збереження енергії 95
 Закон збереження імпульсу 84
 Закони Ньютона
 ► перший 47
 ► другий 47
 ► третій 48
 Закон термодинаміки (другий) 161
 Закон термодинаміки (перший) 155
 Закон Шарля 143
 Замкнена (ізолювана) система 83
 Ідеальний газ 125
 Ізотропність 191
 Імпульс сили 82
 Імпульс тіла 82
 Кількість речовини 121
 Коефіцієнт поверхневого натягу 181
 Кут крайовий (змочування) 184
 Маса тіла 61
 Механічна напруга 194
 Модуль пружності (Юнга) 194
 Молекулярно-кінетична теорія 118
 Молярна маса 121
 Момент сили 73
 Нанотехнології 122
 Насичена пара 171
 Основна задача механіки 13
 Основне рівняння МКТ ідеального газу 129
 Парціальний тиск 130
 Переміщення 15
 Постулати СТВ 101
 Потужність 87
 Принцип відносності Галілея 99
 Прискорення 29
 Прискорення вільного падіння 52
 Прискорення доцентрове 37
 Радіус-вектор 14
 Рівновага теплова 131, 134
 Рівняння Менделєєва — Клапейрона 138
 Рідкі кристали 192
 Робота ідеального газу 150
 Робота механічна 86
 Сила гравітації 51
 Сила поверхневого натягу 182
 Сила пружності 59
 Сила реакції опори 60
 Сили консервативні 62
 Сили тертя (спокою, ковзання) 62
 Сили центральні 51
 Система відліку 14
 Система відліку інерціальна 46
 Система відліку неінерціальна 46
 Спеціальна теорія відносності 100
 Стала Больцмана 135, 136
 Температура абсолютна 136
 Температура критична 175
 Тиск осмотичний 186
 Точка роси 178
 Траєкторія 13
 Умови рівноваги 74, 75
 Універсальна газова стала 138
 Фазові переходи 199
 Центр тяжіння 51
 Цикл Карно 164
 Частота обертова 38
 Шлях 14
 Швидкість лінійна 36
 Швидкість миттєва 27
 Швидкість кутова 38
 Швидкість середня квадратична 126