

Л. Е. Генденштейн

# ФІЗИКА

# 10

клас

Підручник для 10 класу  
загальноосвітніх навчальних закладів  
суспільно-гуманітарного напрямку

ГІМНАЗІЯ  
ХАРКІВ  
2006

## ДО ВЧИТЕЛЯ ТА УЧНЯ

### Рецензенти:

професор, доктор фізико-математичних наук,  
завідувач кафедри теоретичної ядерної фізики  
Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна  
*Ю. А. Бережної;*

заслужений учитель України, кандидат фізико-математичних наук,  
учитель фізики Харківського ФМЛ № 27 *І. М. Гельфгат;*

завідувач кафедри змісту та методики освіти  
Харківського обласного науково-методичного інституту  
безперервної освіти, кандидат педагогічних наук *С. В. Каплун*

- ◆ Підручник призначено для вивчення фізики в 10-х класах **загальноосвітніх навчальних закладів суспільно-гуманітарного напрямку** відповідно до рівня «А» (2 уроки на тиждень) програми Міністерства освіти і науки України.
- ◆ **Чітка структура підручника** полегшує розуміння навчального матеріалу. У тексті виділено головне, а наприкінці розділів сформульовано висновки для узагальнення, повторення й ведення конспекту.
- ◆ Фізику подано як живу науку, яка є частиною загальної культури: наведено багато **прикладів** проявів та застосування фізичних законів у навколишньому житті, відомостей з історії фізичних **відкриттів**, дано ілюстрований опис фізичних **дослідів**.
- ◆ Текст викладено в **діалоговому** режимі: багато заголовків сформульовано як запитання, на які дано відповіді з обговореннями.
- ◆ Один параграф підручника розраховано приблизно **на один навчальний тиждень**. Орієнтовне поурочне планування наведено в «Методичних матеріалах для вчителя», які входять до навчально-методичного комплекту, ядром якого є підручник.
- ◆ У підручнику міститься **додатковий матеріал** для бажаючих знати більше (такий матеріал виділено шрифтом). Його можна використати також у разі збільшення часу на вивчення фізики у вашій школі. Додаткові завдання наведено в Збірнику завдань і самостійних робіт, який також є частиною навчально-методичного комплекту.

# МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

## Розділ 1. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА



Молекулярна фізика вивчає властивості речовини, ґрунтуючись на уявленні про те, що вона складається з атомів і молекул, які безперервно рухаються та взаємодіють одне з одним.

Основою молекулярної фізики є молекулярно-кінетична теорія, що досягла великих успіхів у поясненні властивостей речовини в газоподібному стані.

У цьому розділі ми стисло розглянемо також будову речовини в рідинах та твердих тілах.

## § 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії
2. Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії

У цьому параграфі розглянуто основні положення молекулярно-кінетичної теорії та їх дослідне обґрунтування, а також сформульовано основне завдання молекулярно-кінетичної теорії.

### 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

#### ІСНУВАННЯ МОЛЕКУЛ ТА ЇХНІ РОЗМІРИ

Як ви вже знаєте, речовина складається з атомів і молекул.

Думку про те, що речовина складається з дрібних частинок, першими висловили ще в 5-му столітті до нашої ери давньогрецькі філософи Левкіпп і Демокріт, які стверджували, що у світі є тільки атоми<sup>1</sup> і порожнеча.

Як доказ вони наводили такий приклад: вода, випаровуючись, роздрібнюється на настільки малі частинки, що їх навіть не можна побачити оком.

Однак тільки через дві з половиною тисячі років після народження атомної гіпотези — уже в 20-му столітті — наука досягла рівня, коли вчені змогли **побачити** атоми (див. рис. 1.1).

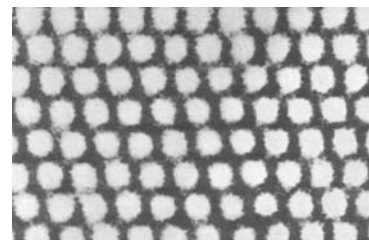


Рис. 1.1. Фотографія поверхні золотої фольги, зроблена за допомогою іонного мікроскопа. Збільшення в 20 мільйонів разів. Білі плями — це зображення окремих атомів!

#### Як оцінити розміри молекул?

Якщо помістити крапельку олії на поверхню води, олія розтечеться по ній дуже тонким шаром. Максимальна площа олій-

<sup>1</sup> Від грецького «атомос», що означає «неподільний».

ної плівки відповідає її товщині в одну молекулу. Знаючи об'єм крапельки і площу олійної плівки, яка утворилася з неї, можна оцінити розмір однієї молекули олії.

Наприклад, крапелька маслинової олії об'ємом  $V = 1 \text{ мм}^3$  розтікається по площі  $S$ , яка не більша, ніж  $1 \text{ м}^2$ . Звідси випливає, що товщина олійної плівки  $d = V/S$  становить близько  $10^{-9}$  м. Отож розмір молекули олії не може бути більшим за  $10^{-9}$  м.

### Як можна уявити розміри молекул і атомів?

Характерною довжиною у світі молекул є  $10^{-10}$  м = 0,1 нм (нагадаємо, що  $1 \text{ нм} = 10^{-9}$  м). Найменша молекула — одноатомна молекула гелію<sup>1</sup> — має розмір близько 0,2 нм. Розмір молекули води, що складається з двох атомів Гідрогену й одного атома Оксигену<sup>2</sup>, — близько 0,3 нм.

Щоб ви могли уявити розмір молекули води, наведемо таке порівняння: в одній чайній ложці води міститься приблизно стільки ж молекул води, скільки чайних ложок води у світовому океані. Виходить, аби перерахувати молекули води в чайній ложці, знадобилося б стільки ж часу, скільки потрібно для того, щоб вичерпати чайною ложечкою світовий океан!

## РУХ МОЛЕКУЛ

### З якими швидкостями рухаються молекули?

У навколишньому повітрі молекули рухаються зі швидкостями артилерійських снарядів — сотні метрів за секунду. Ми не відчуваємо своєю шкірою окремих ударів молекул тому, що маси молекул надзвичайно малі, а дріб їхніх ударів — дуже частий. «Барабанный дріб» швидких ударів крихітних молекул сприймаємо як постійний тиск газу.

Із такими ж великими швидкостями рухаються атоми та молекули навколишніх рідинних і твердих тіл, у тому числі й молекули, з яких складаємося ми самі.

<sup>1</sup> Як відомо з курсу хімії, назви простих речовин і відповідних хімічних елементів здебільшого збігаються. Наприклад, просту речовину, утворену хімічним елементом Гелієм, називають гелієм. І відповідно треба писати молекула гелію. Не можна приписувати хімічному елементу властивості, характерні для простої речовини. Тому, щоб їх не плутати, назву простої речовини пишуть з малої літери, а назву хімічного елемента — з великої. Отже, коли йдеться про інертний газ, то це проста речовина гелій. Але цю інертність зумовлює будова атому хімічного елемента Гелію (He).

<sup>2</sup> Для хімічних елементів завжди використовують міжнародні назви (наприклад, Гідроген, Оксиген), а для найпоширеніших у природі простих речовин, утворених атомами хімічних елементів Гідрогену та Оксигену, збережено традиційні назви: водень і кисень відповідно.

Надалі ми зможемо обчислити швидкості молекул і розповімо, як їх було виміряно (див. § 5. *Температура та середня кінетична енергія молекул*).

### Броунівський рух

На початку 19-го століття англійський ботанік Р. Броун, спостерігаючи в мікроскоп дуже малі частинки пилку рослин, змулені у воді, виявив, що вони перебувають у «вічному танці», здійснюючи безперервний хаотичний рух.

Учений припустив, що рух, який він спостерігає, — це рух живих істот, і повторив дослід із потовченими на дрібнийпил шматочками каменю. Але й частинки каменю «танцювали без утоми»!

Цей «броунівський рух», як його назвали, залишався загадкою для вчених цілих 50 років. Тільки наприкінці 19-го століття вчені здогадалися, що цей рух зумовлений бомбардуванням частинок молекулами рідини: якщо частинка дуже мала, удари молекул по ній із різних боків не компенсують один одного, що й викликає безперервний хаотичний рух частинки.

Рис. 1.2 ілюструє хаотичність руху броунівських частинок. На фотографії, зробленій за допомогою мікроскопа, відрізками з'єднано послідовні положення броунівської частинки через кожні 30 с. Якби положення частинки фіксувалися не через 30 с, а через 1 с, то кожен відрізок замінювався б настільки ж вигадливою ламаною з 30 відрізків.

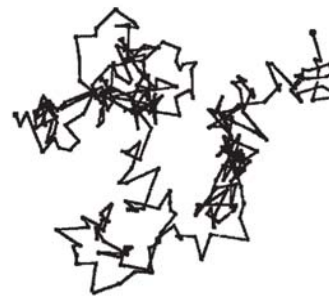


Рис. 1.2. Броунівський рух. На цьому рисунку кожен відрізок ламаної замінює собою таку складну ламану!

Броунівський рух став першим дослідним підтвердженням молекулярної будови речовини: він відіграв роль «містка» між *макросвітом*<sup>1</sup> — світом тіл, які можна спостерігати безпосередньо, і *мікросвітом* — світом молекул і атомів. На початку 20-го століття А. Ейнштейн<sup>2</sup> і польський фізик М. Смолуховський побудували

<sup>1</sup> Назви походять від грецьких слів «макро» — великий і «мікро» — малий.

<sup>2</sup> Ейнштейна не можна «приписати» до якоїсь однієї країни: він жив і працював у Швейцарії, Німеччині та США.

теорію броунівського руху, завдяки якій удалося оцінити розміри молекул.

### Чому рух молекул ніколи не припиняється?

Рух молекул істотно відрізняється від руху навколишніх предметів тим, що рух молекул **ніколи не припиняється**. Механічний же рух, як ми вже знаємо, через тертя сповільнюється і зрештою припиняється. Чому ж не зупиняються через тертя молекули?

Річ у тім, що внаслідок тертя **механічний рух** тіла як цілого перетворюється саме на хаотичний (тепловий) **рух молекул** – адже в результаті тертя тіла **нагріваються**. Але самим молекулам «передати» енергію вже нікуди – вони рухаються в порожнечі, зіштовхуючись тільки одна з одною. Унаслідок зіткнень молекул їхня кінетична енергія перерозподіляється між ними таким чином, що **середня** кінетична енергія молекул залишається незмінною.

Вічний рух крихітних молекул подібний до руху величезних планет: планети, так само як і молекули, рухаються в порожнечі й тому їхня механічна енергія залишається практично незмінною протягом сотень мільйонів років.

### Дифузія

Якщо крапнути парфумами десь у кімнаті, через кілька хвилин запах парфумів можна буде відчутти в будь-якому її куточку. Відчуття запаху зумовлено формою молекул ароматичних речовин. Поширюється запах завдяки **дифузії** – так називають взаємне проникнення молекул однієї речовини в іншу, яке відбувається внаслідок руху молекул.

Може виникнути запитання: чому запах поширюється так повільно, якщо молекули рухаються зі швидкостями артилерійських снарядів? Річ у тім, що, рухаючись, молекули ароматичних речовин багаторазово зіштовхуються з молекулами, з яких складається повітря, тому вони рухаються не по прямих лініях, а по ламаних – їхні траєкторії нагадують траєкторії руху броунівських частинок.

Дифузія відбувається не тільки в газах. Її можна спостерігати в рідинах і навіть у твердих тілах.

### ВЗАЄМОДІЯ МОЛЕКУЛ

#### Природа взаємодії молекул

Взаємодія молекул має електричну природу. Хоча молекули загалом електрично нейтральні, розподіл позитивних і негативних електричних зарядів у них такий, що на великих відстанях

(порівняно з розмірами самих молекул) молекули притягаються, а на малих відстанях – відштовхуються.

Взаємодію молекул описує **квантова механіка** – наука про рух і взаємодію мікрочастинок речовини. Про основні її положення ми розповімо в курсі фізики 11-го класу.

#### Прояв взаємодії молекул

**Притяганням** молекул зумовлене існування рідин і твердих тіл: коли б не це притягання, рідини і тверді тіла розсипалися б на окремі молекули (перетворившись на газу).

На дуже малих відстанях притягання молекул змінюється **відштовхуванням**, завдяки чому рідини і тверді тіла практично нестисливі, тобто чинять великий опір зменшенню їхнього об'єму.

Сили притягання та відштовхування молекул зумовлюють пружність і міцність твердих тіл.

#### Проведемо досліди

1. Щоб уявити, наскільки великі сили взаємодії між молекулами, спробуйте розірвати сталеву або капронову нитку площею поперечного перерізу  $1\text{ мм}^2$ . Мало хто зможе це зробити, але ж зусиллям усього вашого тіла «протистоять» сили притягання малесеньких молекул у малому перерізі нитки!

2. На рис. 1.3 зображено дослід, який наочно доводить існування сил міжмолекулярного притягання.

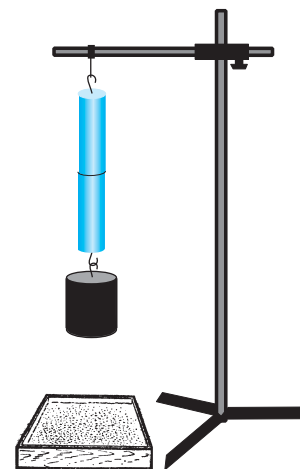


Рис. 1.3. Зчеплення свинцевих циліндрів. Якщо щільно притиснути один до одного свинцеві циліндри з добре зачищеними торцями, вони внаслідок сил міжмолекулярного притягання «зчіплюються» настільки міцно, що до них можна підвісити кілограмову гирю.

## ТРИ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

Отже, виходячи з дослідів, ми можемо сформулювати основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

- усі речовини складаються з дуже маленьких частинок — атомів і молекул;
- частинки речовини безперервно хаотично рухаються;
- частинки речовини взаємодіють одна з одною.

## 2. ОСНОВНЕ ЗАВДАННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

Молекулярно-кінетична теорія пов'язує властивості речовини з рухом і взаємодією молекул.

### МАКРОСКОПІЧНІ ТА МІКРОСКОПІЧНІ ПАРАМЕТРИ

Величини, що характеризують стан макроскопічних тіл, називають *макроскопічними* параметрами.

Приклади макроскопічних параметрів: тиск, температура, маса тіла, його об'єм.

Макроскопічні параметри застосовні тільки до макроскопічних тіл: безглуздо казати, наприклад, про тиск або температуру однієї молекули.

Величини, що характеризують властивості окремих молекул, називають *мікроскопічними* параметрами.

Приклади мікроскопічних параметрів: маса молекули, середня швидкість молекул та їх середня кінетична енергія.

### РІВНЯННЯ СТАНУ

Дослід показує, що макроскопічні параметри, які характеризують даний зразок речовини, пов'язані один з одним. Наприклад, якщо за сталого тиску збільшувати температуру газу, його об'єм збільшується.

Завдання молекулярно-кінетичної теорії полягає в тому, щоб пояснити цю закономірність та інші співвідношення між макроскопічними параметрами на основі уявлення про рух і взаємодію молекул.

Щоб сформулювати це завдання чіткіше, уведемо поняття *рівняння стану*. Так називають співвідношення між макроскопічними параметрами, наприклад температурою, об'ємом і тиском.

*Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії* — вивести рівняння стану речовини, установивши зв'язок між макроскопічними та мікроскопічними параметрами.

У нашому курсі ми зможемо (та й то з деякими спрощеннями) виконати основне завдання молекулярно-кінетичної теорії тільки для найпростішого випадку — коли речовина перебуває в газоподібному стані.

Але і при цьому ми зможемо багато чого довідатися про світ молекул.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. У чому полягають основні положення молекулярно-кінетичної теорії?
2. Наведіть приклади дослідного обґрунтування положень молекулярно-кінетичної теорії.
3. Які характерні розміри атомів і молекул?
4. Що таке броунівський рух? Чому він відіграв важливу роль у становленні молекулярно-кінетичної теорії?
5. Чому рух молекул ніколи не припиняється?
6. Яка природа взаємодії молекул?
7. Що таке макроскопічні параметри? Наведіть приклади.
8. Що таке мікроскопічні параметри? Наведіть приклади.
9. У чому полягає основне завдання молекулярно-кінетичної теорії?

## § 2. КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ. СТАЛА АВОГАДРО

1. Відносна молекулярна (атомна) маса
2. Кількість речовини

*Багато важливих властивостей зразка речовини визначає саме кількість молекул у цьому зразку: часто вона виявляється навіть істотною, ніж маса зразка.*

*У цьому параграфі ми розглянемо фізичну величину, яка визначає кількість молекул.*

### 1. ВІДНОСНА МОЛЕКУЛЯРНА (АТОМНА) МАСА

Маси атомів і молекул, як і будь-які маси, можна виражати в кілограмах: наприклад, маса молекули води дорівнює приблизно  $3 \cdot 10^{-26}$  кг. Однак набагато зручніше порівнювати маси атомів і молекул із масою найлегшого атома — атома Гідрогену, оскільки маси всіх атомів і молекул із високою точністю **кратні** масі цього атома. Наприклад, маса атома Карбону приблизно в 12 разів більша від маси атома Гідрогену.

Ми не випадково згадали про Карбон: із чисто технічних причин<sup>1</sup> як **атомну одиницю маси** (скорочено а.о.м.) вибрали саме 1/12 маси атома Карбону. Однак для більшості розрахунків (зокрема, розв'язуючи задачі) можна прийняти, що 1 а.о.м. дорівнює масі атома Гідрогену.

Масу молекули, виражену в атомних одиницях маси, називають **відносною молекулярною масою**. Відносну молекулярну масу позначають  $M_r$ .

Отже,

відносна молекулярна маса  $M_r$  дорівнює відношенню маси  $m_0$  молекули даної речовини до 1/12 маси атома

Карбону  $m_{0C}$ , тобто  $M_r = \frac{m_0}{(1/12)m_{0C}}$ .

<sup>1</sup> Пов'язаних із точністю відтворення одиниці виміру.

### Приклади

1. Відносна молекулярна маса гелію дорівнює 4, тому що гелій — одноатомний газ і маса атома Гелію в 4 рази більша за масу атома Гідрогену, яку можна вважати такою, що дорівнює 1 а.о.м.
2. Відносна молекулярна маса водню дорівнює 2 (тому що водень — двохатомний газ).

Аналогічно до відносної молекулярної маси визначають і **відносну атомну масу** як масу атома, виражену в атомних одиницях маси.

### ЯК ЗНАЙТИ ВІДНОСНУ АТОМНУ ТА МОЛЕКУЛЯРНУ МАСУ?

Значення відносної атомної маси для даної речовини можна знайти за допомогою Періодичної системи елементів (таблиці Менделєєва), округливши наведене в ній значення до цілого<sup>1</sup>. Наприклад, відносні атомні маси Гелію, Карбону і Оксигену дорівнюють відповідно 4, 12 і 16.

Щоб визначити відносну молекулярну масу речовини, треба знати її хімічну формулу та відносні атомні маси атомів, які входять до складу молекули даної речовини.

### Приклад

Відносна молекулярна маса води дорівнює 18, тому що відповідно до хімічної формули води ( $H_2O$ ) молекула води складається з двох атомів Гідрогену (з відносною атомною масою 1) і одного атома Оксигену (з відносною атомною масою 16).

### 2. КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ

Деякі важливі властивості даного зразка речовини — наприклад, тиск газу за даної температури, — залежать не від маси зразка, а від **кількості молекул** у ньому.

**Кількістю речовини** називають відношення кількості молекул  $N$  у даному зразку до кількості атомів Карбону в 12 г вуглецю.

Згідно з цим визначенням, одиницею кількості речовини є

**один моль** — кількість речовини, що містить стільки ж молекул, скільки атомів Карбону міститься в 12 г вуглецю.

Кількість речовини в даному зразку, виражену в молях, позначають  $\nu$ .

Чим обгрунтовано саме таке визначення кількості речовини?

<sup>1</sup> Нецілі значення відносних атомних мас у таблиці Менделєєва зумовлені переважно існуванням у природі **ізотопів** — атомів тієї самої речовини з різними масами.

Розглянемо це на прикладі вуглецю. Згідно з визначенням моля, один моль вуглецю має масу 12 г, а відносна молекулярна маса вуглецю становить 12. Отже, **задана в грамах маса зразка, який містить 1 моль речовини, чисельно дорівнює відносній молекулярній масі цієї речовини**. А це зручно для багатьох розрахунків.

#### Приклади

1. Один моль водню має масу 2 г, оскільки відносна молекулярна маса водню дорівнює 2 (нагадаємо, що молекула водню складається з двох атомів).
2. Один моль кисню ( $O_2$ ) має масу 32 г.
3. Один моль води має масу 18 г (приблизно одна столова ложка).

Зразки різних речовин, які містять однакову кількість речовини (тобто однакову кількість молекул), мають зазвичай різні маси. Наприклад, маса одного моля кисню в 16 разів більша за масу одного моля водню.

#### СТАЛА АВОГАДРО

Відповідно до визначення моля в одному молі будь-якої речовини міститься **однакова кількість молекул**. Виміри показали, що вона дорівнює  $6 \cdot 10^{23}$  (точніше,  $6,02 \cdot 10^{23}$ ). На честь італійського вченого Амадео Авогадро, який відкрив, що багато властивостей газів визначає саме кількість молекул,

кількість молекул в одному молі називають **сталю Авогадро**:  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ .

Величезне чисельне значення сталої Авогадро можна спробувати уявити, удавшись до «всесвітніх масштабів». Астрономи оцінили, що кількість галактик у частині Всесвіту, яку зараз можуть спостерігати, – близько мільярда ( $10^9$ ), а кожна галактика містить сотні мільярдів зірок (близько  $10^{11}$ ). Виходить, кількість зірок у той частині Всесвіту, яку ми можемо спостерігати, – близько  $10^{20}$ . Це величезне число, але воно в тисячі разів менше за сталу Авогадро, яка приблизно дорівнює кількості молекул в одній столовій ложці води!

З'ясуємо зміст сталої Авогадро на конкретному прикладі.

Маса одного моля води, що містить  $N_A$  молекул, дорівнює 18 г, а маса однієї молекули води дорівнює 18 а.о.м. Отже, стала Авогадро є перевідним множником між грамом і атомною одиницею маси: в одному грамі міститься  $N_A$  атомних одиниць маси<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Тому вимірювання сталої Авогадро — це, по суті, вимірювання маси атома (наприклад, атома Гідрогену).

#### Молярна маса

Масу одного моля речовини називають **молярною масою**.

Молярну масу позначають  $M$  і вимірюють в кг/моль.

**Приклади.**

Молярна маса води дорівнює  $18 \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ , а молярна маса

водню дорівнює  $2 \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ .

#### ДЕЯКІ КОРИСНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Кількість молекул  $N$  у зразку пов'язана з кількістю речовини  $\nu$  співвідношенням  $N = \nu N_A$ .

#### Приклади

Якщо в зразку  $1,2 \cdot 10^{24}$  молекул, то він містить 2 молі, а якщо в зразку 5 молів, то в ньому буде  $3 \cdot 10^{24}$  молекул.

В одному молі речовини масою  $M$  міститься  $N_A$  молекул

масою  $m_0$  кожна, тому  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ .

#### Приклади

Маса молекули води  $m_{H_2O} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} = 3 \cdot 10^{-26}$  (кг), а маса молекули

водню  $m_{H_2} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} = 3,3 \cdot 10^{-27}$  (кг).

Оскільки  $M$  — маса одного моля, то кількість речовини в зразку масою  $m$  дорівнює  $\nu = \frac{m}{M}$ . Кількість молекул у зразку

$N = \nu N_A = \frac{m}{M} \cdot N_A$ .

#### Приклади

1. У 180 г води міститься 10 молів (тому що маса одного моля води дорівнює 18 г) і, отже,  $6 \cdot 10^{24}$  молекул.

2. У 1 кг водню міститься 500 молів (маса одного моля водню дорівнює 2 г) і, отже,  $3 \cdot 10^{26}$  молекул.





## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке атомна одиниця маси?
2. Що таке відносна молекулярна (атомна) маса?
3. Як визначити відносну молекулярну (атомну) масу?
4. Що таке кількість речовини? Для чого було введено цю величину?
5. У чому вимірюють кількість речовини?
6. Що таке стала Авогадро? Чому вона дорівнює?
7. Що таке молярна маса?
8. Як пов'язані маса молекули, молярна маса та стала Авогадро?
9. Як визначити кількість молекул у тілі, якщо відомі маса цього тіла та молярна маса речовини?
10. Скільки молів міститься в 4 г водню? У повній склянці води?

## § 3. ТЕМПЕРАТУРА

1. Температура та її вимірювання
2. Абсолютна шкала температур

*У цьому параграфі ми розглянемо різні способи вимірювання температури та введемо абсолютну шкалу температур, пов'язану з особливостями розширення газів.*

*Ми введемо також співвідношення між прийнятою в побуті шкалою Цельсія й абсолютною шкалою температур.*

### 1. ТЕМПЕРАТУРА ТА ЇЇ ВИМІРЮВАННЯ

#### Суб'єктивне сприйняття температури

У побуті температуру розуміють як «міру нагрітості» тіл: «гарячі» тіла мають температуру вищу, ніж «холодні».

Однак таке уявлення про температуру є досить суб'єктивним, оскільки навіть тій самій людині той самий предмет може одночасно здаватися таким, що має **різні** температури. Щоб переконатися в цьому, проведіть такий простий дослід. Опустіть на кілька хвилин палець лівої руки у склянку з холодною водою, а палець правої — у склянку з теплою водою. Потім одночасно опустіть пальці обох рук у склянку з водою кімнатної температури.

Ваша ліва рука «скаже» вам, що ця вода тепла, а права — що **та сама вода** холодна!

Отже, не можна казати про температуру тільки на підставі суб'єктивних відчуттів: треба визначити температуру так, щоб її можна було **вимірювати**.

#### ТЕПЛОВА РІВНОВАГА ТА ТЕМПЕРАТУРА

Якщо забезпечити стикання двох тіл — холодного і гарячого, то холодне тіло почне нагріватись, а гаряче — охолоджуватись. Температура кожного з цих тіл буде змінюватися доти, поки їхні температури не стануть однаковими.

Отже, температура характеризує стан **теплової рівноваги**: тіла, що перебувають у тепловій рівновазі, мають однакову температуру.

## ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Практично всі тіла, нагріваючись, розширюються. Це використовують для створення **термометрів** — приладів для вимірювання температури. У побуті часто використовують рідинні термометри (рис. 3.1).

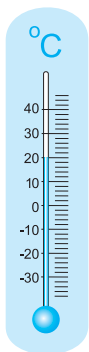


Рис. 3.1. Рідинний термометр.  
Щоб розширення рідини було помітнішим, трубку в термометрі роблять дуже тонкою.

### Шкала Цельсія

Щоб визначити температурну шкалу, спочатку вибирають дві так звані «опорні точки» — температури, що відповідають двом явищам, які відбуваються за визначених температур (наприклад, танення льоду та кипіння води за атмосферного тиску). Потім на трубку термометра наносять шкалу, поділяючи відстань між «опорними точками» на рівні частини. Наприклад, за температурною шкалою Цельсія<sup>1</sup> температурі танення льоду відповідає 0 градусів, а температурі кипіння води за атмосферного тиску відповідає 100 градусів. Температуру за шкалою Цельсія позначають **маленькою** літерою  $t$  і записують, наприклад, так:  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

### Який термометр показує «правильну» температуру?

Якщо на термометрах із різними рідинами поділити шкалу між  $0\text{ }^\circ\text{C}$  і  $100\text{ }^\circ\text{C}$  на рівні (за довжиною) частини, то покази цих термометрів за «проміжних» температур можуть сильно відрізнятись, тому що різні рідини розширюються по-різному. Наприклад, коли ртутний термометр за зазначеної розмітки шкали показує 50 градусів, гліцериновий покаже 47,6 градусів. І немає ніяких доводів на користь того, який термометр уважати «правильним»!

<sup>1</sup> Цю дуже поширену температурну шкалу названо за ім'ям шведського астронома Андерса Цельсія, який увів її.

Ще значнішими будуть відмінності в показах кожного з цих термометрів і водяного термометра. Річ у тім, що вода у разі нагрівання й охолодження поводитьсь досить незвичайно: коли її нагрівають від  $0\text{ }^\circ\text{C}$  до  $4\text{ }^\circ\text{C}$ , вона не розширюється, а **стискується**<sup>1</sup>. І тому покази водяного термометра за умов нагрівання від  $0\text{ }^\circ\text{C}$  до  $4\text{ }^\circ\text{C}$  будуть не збільшуватись, а **зменшуватись**!

По-різному розширюються у разі нагрівання й тверді тіла. На щастя, з'ясувалося, що є чимало речовин, які, нагріваючись, розширюються **однаково**.

## 2. АБСОЛЮТНА ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР

Численними дослідженнями було встановлено, що всі гази, нагріваючись, розширюються однаково.

Нижче ми з'ясуємо, чим зумовлена ця подібність газів (див. § 5. *Температура та середня кінетична енергія молекул*), а зараз відзначимо, що її можна використовувати для точнішого визначення температури<sup>2</sup>.

### ГАЗОВИЙ ТЕРМОМЕТР

Візьмемо циліндричну посудину з газом, у якій газ нагрівається за сталого тиску, позначимо на стінці посудини «опорні точки», що відповідають  $0\text{ }^\circ\text{C}$  і  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , а потім нанесемо між ними позначки **на рівних відстанях одна від одної** (див. рис. 3.2).

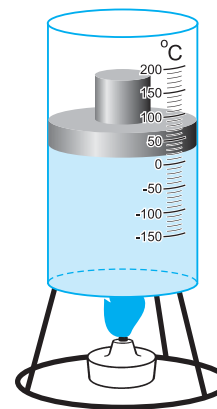


Рис. 3.2. Схема газового термометра.  
Газ розширюється за сталого тиску. Сусідні мітки нанесено на рівних відстанях одна від одної.

<sup>1</sup> Тому ріки й озера в середніх широтах не промерзають узимку до дна.

<sup>2</sup> Для точного вимірювання температури використовують газові термометри. Найперший термометр був саме **газовим**! Винайшов його італійський учений Галілео Галілей.

Ми виготовили таким чином газовий термометр, визначивши температуру як величину, що лінійно залежить від об'єму газу за сталого тиску.

Нижче (див. § 5. *Температура та середня кінетична енергія молекул*) ми побачимо, що визначена в такий спосіб температура має глибокий фізичний зміст: вона пропорційна до середньої кінетичної енергії молекул.

Позначимо на шкалі газового термометра опорні точки, що відповідають температурам  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Співвідношення між об'ємом газу та температурою за шкалою Цельсія в цьому інтервалі температур показано на графіку, наведеному на рис. 3.3а.

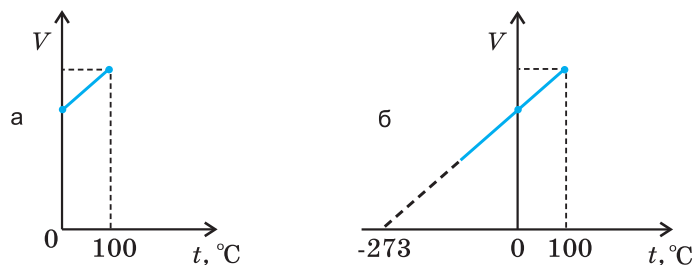


Рис. 3.3. Співвідношення між об'ємом газу та температурою за шкалою Цельсія.

Якщо ми продовжимо цей графік у бік від'ємних температур, то побачимо, що об'єм газу мав би дорівнювати нулю при  $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.3б)!

Насправді цього не відбувається, оскільки, охолоджуючись до дуже низьких температур, усі гази перетворюються спочатку на рідини, а потім — на тверді тіла (тому ділянку графіка в зоні низьких температур намічено пунктиром).

Проте виявилось, що температура  $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$  справді є «абсолютним холодом»: як показано в наступному параграфі, це пов'язано з тим, що така температура відповідає відсутності теплового руху молекул.

## АБСОЛЮТНА ТЕМПЕРАТУРА

У середині 19-го століття англійський учений Вільям Томсон (відомий як лорд Кельвін) запропонував нову шкалу температур, нуль якої відповідає «абсолютному холодові», тобто  $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а зміна температури на один градус дорівнює зміні температури на один градус за шкалою Цельсія.

Цю шкалу температур називають *шкалою Кельвіна*, або *абсолютною шкалою*, а температуру, виміряну за цією шкалою, — *абсолютною температурою*<sup>1</sup>.

Нуль за абсолютною шкалою температур називають *абсолютним нулем температури*. Як уже зазначалося, це найнижче можливе значення абсолютної температури.

Абсолютну температуру позначають *великою* літерою  $T$ .

*Одиницю* абсолютної температури називають *кельвін* і позначають  $\text{K}$ .

Розглядаючи процеси, які відбуваються з газами, ми будемо користуватися переважно абсолютною температурою.

## Співвідношення між шкалою Цельсія та абсолютною шкалою температур

З визначення абсолютної температури випливає, що абсолютна температура  $T$  і температура  $t$  за шкалою Цельсія пов'язані співвідношенням  $T = t + 273$  (див. рис. 3.4).

Наприклад, кімнатній температурі, що дорівнює  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відповідає абсолютна температура  $293\text{ K}$ .

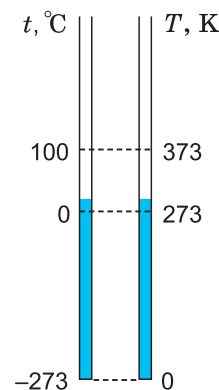


Рис. 3.4. Співвідношення між шкалою Цельсія та абсолютною шкалою температур. Позначено найхарактерніші точки: абсолютний нуль температури, температуру танення льоду, кімнатну температуру та температуру кипіння води за атмосферного тиску.

## Співвідношення між об'ємом газу та абсолютною температурою

Щоб зобразити графічно співвідношення між об'ємом газу  $V$  та його абсолютною температурою  $T$ , досить зсунути шкалу температур на графіку рис. 3.3б на  $273$  градуси.

<sup>1</sup> Абсолютну шкалу температур називають також *термодинамічною* шкалою, оскільки її точне визначення дає саме термодинаміка.

Для наочності обидва графіки — попередній, із температурою за шкалою Цельсія, і новий, із температурою за шкалою Кельвіна, — подано поруч на рис. 3.5.

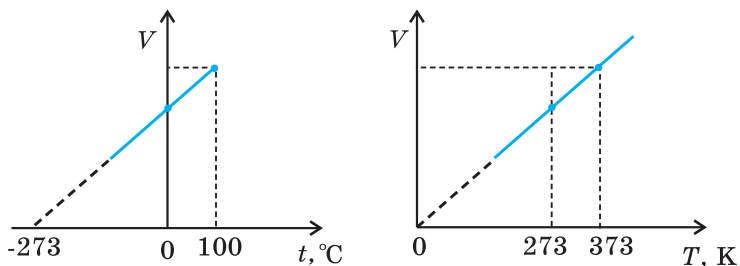


Рис. 3.5. Співвідношення між об'ємом газу та його температурою за шкалою Цельсія (ліворуч) і за шкалою Кельвіна (праворуч).

Зверніть увагу: за сталого тиску об'єм даної маси газу прямо пропорційний до абсолютної температури. Ми ще повернемося до цього в наступному параграфі.

### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Як пов'язано поняття температури з поняттям теплової рівноваги?
2. Чим відрізняється розширення газів від розширення рідин і твердих тіл?
3. Як визначають шкалу температур за Цельсієм?
4. Що таке абсолютна температура?
5. Яке співвідношення між абсолютною температурою та температурою за шкалою Цельсія?
6. Укажіть діапазон температур за шкалою Кельвіна для вашого міста влітку та взимку.

## § 4. ГАЗОВІ ЗАКони

1. Ізопроееси
2. Рівняння стану газу

Стан даної маси газу визначають три макроскопічні параметри — тиск, об'єм і температура. У цьому параграфі ми вивчимо, як ці параметри пов'язані один з одним.

Розглянемо спочатку процес, у яких один із трьох зазначених параметрів залишається сталим, а потім — процес, у яких одночасно змінюються всі три параметри, а також маса газу.

### 1. ІЗОПРОЦЕСИ

Вивчення газових процесів почалося з таких процесів, у яких один із трьох параметрів — тиск  $p$ , об'єм  $V$  або температура  $T$  — залишається сталим, а два інших змінюються.

Такі процеси називають *ізопроеесами*<sup>1</sup>.

#### ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС (ЗА СТАЛОГО ТИСКУ)

Процес, що відбувається з даною масою газу за сталого тиску, називають *ізобарним*<sup>2</sup>. У ізобарному процесі змінюються температура та об'єм газу.

З таким процесом ми вже познайомилися, вивчаючи розширення газу в разі його нагрівання (див. § 3. *Температура*). Відповідно до визначення абсолютної температури,

для *ізобарного* процесу відношення об'єму даної маси газу до його абсолютної температури залишається сталим, тоб-

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{при} \quad p = \text{const}.$$

Це співвідношення називають *законом Гей-Люссака* на честь французького вченого Джозефа Луї Гей-Люссака, який досліджував ізобарний процес та встановив подібне співвідношення з використанням шкали Цельсія.

<sup>1</sup> Від грецького слова «іzos» — рівний.

<sup>2</sup> Від грецьких слів «іzos» і «барос» — вага. Зіставте назву ізобарного процесу з назвою приладу «барометр» для вимірювання тиску.

Співвідношення між об'ємом даної маси газу та абсолютною температурою за сталого тиску зображено графічно на рис. 4.1. Цей графік називають *ізобарою*. Він показує, що за сталого тиску об'єм газу *прямо пропорційний* до його абсолютної температури.

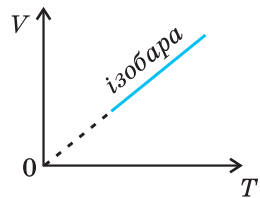


Рис. 4.1. Графік залежності  $V(T)$  при  $p = \text{const}$  (*ізобара*).

Із закону Гей-Люссака випливає, що для двох станів (1 і 2) даної маси газу за сталого тиску справедливо співвідношення  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ . Наприклад, якщо абсолютна температура *збільшується* в 3 рази, об'єм газу *збільшується* теж у 3 рази.

### ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС (ЗА СТАЛОГО ОБ'ЄМУ)

Процес, який відбувається з даною масою газу за сталого об'єму, називають *ізохорним*<sup>1</sup>. У ізохорному процесі змінюються температура й тиск газу.

#### Проведемо дослід

На рис. 4.2 зображено установку, за допомогою якої можна дослідити, як змінюється тиск газу залежно від температури за сталого об'єму. Гофровану циліндричну посудину, у якій міститься деяка маса повітря, з'єднують із манометром (приладом для вимірювання тиску) і поміщають у посудину з водою, яку можна нагрівати.

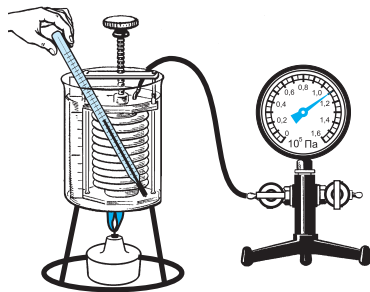


Рис. 4.2. Вивчення залежності тиску даної маси газу від температури за сталого об'єму. У разі нагрівання газу його тиск збільшується.

<sup>1</sup> Від грецьких слів «іzos» і «xorema» — посудина.

Вимірюючи на досліді залежність тиску газу від абсолютної температури за сталого об'єму, ми побачимо, що

для *ізохорного* процесу відношення тиску даної маси газу до його абсолютної температури залишається сталим, тобто

$$\frac{p}{T} = \text{const} \text{ при } V = \text{const}.$$

Це співвідношення називають *законом Шарля*, тому що залежність тиску газу від температури було досліджено наприкінці 18-го століття французьким ученим Жаком Шарлем. Він установив подібне співвідношення з використанням шкали Цельсія.

Графік залежності тиску даної маси газу від температури за сталого об'єму зображено на рис. 4.3.

Цей графік називають *ізохорою*. Він показує, що за сталого об'єму тиск газу *прямо пропорційний* до його абсолютної температури.

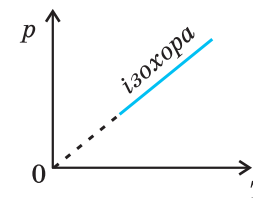


Рис. 4.3. Графік залежності  $p(T)$  при  $V = \text{const}$  (*ізохора*).

Із закону Шарля випливає, що для двох станів (1 і 2) даної маси газу за сталого об'єму справедливо співвідношення  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ .

Наприклад, якщо абсолютна температура газу *збільшилась* у 2 рази, то тиск газу *збільшився* теж у 2 рази.

### ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПРОЦЕС (ЗА СТАЛОЇ ТЕМПЕРАТУРИ)

Процес, що відбувається з даною масою газу за сталої температури, називають *ізотермічним*. У ізотермічному процесі змінюються об'єм і тиск газу.

#### Проведемо дослід

Скористаємося вже знайомою нам установкою з гофрованою циліндричною посудиною (рис. 4.4).

Об'єм посудини можна змінювати, крутячи гвинт.

Сталість температури газу зумовлено контактом із навколишнім повітрям: якщо об'єм газу змінюється досить повільно, температура газу залишається такою, що дорівнює температурі навколишнього повітря.

Вимірюючи на досліді залежність тиску газу від його об'єму за сталої температури, ми побачимо, що

для *ізотермічного* процесу добуток тиску даної маси газу на його об'єм залишається сталим, тобто  $pV = \text{const}$  при  $T = \text{const}$ .

Це співвідношення було дослідно встановлено англійським ученим Робертом Бойлем і французьким ученим Едмом Маріоттом у другій половині 17-го століття, тому його називають **законом Бойля—Маріотта**.

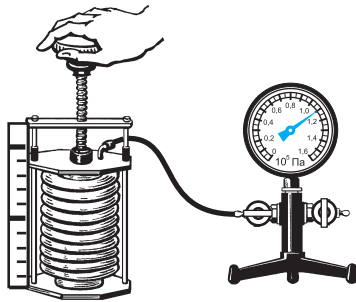


Рис. 4.4. Вивчення залежності тиску даної маси газу від об'єму за сталої температури. У разі зменшення об'єму газу його тиск збільшується.

Графік залежності тиску даної маси газу від об'єму за сталої температури зображено на рис. 4.5.

Цей графік називають *ізотермою*. Він показує, що за сталої температури тиск газу є **обернено пропорційним** до його об'єму.

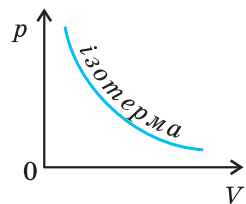


Рис. 4.5. Графік залежності  $p(V)$  при  $T = \text{const}$  (*ізотерма*).

Із закону Бойля—Маріотта випливає, що для двох станів (1 і 2) даної маси газу за сталої температури справедливо співвідношення  $p_1/p_2 = V_2/V_1$ . Наприклад, якщо об'єм газу в 3 рази **збільшився**, то тиск газу в 3 рази **зменшився**.

## 2. РІВНЯННЯ СТАНУ ГАЗУ

### РІВНЯННЯ КЛАПЕЙРОНА

Дотепер ми розглядали тільки такі газові процеси, за яких один із трьох параметрів, що характеризують стан даної маси газу (тиск  $p$ , об'єм  $V$  або температура  $T$ ), залишався незмінним. У загальному ж випадку в ході процесу можуть **змінюватися всі три параметри** —  $p$ ,  $V$  і  $T$ .

У першій половині 19-го століття французький фізик Еміль Клапейрон вивів співвідношення, яке пов'язує ці параметри:

для даної маси газу добуток тиску газу на його об'єм, поділений на абсолютну температуру газу, є величиною сталою, тобто:  $\frac{pV}{T} = \text{const}$  при  $m = \text{const}$ .

Це співвідношення називають **рівнянням Клапейрона**.

Легко помітити, що рівняння всіх трьох ізопроесів є окремими випадками рівняння Клапейрона. Справді, при  $p = \text{const}$  маємо  $V/T = \text{const}$ ; при  $V = \text{const}$  маємо  $p/T = \text{const}$ ; при  $T = \text{const}$  маємо  $pV = \text{const}$ .

Рівняння Клапейрона можна вивести з рівнянь для будь-яких двох ізопроесів.

### Виведення рівняння Клапейрона

Виведемо рівняння Клапейрона  $pV/T = \text{const}$ , уважаючи, що газ зі стану з параметрами  $p_1, V_1, T_1$  переходить до стану з параметрами  $p_2, V_2, T_2$  за допомогою двох послідовних ізопроесів — ізобарного та ізохорного (див. рис. 4.6):

- 1) змінимо за сталою тиску  $p_1$  об'єм газу від  $V_1$  до  $V_2$  (ізобарний процес); при цьому температура газу стане дорівнювати деякій температурі  $T'$ ;
- 2) змінимо за сталою об'єму  $V_2$  тиск газу від  $p_1$  до  $p_2$  (ізохорний процес); при цьому температура газу стане дорівнювати кінцевій температурі  $T_2$ .

Для першого процесу (ізобарного) справедливо співвідношення  $V_1/V_2 = T_1/T'$ , а для другого (ізохорного) — співвідношення  $p_1/p_2 = T'/T_2$ .

Перемножуючи ці співвідношення, дістаємо  $\frac{V_1 p_1}{V_2 p_2} = \frac{T_1 T'}{T' T_2} = \frac{T_1}{T_2}$ .

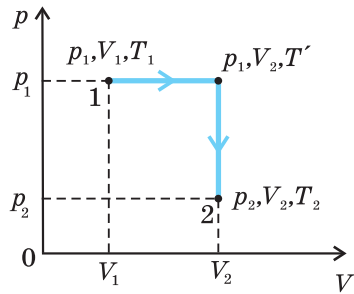


Рис. 4.6. До виведення рівняння Клапейрона.

Газ зі стану з параметрами  $p_1, V_1, T_1$  переходить до стану з параметрами  $p_2, V_2, T_2$  за допомогою ізобарного та ізохорного процесів.

Перетворимо це співвідношення так, щоб параметри, що характеризують стан 1, були в лівій частині рівності, а параметри, що характеризують стан 2, — у правій частині. Ми одержимо  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ . Оскільки це співвідношення справедливо для двох довільних станів 1 й 2 даної маси газу з параметрами  $p_1, V_1, T_1$  та  $p_2, V_2, T_2$ , звідси випливає, що для даної маси газу значення виразу  $\frac{pV}{T}$  є сталим.

### ЗАКОН АВОГАДРО

Ми бачили, що для процесів, які відбуваються з даною масою газу, значення виразу  $\frac{pV}{T}$  є сталим. Якщо ж маса газу в процесі змінюється, то змінюється й значення цього виразу. У цьому легко переконатися на власному досвіді. Надимайте шоки: при цьому одночасно збільшаться і тиск, і об'єм повітря в роті, а температура повітря залишиться практично незмінною (дорівнюватиме температурі тіла). Отже, значення виразу  $\frac{pV}{T}$  збільшилося!

Відповідь на запитання, від чого залежить значення цього виразу, дає закон, установлений Авогадро на початку 19-го століття дослідним шляхом:

За сталих температури і тиску в однакових об'ємах різних газів міститься **однакова кількість молекул**.

Із закону Авогадро випливає, що  $\frac{pV}{T} = kN$ , де коефіцієнт пропорційності  $k$  для всіх газів **однаковий**. Його назвали **сталюю Больцмана** на честь австрійського фізика Людвіга Больцмана,

одного з творців молекулярно-кінетичної теорії. Виміри показали, що  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Фізичний зміст сталої Больцмана ми обговоримо далі, у § 5. **Температура та середня кінетична енергія молекул.**

Із рівняння  $\frac{pV}{T} = kN$  випливає, що тиск газу можна дуже просто виразити через концентрацію газу  $n = \frac{N}{V}$  і його абсолютну температуру. Ми дістанемо:  $p = \frac{N}{V} kT = nkT$ .

Співвідношення  $p = nkT$  знадобиться нам у наступному параграфі для виведення співвідношення між абсолютною температурою та середньою кінетичною енергією молекул.

### РІВНЯННЯ МЕНДЕЛЄЄВА — КЛАПЕЙРОНА

Рівняння Клапейрона дозволяє порівнювати тиск, об'єм та температуру для двох станів **того самого** зразка газу, тобто даної маси та того самого хімічного складу. А чи можемо ми порівняти ці параметри для двох зразків газів, які відрізняються як масою, так і хімічним складом?

Так, можемо. Для цього треба тільки виразити у співвідношенні  $\frac{pV}{T} = kN$  кількість молекул  $N$  через масу газу  $m$  і його

молярну масу  $M$  за допомогою співвідношення  $N = \frac{m}{M} N_A$  (див. § 2. **Кількість речовини. Стала Авогадро**). Ми дістанемо:

$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} kN_A = \frac{m}{M} R$ , де  $R = kN_A$  — так звана **універсальна газова**

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

Здобуте співвідношення називають **рівнянням Менделєєва—Клапейрона**, оскільки воно вперше було виведене російським ученим Менделєєвим у другій половині 19-го століття. Його записують звичайно у вигляді

$$pV = \frac{m}{M} RT, \text{ де } m \text{ і } M \text{ — маса газу і молярна маса.}$$

Як ми бачимо, за допомогою цього рівняння дійсно можна порівнювати тиск, об'єм та температуру для двох зразків газів, які відрізняються як масою, так і хімічним складом.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Який процес називають ізобарним? Як пов'язані об'єм газу та його температура для ізобарного процесу? Запишіть відповідну формулу та зобразіть графік цього процесу.
2. Який процес називають ізохорним? Як пов'язані тиск газу та його температура для ізохорного процесу? Запишіть відповідну формулу та зобразіть графік цього процесу.
3. Який процес називають ізотермічним? Як пов'язані тиск газу та його об'єм для ізотермічного процесу? Запишіть відповідну формулу та зобразіть графік цього процесу.
4. Яким є співвідношення між тиском, об'ємом і температурою для даної маси газу? Як називають це співвідношення?
5. Сформулюйте закон Авогадро.
6. Запишіть рівняння Менделєєва—Клапейрона. Які величини входять до цього рівняння?

## § 5. TEMPERATURA ТА СЕРЕДНЯ КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЯ МОЛЕКУЛ

1. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії
2. Абсолютна температура та середня кінетична енергія молекул
3. Швидкості молекул

*У цьому параграфі ми розповімо, як молекулярно-кінетична теорія пояснює властивості газів, розглянуті в попередніх параграфах.*

*При цьому стане зрозумілим фізичний зміст абсолютної температури: ми побачимо, що вона пропорційна до середньої кінетичної енергії молекул.*

### 1. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

#### ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ

Найпростіший стан речовини — газ, у якому взаємодією молекул між їх зіткненнями можна знехтувати. Це так, якщо відстані між молекулами набагато перевищують розміри самих молекул.

Модель реального газу, у якій нехтують розмірами молекул газу та взаємодією молекул між зіткненнями, називають *ідеальним газом*.

Може виникнути запитання: наскільки властивості ідеального газу відповідають властивостям реальних газів, наприклад навколишнього повітря? Порівняння висновків молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу з експериментальними даними свідчить, що властивості досить розрідженого газу (саме таким можна вважати й навколишнє повітря) з хорошою точністю збігаються з властивостями ідеального газу.

#### ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Як уже зазначалося, тиск газу зумовлено ударами молекул. Переконаємося на досліді в тому, що дрібні удари багатьох невеликих частинок створюють постійну силу тиску.



Якщо сипати на аркуш тонкого картону пісок рівномірним потоком, то аркуш постійно перебуватиме в зігнутому положенні, так якби на нього діяла **постійна** сила, хоча деформація картону зумовлена **окремими ударами** піщинок (рис. 5.1).

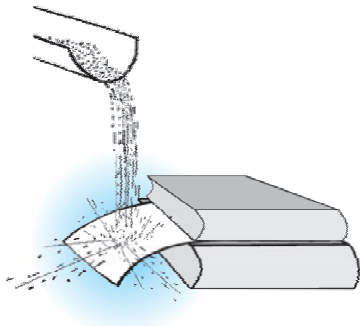


Рис. 5.1. Демонстрація виникнення постійної сили тиску. Часті удари невеликих частинок створюють постійну силу тиску.

У середині 19-го століття німецький фізик Рудольф Клаузіус, виходячи з припущення, що тиск газу спричинено ударами молекул, вивів співвідношення, яке пов'язує тиск газу  $p$  з концентрацією молекул  $n$ , масою молекули  $m_0$  і середнім значенням квадрата швидкості молекули  $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}$ , де  $v_i$  — модуль швидкості  $i$ -тої молекули. Це співвідношення називають

**основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу.** Воно має вигляд  $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$ .

Оскільки середня кінетична енергія поступального руху молекули  $\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ , основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії

можна записати також у вигляді  $p = \frac{2}{3} n \overline{E}$ .

Значення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії полягає в тому, що воно виражає **макроскопічний** параметр (тиск газу) через **мікроскопічні** параметри — концентрацію молекул, масу молекули та середній квадрат швидкості (або середню кінетичну енергію) молекул.

### Про виведення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії

Виведення цього рівняння є досить громіздким. Оскільки надалі нам знадобляться тільки наслідки з цього рівняння, ми обмежимося тут якісними міркуваннями, на яких ґрунтується його виведення.

Сила тиску газу на стінку посудини пропорційна до імпульсу, який щосекунди передають стінці молекули, ударяючись об стінку (якби стінку не утримували зовнішні сили, сила тиску газу надала б їй руху).

Уважатимемо для простоти, що всі молекули газу рухаються з однаковою швидкістю, модуль якої дорівнює  $v$ . Передаваний щосекунди молекулами стінці імпульс пропорційний до частоти ударів (яка пропорційна до добутку концентрації молекул на їхню швидкість, тобто  $nv$ ) і до імпульсу молекули  $m_0 v$ . Отже, тиск газу має бути пропорційним до виразу  $nm_0 v^2$ . Числовий коефіцієнт  $1/3$  зумовлений тривимірністю простору й тим, що за хаотичного руху всі напрямки швидкості молекул рівноймовірні.

## 2. АБСОЛЮТНА ТЕМПЕРАТУРА ТА СЕРЕДНЯ КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЯ МОЛЕКУЛ

Знайдемо тепер співвідношення між середньою кінетичною енергією поступального руху молекул  $\overline{E}$  та абсолютною температурою газу  $T$ .

Порівняємо для цього два вирази для тиску: основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії, записане у вигляді  $p = \frac{2}{3} n \overline{E}$ , і рівняння стану ідеального газу, записане у вигляді  $p = nkT$  (див. § 4. Газові закони).

Ліві частини цих виразів однакові. Прирівнюючи їхні праві частини, доходимо висновку:

середня кінетична енергія поступального руху молекул  $\overline{E}$  пов'язана з абсолютною температурою  $T$  співвідношенням  $\overline{E} = \frac{3}{2} kT$ , де  $k$  — стала Больцмана.

Здобуте співвідношення розкриває фізичний зміст абсолютної температури: ми бачимо, що **абсолютна температура є мірою середньої кінетичної енергії руху молекул.**

### ФІЗИЧНИЙ ЗМІСТ СТАЛОЇ БОЛЬЦМАНА

Температура, як ми зараз побачили, є **енергетичною** характеристикою, тому її можна було б вимірювати в джоулях як середню кінетичну енергію молекул. Однак задовго до того, як було розкрито фізичний

зміст температури, її почали вимірювати в градусах. І нині в розділах науки і техніки, пов'язаних із тепловими явищами, використовують як джоуль, так і градус. А «перевідним множником» між ними, за формулою  $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$ , є стала Больцмана.

### 3. ШВИДКОСТІ МОЛЕКУЛ

За допомогою основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії швидкість молекул газу можна виразити через його абсолютну температуру  $T$  і молярну масу  $M$ .

Можна довести, що  $v_{\text{с.кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ , де  $v_{\text{с.кв}} = \sqrt{v^2}$  — так звана **середня квадратична швидкість**, яку використовують для оцінки середнього значення модуля швидкості молекул.

Із формули  $v_{\text{с.кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$  випливає, що за тієї самої температури молекули «легкіших» газів (із менш масивними молекулами і, виходить, з меншою молярною масою) рухаються з більшими швидкостями. Наприклад, середня швидкість молекул водню в 4 рази більша за середню швидкість молекул кисню.

#### Приклад

Оцінимо, користуючись наведеною формулою, швидкість молекул у повітрі за кімнатної температури.

Повітря складається переважно з молекул азоту і кисню, для яких

$M \approx 30 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ , а кімнатна температура  $t = 20^\circ\text{C}$ , що відповідає

$T \approx 300 \text{ K}$ . З наведеної вище формули маємо  $v_{\text{с.кв}} \approx 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Швидкість же молекул водню за кімнатної температури становить близько  $2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ! Отож молекули справді рухаються зі швидкостями артилерійських снарядів!

#### ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ МОЛЕКУЛ

Значення швидкостей молекул, які впливали з молекулярно-кінетичної теорії, навіть наприкінці 19-го століття здавалися деяким ученим неймовірно великими, що було одним із головних заперечень проти цієї теорії.

Одним з перших швидкість молекул виміряв німецький фізик Отто Штерна на початку 20-го століття у такий спосіб.

Уздовж спільної осі двох жорстко з'єднаних циліндрів  $A$  і  $B$  розміщено вкритий сріблом дріт, який нагрівали електричним струмом (рис. 5.2). Повітря з простору між циліндрами було відкачано. Атоми Аргентуму ( $\text{Ag}$ ) випаровувалися з поверхні дроту і, пролітаючи крізь вузьку щілину в циліндрі  $A$ , осідали вузькою світлою смугою 1 на внутрішній поверхні циліндра  $B$ .

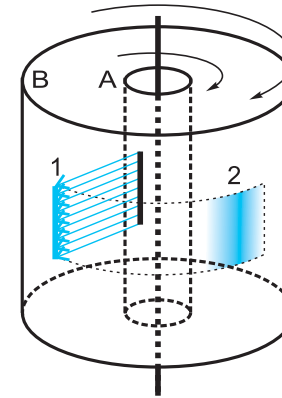


Рис. 5.2. Схема дослідження Штерна з вимірювання швидкостей молекул. Поки молекули пролітають від циліндра  $A$  до циліндра  $B$ , з'єднані циліндри встигають обернутися на деякий кут.

Потім з'єднані разом циліндри починали швидко обертати навколо осі (напрямок обертання показано на рисунку стрілками). При цьому смуга 1 зміщувалась і розширювалася, перетворюючись на смугу 2 (див. рисунок). Зсув смуги зумовлено тим, що за той час, поки атоми Аргентуму ( $\text{Ag}$ ) пролітають від циліндра  $A$  до циліндра  $B$ , ці циліндри встигають обернутися на деякий кут. Знаючи радіуси циліндрів і частоту їхнього обертання та вимірявши зсув смуги, можна розрахувати швидкість атомів Аргентуму ( $\text{Ag}$ ). Розширення ж смуги спричинено тим, що внаслідок «теплого» руху атоми мають різні швидкості.

Результати дослідження Штерна підтвердили висновки молекулярно-кінетичної теорії.

#### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке ідеальний газ? Наскільки близькі за своїми властивостями реальні гази до ідеального газу?
2. Запишіть основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу.
3. Як пов'язані температура та середня кінетична енергія поступального руху молекул?

4. У чому полягає фізичний зміст сталої Больцмана?
5. Як залежить швидкість молекул від абсолютної температури газу та його молярної маси?
6. Як було виміряно швидкість молекул?
7. Ртутний термометр показує температуру 37 °С. Якій абсолютній температурі відповідає така температура?
8. Чи може людина перебувати за температури 300 К? Якій температурі за Цельсієм вона відповідає?
9. У посудині міститься деяка маса ідеального газу. Об'єм газу збільшили в 2 рази, а абсолютну температуру зменшили в 2 рази. Як змінився тиск газу?
10. У посудині міститься деяка маса ідеального газу. Об'єм газу зменшили в 2 рази, а тиск газу збільшили в 2 рази. Як змінилась абсолютна температура газу?
11. Абсолютна температура ідеального газу збільшилася в 3 рази. Як змінилася середня кінетична енергія молекул?

## § 6. ВЗАЄМНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ РІДИН І ГАЗІВ

1. Випаровування та конденсація
2. Насичена та ненасичена пара
3. Вологість

*Ми розповімо тут про особливості взаємного перетворення рідин і газів.*

*Ви довідається, чому рідина, випаровуючись, охолоджується, що таке насичена та ненасичена пара, чим кипіння відрізняється від випаровування, і чому роса випадає в передранкові години.*

### 1. ВИПАРОВУВАННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЯ

Процес перетворення рідини на пару називають **пароутворенням**.

Якщо пароутворення відбувається з поверхні рідини, його називають **випаровуванням**.

Випаровування відбувається за будь-якої температури: наприклад, вода поступово «зникає» з відкритої посудини, а калюжі після дощу висихають.

#### ЧОМУ РІДИНА ПРИ ВИПАРОВУВАННІ ОХОЛОДЖУЄТЬСЯ?

Під час випаровування з рідини вилітають найшвидші молекули, оскільки тільки в них кінетичної енергії вистачає, щоб вирватися з рідини, подолавши притягання інших молекул. А залишаються в рідині повільніші молекули, унаслідок чого **середня** кінетична енергія молекул, які залишилися, зменшується. А оскільки температура пропорційна до середньої кінетичної енергії молекул, то рідина, випаровуючись, охолоджується.

Що швидше випаровується рідина, то сильніше вона охолоджується. Потріть руку ваткою, змоченою у воді, а потім — ваткою, змоченою в одеколоні: у другому випадку відчуття прохолоди буде сильнішим, тому що одеколон випаровується швидше, ніж вода.

Усім знайоме відчуття прохолоди під час виходу з води після купання. На вітру це відчуття прохолоди значно посилюється, оскільки випаровування відбувається швидше.

Процес, зворотний пароутворенню, тобто перетворення пари на рідину, називають **конденсацією**.

## Чи можуть випаровуватися тверді тіла?

Як відомо, замерзла на морозі білизна висихає: лід випаровується, тобто перетворюється на пару, минаючи рідинний стан (воду). Можна помітити також, як із твердого стану на газоподібний перетворюється йод: жовта пляма від йоду світлішає і згодом зникає. Однак лід і йод не є винятками: експерименти свідчать, що випаровуються всі тверді тіла, але більшість із них випаровуються настільки повільно, що ми цього не помічаємо.

## 2. НАСИЧЕНА ТА НЕНАСИЧЕНА ПАРА

### ДИНАМІЧНА РІВНОВАГА

Добре відомо: якщо посудина з рідиною щільно закрита, рівень рідини в посудині залишається незмінним. Чи означає це, що процес випаровування в закритій посудині не відбувається?

Звичайно, ні: адже в рідині, як і раніше, є «швидкі» молекули, що безперервно вилітають із неї.

Але річ у тім, що одночасно з випаровуванням завжди відбувається й зворотний процес — конденсація: з пари, що перебуває над поверхнею рідини, молекули влітають назад у рідину.

Якщо рівень рідини згодом не змінюється, це означає, що процеси випаровування та конденсації відбуваються з однаковою швидкістю: щосекунди з рідини вилітає в середньому стільки ж молекул, скільки і влітає в рідину.

У такому разі кажуть, що рідина і пара перебувають у *динамічній рівновазі*.

### НАСИЧЕНА ПАРА

Пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають *насиченою парюю*. На рис. 6.1 схематично зображено процеси випаровування та конденсації у випадку насиченої пари.

Саме насичена пара і перебуває над поверхнею рідини в щільно закритій посудині — тому рівень рідини в посудині залишається незмінним.

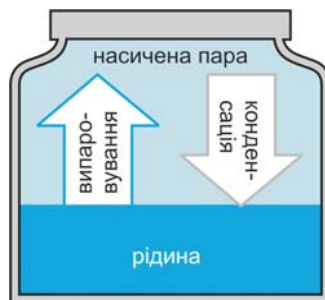


Рис. 6.1. Насичена пара над поверхнею рідини в закритій посудині. Випаровування та конденсація відбуваються з однаковою швидкістю. Рівень рідини не змінюється з часом.

### НЕНАСИЧЕНА ПАРА

Якщо посудину з рідиною відкрити, пара почне виходити назовні. Її концентрація в посудині зменшиться, і внаслідок цього молекули пари будуть рідше влітати в рідину, тобто процес конденсації сповільниться. А оскільки швидкість випаровування залишиться тою самою, рівень рідини в посудині почне знижуватися.

Якщо процес випаровування відбувається швидше, ніж процес конденсації, кажуть, що над рідиною перебуває *ненасичена пара* (рис. 6.2).

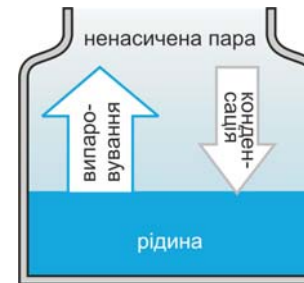


Рис. 6.2. Ненасичена пара над поверхнею рідини в відкритій посудині. Конденсація відбувається повільніше, ніж випаровування. Рівень рідини знижується.

Над морями й океанами перебуває зазвичай ненасичена пара, тобто випаровування переважає конденсацію. Пара, що піднімається вгору, охолоджується та конденсується, утворюючи хмарки. Вони перетворюються на дошові хмари і проливаються дощами. А річки згодом відносять воду назад у моря й океани.

### КИПІННЯ

У рідині завжди є маленькі бульбашки повітря. Рідина випаровується всередині цих бульбашок, у результаті чого пара всередині бульбашок стає насиченою. Якщо тиск насиченої пари менший за тиск усередині рідини (для неглибоких посудин він практично дорівнює атмосферному), ці бульбашки не зможуть рости, тобто пароутворення відбуватиметься лише з вільної поверхні рідини.

Однак тиск насиченої пари швидко зростає зі зростанням температури: адже що вища температура, то більша середня кінетична енергія молекул, і, отже, велика їхня частина може вирватися з рідини, подолавши притягання інших молекул. Якщо нагрівати рідину, то за певної температури тиск насиченої пари стане дорівнювати тиску в рідині (приблизно атмосферному) і почнеться інтенсивне випаровування рідини всередину бульбашок. Наповнюючись парюю, бульбашки швидко зростатимуть, піднімаючись вгору та лопаючись на поверхні рідини. Ця картина добре всім знайома — ідеться про *кипіння*.

Отже, рідина кипить за температури, за якої тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тиску. Цю температуру називають **температурою кипіння**. Температура кипіння води за атмосферного тиску дорівнює 100 °С.

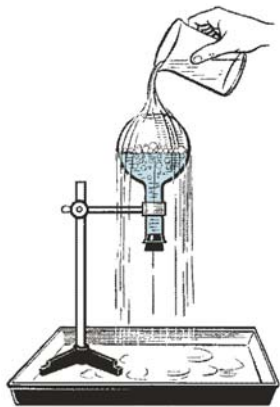
#### Чи може вода кипіти за температури, яка не дорівнює 100 °С?

Оскільки тиск насиченої пари зі зростанням температури підвищується, то, збільшуючи зовнішній тиск, можна підвищити й температуру кипіння. На цьому засновано дію кастроль-скороварок: у них створюється тиск, удвічі більший за атмосферний, унаслідок чого температура кипіння підвищується до 120 °С. Це прискорює готування їжі в кілька разів.

У разі зменшення зовнішнього тиску температура кипіння знижується. Наприклад, у горах, де тиск повітря менший, ніж на рівні моря, вода кипить за температури нижче 100 °С: на висоті 5 км — за температури 83 °С. Отже, зварити м'ясо в горах — непросте справа.

#### Проведемо дослід

Доведемо воду в колбі до кипіння і щільно закриємо її. Коли вода трохи охолоне, перевернемо колбу і почнемо поливати її дно холодною водою. Вода в колбі закипить, хоча її температура нижче 100 °С (рис. 6.3).



*Рис. 6.3. Кипіння води за зниженого тиску. У разі охолодження водяна пара над поверхнею води сконденсувалася, унаслідок чого тиск у колбі різко знизився. А за зниженого тиску вода кипить за температури нижче 100 °С.*

### 3. ВОЛОГІСТЬ

Уміст водяної пари в повітрі характеризують тиском, який чинила б ця пара, якби інших газів не було.

Наприклад, тиск насиченої водяної пари за кімнатної температури становить близько 2 % від атмосферного тиску.

Тиск ненасиченої пари менший, ніж тиск насиченої. Тому ступінь «насиченості» водяної пари можна визначити як відношення тиску водяної пари до тиску насиченої пари за тієї ж температури. Цю величину, виражену у відсотках, називають відносною вологістю і позначають  $\varphi$ . Отже,

**відносна вологість**  $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$ , де  $p$  — тиск водяної пари за даної температури,  $p_n$  — тиск насиченої пари за тієї самої температури.

Відносна вологість є досить важливою для самопочуття людини, оскільки від неї залежить швидкість випаровування води. Комфортні умови для людини відповідають вологості 50–60%.

Вологість вимірюють за допомогою спеціальних приладів, один із яких називають **психрометром**. Психрометр складається з двох термометрів: сухого і вологого. Через випаровування води вологий термометр зазвичай показує нижчу температуру, ніж сухий: що нижча відносна вологість, то більша різниця показів термометрів. На основі цих показів за допомогою психрометричної таблиці визначають відносну вологість повітря.

#### ЧОМУ РОСА ВИПАДАЄ В ПЕРЕДРАНКОВІ ГОДИНИ?

Тиск насиченої пари  $p_n$  зменшується зі зниженням температури. Тому згідно з формулою  $\varphi = (p/p_n) \cdot 100\%$  за того самого тиску водяної пари  $p$  її відносна вологість зі зниженням температури збільшується і за деякої температури може стати рівною 100%. Нижче цієї температури, яку називають **точкою роси**, починається конденсація водяної пари, тобто випадає роса.

Найхолодніший час доби — це передранкові години. Ось чому роса випадає перед сходом сонця. І літнього ранку ми милуємося крапельками роси, що іскряться на траві, а зимового ранку — деревами, одягненими в мережива інею.

#### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке випаровування та конденсація?
2. Чому рідина, випаровуючись, охолоджується?
3. Що таке насичена пара?
4. Що таке кипіння? Чим воно відрізняється від випаровування? Якою є температура кипіння води за атмосферного тиску?
5. Що таке відносна вологість?
6. Чому роса випадає в передранкові години?

## § 7. ВЛАСТИВОСТІ РІДИНИ

1. Поверхневий натяг
2. Змочування. Капілярні явища
3. Явища змочування та капілярності в побуті, природі й техніці

Ми розглянемо тут основні властивості поверхні рідини, які виявляються в тому, що рідина самочинно намагається зменшити площу своєї поверхні.

Розглянемо також явища змочування та капілярності, прояви їх у побуті, природі й техніці.

### 1. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ

#### ЧОМУ КРАПЛІ КРУГЛІ?

Твердження, що рідина «не має своєї форми», а завжди набуває форми посудини, не є зовсім правильним: добре відомо, що маленькі краплі рідини набувають не будь-якої, а саме **кулястої** форми (див. рис. 7.1). У стані невагомості (у космічному кораблі) форми кулі набуває й велика маса рідини.



Рис. 7.1. Куляста форма крапель зумовлена тим, що рідина намагається зменшити площу своєї поверхні.

Із чим же це пов'язано? Річ у тім, що, як буде обґрунтовано нижче, рідина самочинно намагається **зменшити** площу своєї поверхні, а з усіх тіл із заданим об'ємом найменшу площу поверхні має куля.

У найбільш звичному для нас випадку, коли рідина перебуває у спокої в посудині поблизу поверхні Землі, самочинному зменшенню площі поверхні рідини перешкоджають сили, що діють на рідину, а саме: сила тяжіння і сила тиску стінок посудини. Вони і «змушують» рідину набувати форми посудини. Але для маленької крапельки, тим більше для такої, що падає, основ-

ну роль в утворенні її форми відіграють властивості самої рідини, а не зовнішні сили, що діють на неї.

#### Проведемо досліди

Аби переконатися в тому, що рідина намагається зменшити площу своєї поверхні, проведемо такі досліди.

1. З'єднаємо дві діаметрально протилежні точки дротяного кільця тонкою ниткою (не натягаючи її) і зануримо його в мильний розчин. Кільце затягнеться **плоскою** мильною плівкою, на якій вільно лежить нитка (рис. 7.2а). Те, що плівка плоска, уже свідчить про її намагання зменшити площу своєї поверхні. Якщо проколоти плівку з одного боку від нитки, то частина плівки, що залишилася, скоротиться, унаслідок чого нитка натягнеться (рис. 7.2б).

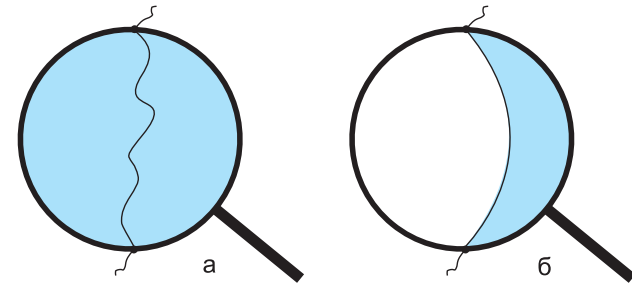


Рис. 7.2. Властивість мильної плівки: а) плоска мильна плівка на кільці відповідає мінімально можливій площі плівки; б) коли плівку прокололи ліворуч від нитки, площа частини плівки, що залишилася, зменшується, у результаті чого нитка натягується.

2. Візьмемо прямокутну дротяну рамку, одна сторона якої рухома (рис. 7.3а).

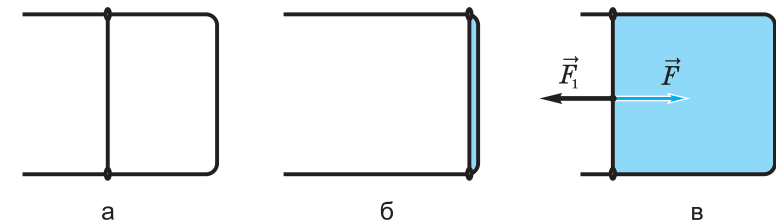


Рис. 7.3. Досліди з прямокутною дротяною рамкою, які свідчать про наявність поверхневого натягу.

Якщо занурити таку рамку в мильний розчин, рухома сторона рамки притягнеться до протилежної сторони, скоротивши площу мильної плівки до мінімально можливої (рис. 7.3б). Щоб збільшити площу плівки, необхідно прикласти до рухомої сторони рамки деяку силу  $\vec{F}_1$  (рис. 7.3в). Виходить, із боку плівки на рамку також діє сила  $\vec{F}$ , яка дорівнює за модулем силі  $\vec{F}_1$  і напрямлена протилежно їй.

### СИЛА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ТА ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ

Силу, з якою рідина діє на контур, що обмежує її поверхню, і яка прагне зменшити площу поверхні рідини, називають *силою поверхневого натягу*.

Досліди показують, що сила поверхневого натягу  $F$  пропорційна до довжини контуру  $l$ , тому *відношення*  $F/l$  не залежить від контуру і характеризує дану рідину.

Відношення сили поверхневого натягу  $F$  до довжини контуру  $l$  називають *поверхневим натягом* і позначають  $\sigma$ . Отже,  $\sigma = F/l$ .

Поверхневий натяг вимірюють в Н/м. Наприклад, поверхневий натяг води за кімнатної температури дорівнює приблизно 73 мН/м.

### ПОВЕРХНЕВА ЕНЕРГІЯ

Виникає запитання: *чому* рідина самочинно намагається зменшити площу своєї поверхні?

Річ у тім, що молекули в поверхневому шарі рідини мають деяку надлишкову потенціальну енергію в порівнянні з молекулами в товщі рідини. Цю енергію називають *поверхневою енергією*. Будь-яка система «прагне», якщо це можливо, зменшити свою потенціальну енергію, а в даному разі це веде до того, що рідина «прагне» зменшити площу своєї поверхні.

#### Чому молекули в поверхневому шарі рідини мають надлишкову енергію?

Щоб витягти молекулу з рідини, треба подолати притягання інших молекул, тобто виконати *додатну* роботу і, виходить, *збільшити* потенціальну енергію молекули.

Молекула в поверхневому шарі рідини ніби «наполовину виврана» з рідини в тому розумінні, що вона взаємодіє з меншою кількістю сусідів, аніж молекула в товщі рідини (див. рис. 7.4). Виходить, потенціальна енергія такої «поверхневої» молекули *більша*, ніж потенціальна енергія молекули в товщі рідини. А це й означає, що молекули поверхневого шару мають *надлишкову енергію* порівняно з молекулами в товщі рідини.

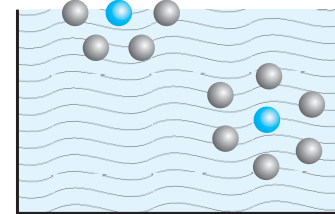


Рис. 7.4. Схематичне зображення молекул, розташованих на поверхні рідини й у товщі рідини. Перші мають менше «сусідів», аніж другі.

## 2. ЗМОЧУВАННЯ. КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА

### ЗМОЧУВАННЯ

По чистому склу вода розтікається, прагнучи збільшити площу стикання зі склом. Зумовлено це тим, що молекули води сильніше притягаються до молекул, із яких складається скло, ніж одна до одної. У такому разі кажуть, що рідина *змочує* тверде тіло.

Ртуть по склу не розтікається, тому що молекули ртуті сильніше притягаються одна до одної, ніж до молекул, із яких складається скло. Оскільки ртуть не змочує скло, пролита на скло ртуть збирається в кулясті крапельки, форму яких, як ми вже знаємо, визначають сили поверхневого натягу.

З тієї ж причини збирається в крапельки і вода на вкритій жиром поверхні: вода не змочує такі поверхні.

### КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА

Унаслідок змочування вода піднімається по тонких скляних трубках, причому, що меншим є внутрішній діаметр трубки, то вище піднімається вода (рис. 7.5). Тонкі трубки називають *капілярами*<sup>1</sup>, тому явище підняття рідини в тонких трубках називають *капілярністю*.

Якщо рідина не змочує поверхню трубки, то рідина буде не підніматись, а опускатися в трубці — так відбувається, наприклад, із ртуттю у скляній трубці.

<sup>1</sup> Від латинського слова «капілярис» — волос.



*Рис. 7.5. Підняття води в скляному капілярі.  
Що меншим є внутрішній діаметр капіляра, то вище піднімається вода.*

### Висота підняття рідини в капілярі

Розрахунки й досліди показують, що висоту  $h$  підняття рідини в капілярі, який змочується цією рідиною, визначають формулою  $h = \frac{2\sigma}{\rho gr}$ , де  $\sigma$  — поверхневий натяг даної рідини,  $\rho$  — густина рідини,  $g$  — прискорення вільного падіння,  $r$  — радіус капіляра.

З наведеної формули видно: що меншим є радіус капіляра, то більша висота підняття рідини в капілярі.

## 3. ЯВИЩА ЗМОЧУВАННЯ ТА КАПІЛЯРНІСТЬ В ПОБУТІ, ПРИРОДІ Й ТЕХНІЦІ

Явища змочування та капілярності часто трапляються нам в повсякденному житті.

Наприклад, коли ви витираєтеся рушником, він «збирає» воду з тіла завдяки тому, що тканина змочується водою, а між волокнами тканини є дрібні пори, куди «просочується» вода внаслідок капілярності. Здатність усмоктувати воду в природних тканин набагато вища, ніж у синтетичних, тому що природні тканини краще змочуються водою й відстані між волокнами в цих тканин набагато менші, ніж у синтетичних. От чому рекомендують носити одяг (особливо той, що безпосередньо прилягає до тіла), зроблений тільки з природних тканин: ці тканини набагато краще всмоктують піт.

Ви, звичайно, помічали, що вимити посуд холодною водою важко, особливо якщо їжа була жирною. Причина в тому, що жир практично не змочується холодною водою. Використання гарячої води істотно полегшує справу, тому що поверхневий натяг води зменшується зі збільшенням температури і гаряча вода змочує жир значно краще. Ще більшого успіху можна досягти,

використовуючи мийні засоби: вони зменшують поверхневий натяг майже вдвічі. Мильна вода змочує жир, прилипаючи до нього і несучи його із собою. Тому за допомогою мийних засобів можна мити посуд навіть холодною водою. Переважно завдяки зменшенню поверхневого натягу мило (або інші мийні засоби) застосовують також для миття рук і тіла, а також у пранні.

Змочування відіграє велику роль і в промисловості. Наприклад, для фарбування або паяння потрібно забезпечити якомога повніше змочування. Змочування використовують також для збагачення руд кольорових металів, зважаючи на те, що деякі рідини змочують металеві з'єднання, але не змочують порожню породу.

Іноді потрібно, навпаки, зменшити змочування. Так, фундамент будинку покривають спеціальними гідроізоляційними матеріалами (наприклад, смолою), які не змочуються водою. Ці матеріали ізолюють будинок від ґрунтової вологи, яка інакше піднімалася б по порах цеглин, які змочуються водою.

Зменшенням змочування «користуються» й водоплавні птахи: їхнє пір'я покрите жиром, який не змочується водою. З тієї самої причини білі ведмеді можуть плавати у крижаній воді, бо вилізять з неї практично сухими. Тож «вийти сухим із води» справді можна! Для цього досить намаститися (або бути намащеним від природи) яким-небудь жиром.

Капілярність використовують не тільки тварини і птахи, але й рослини: зокрема, завдяки їй ґрунтові води піднімаються по стеблах рослин.

### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Опишіть досліди, які доводять, що рідина самочинно намагається зменшити площу своєї поверхні.
2. Що таке сила поверхневого натягу?
3. Що таке поверхневий натяг?
4. Що таке змочування?
5. Наведіть приклади змочування та незмочування.
6. Що таке капілярні явища?
7. Як залежить висота підняття рідини в капілярі від його радіуса?
8. Наведіть приклади прояву змочування та капілярності в побуті, природі й техніці.



## § 8. КРИСТАЛІЧНІ Й АМОРФНІ ТІЛА

1. Кристалічні тіла
2. Аморфні тіла
3. Інші стани речовини

У цьому параграфі ми розглянемо будову твердих тіл — кристалічних і аморфних.

Ми розповімо також про речовини, проміжні за своїми властивостями між кристалами та рідинами, — рідинні кристали, про плазму — найпоширеніший стан речовини у Всесвіті, а також про молекулярну будову живих організмів.

### 1. КРИСТАЛІЧНІ ТІЛА

Тверді тіла бувають кристалічними й аморфними. Розглянемо спочатку кристали.

Приклади кристалів — кухонна сіль, алмаз, метали.

У кристалах атоми або молекули розташовані **впорядковано**, утворюючи **кристалічну ґратку**.

Тому кажуть, що в кристалічних тілах існує **далекий порядок** у розташуванні атомів.

Наприклад, у кристалі кухонної солі ( $\text{NaCl}$ ) атоми Натрію та Хлору строго чергуються, розташовуючись у вершинах куба (рис. 8.1).

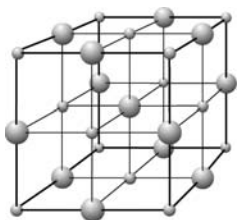


Рис. 8.1. Схематичне зображення кристалічної ґратки кухонної солі ( $\text{NaCl}$ ).

Атоми Натрію та Хлору умовно позначені кульками різних діаметрів. У реальному кристалі ці атоми розташовані практично впритул один до одного.

Найсупорішій порядок у розташуванні атомів кристала викликає запитання: що ж «змушує» атоми вишиковуватися в такому порядку? Відповідь на це запитання дає такий дослід.

### Проведемо дослід

Насиплемо на ввігнуте скло однакові маленькі металеві кульки й почнемо легенько струшувати скло. Ми побачимо, що через деякий час кульки розташуються в суворому порядку, який дуже нагадує розташування атомів у кристалі (рис. 8.2).

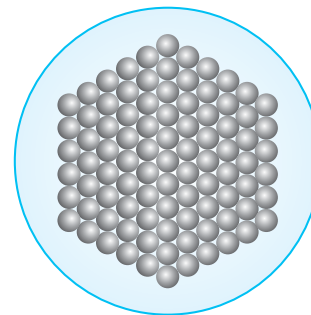


Рис. 8.2. Розташування кульок на годинниковому склі моделює утворення кристалічної ґратки. Положення кульок відповідає мінімальному значенню потенціальної енергії.

Розгадка такого упорядкування полягає в тому, що кульки розташовуються на ввігнутому склі в найнижчому з можливих положень, яке відповідає **мінімальному значенню потенціальної енергії кульок**.

З тієї ж самої причини впорядковуються й атоми кристала: вони займають положення, що відповідає мінімальному значенню потенціальної енергії взаємодії атомів.

### ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИСТАЛА ВІД ТИПУ КРИСТАЛІЧНОЇ ҐРАТКИ

Властивості кристала визначаються не тільки видом атомів, але й типом кристалічної ґратки. Пояснимо це на прикладі графіту й алмазу. Як не дивно, але м'який чорний графіт і твердий прозорий алмаз складаються з **тих самих** атомів — атомів Карбону.

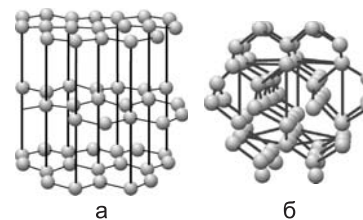


Рис. 8.3. Кристалічні ґратки графіту (а) й алмазу (б). Ці настільки різні за своїми властивостями речовини складаються з тих самих атомів.

Кристалічна ґратка графіту має шарувату структуру, причому ці шари слабо зв'язані один з одним, тому що відстань між ними в кілька разів

більша, ніж відстань між сусідніми атомами в одному шарі (рис. 8.3а). Тому шари легко відокремлюються один від одного, чим і зумовлена «м'якість» графіту.

У кристалічній ґратки алмаза всі атоми сильно зв'язані зі своїми найближчими сусідами. Саме цей жорсткий зв'язок атомів і спричинює унікальну твердість алмазу (рис. 8.3б).

## ПЛАВЛЕННЯ КРИСТАЛІЧНИХ ТІЛ

Перехід речовини з кристалічного стану в рідинний називають **плавленням**.

Зворотний процес, за якого речовина переходить із рідинного стану в кристалічний, називають **кристалізацією**, або **твердненням**.

Досліди показують, що

кристали плавляться за певної температури, яку називають **температурою плавлення**.

### Проведемо дослід

Помістимо бурульку або кубик льоду над полум'ям спиртівки. Ми побачимо, що бурулька тоне, але лід залишається твердим тілом (рис. 8.4).



Рис. 8.4. Плавлення льоду. Нагріваючись, лід не розм'якшується, а перетворюється на воду.

Виміри показують, що температура тіла впродовж усього процесу плавлення залишається сталою.

Саме завдяки сталості температури в процесі плавлення температуру плавлення льоду (або, що те саме, температуру замерзання води) і вибрали як одну з опорних точок температурної шкали Цельсія.

Температури плавлення для різних речовин можуть відрізнятися на тисячі градусів.

### Приклади

Лід плавиться за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ : за температури вище  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  вода є рідинною, а за температури нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  – це тверда речовина (лід). За температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  може існувати суміш льоду з водою, наприклад мокрий сніг.

Дуже низькі температури плавлення мають речовини, які ми звикли вважати газами: наприклад, водень плавиться за температури  $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а кисень – за температури  $-218\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Залізо плавиться за температури  $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а найбільш тугоплавкий метал – вольфрам – має температуру плавлення  $3387\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однак усім відомий і метал, який залишається рідиною навіть за кімнатної температури, – це ртуть (її температура плавлення нижча, ніж температура плавлення води: вона дорівнює  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

## 2. АМОРФНІ ТІЛА

Прикладами аморфних тіл є смола та скло.

В аморфних тілах зберігається порядок у розташуванні тільки найближчих «сусідів», тому кажуть, що

в аморфних тілах є «ближній порядок» у розташуванні атомів і молекул.

### ПЛИННІСТЬ І РОЗМ'ЯКШЕННЯ АМОРФНИХ ТІЛ У РАЗІ ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Через наявність лише ближнього порядку атоми або молекули в аморфних тілах час від часу «перескакують» із одного положення в інше. Якщо на аморфне тіло діють зовнішні сили, «перескоки» молекул в одному напрямку відбуваються частіше, ніж в іншому. Унаслідок цього форма тіла поступово змінюється, тобто аморфні тіла мають **плинність**<sup>1</sup>.

Скло має плинність навіть за кімнатної температури, хоча і тече надзвичайно повільно: наприклад, шибки поступово товщають донизу, але це помітно тільки для вікон дуже старих будинків.

Із зростанням температури частота перескоків молекул або атомів збільшується, і аморфне тіло, **поступово розм'якшується**, перетворюється на рідину. Отже, на відміну від кристалів,

аморфні тіла не мають певної температури плавлення.

Наприклад, якщо скло нагріти, воно стає настільки м'яким, що його можна ліпити. Цю властивість скла широко використовують в мистецтві та на виробництві – завдяки їй скляним виробам можна надавати практично будь-якої форми.

<sup>1</sup> Тому такі тіла й називають аморфними: грецькою «аморфос» — що не має форми.

### Проведемо дослід

Нагріваючи скляну паличку над полум'ям, ми побачимо, що скло поступово розм'якшується, але не «тане» (рис. 8.5).

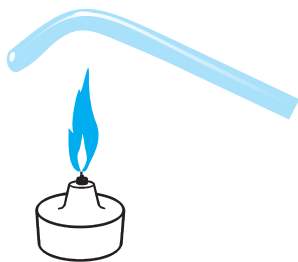


Рис. 8.5. Розм'якшення скла.  
Нагріваючись, скло поступово розм'якшується.

## 3. ІНШІ СТАНИ РЕЧОВИНИ

### РІДИННІ КРИСТАЛИ

У другій половині 20-го століття почали активно вивчати речовини, які поєднують (у певному діапазоні температури) властивості рідин і кристалів. Їх назвали **рідинними кристалами**. Зазвичай молекули рідинних кристалів мають сильно видовжену форму — довжина молекули може в десять і більше разів перевищувати її «товщину».

У розташуванні молекул рідинних кристалів є **часткова упорядкованість**: наприклад, видовжені молекули можуть бути зорієнтовані однаково, але їхні центри розташовані хаотично (рис. 8.6).

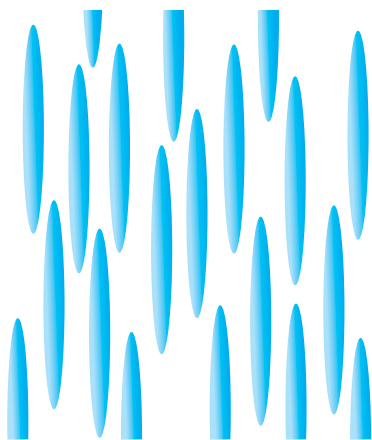


Рис. 8.6. Схематичне зображення розташування молекул у рідинних кристалах.  
Молекули зорієнтовані однаково, але їхні центри розташовані хаотично.

Або в одному напрямку існує далекий порядок у розташуванні молекул, а в двох інших напрямках — лише ближній.

Рідинні кристали дуже чутливі до зміни зовнішніх умов. Наприклад, навіть у разі невеликої зміни температури, тиску, електричного або магнітного полів вони можуть змінювати колір.

Цю властивість рідинних кристалів використовують в різних приладах — наприклад, у рідиннокристалових медичних термометрах. Особливо широко застосовують рідинні кристали для виготовлення дисплеїв — від годинників і мобільних телефонів до комп'ютерів і телевізорів.

### ПЛАЗМА

За температури в тисячі й мільйони градусів швидкості хаотичного руху атомів стають настільки великими, що їхні електронні оболонки цілком або частково руйнуються внаслідок зіткнень.

У результаті утворюються заряджені частинки — іони та вільні електрони. Такий сильно іонізований газ називають **плазмою**.

У земних умовах плазма — порівняно рідкісний стан речовини: зазвичай ми безпосередньо можемо спостерігати плазму тільки у вигляді полум'я або блискавки. Однак у всесвітніх масштабах плазма є досить поширеним станом речовини: наприклад, у цьому стані перебуває більшість зірок (у тому числі й наше Сонце).

### МОЛЕКУЛЯРНА БУДОВА ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ

Живу матерію на молекулярному рівні відзначає **визначено вищий ступень упорядкованості**.

Наприклад, молекули нуклеїнових кислот, які несуть спадкову інформацію, містять мільйони атомів, розташованих у строго визначеному порядку. Ці молекули утворюють подвійні спіралі у вигляді дуже довгих ланцюгів. Так, загальна довжина всіх молекул нуклеїнових кислот, які містяться в організмі **однієї** людини, більш ніж у 100 разів перевищує відстань від Землі до Сонця (ось де мікросвіт «змикається» з космосом!).

Щоб уміститися в ядрі клітини, молекула нуклеїнової кислоти надзвичайно щільно упакована — на ній утворено тисячі петель, перегинів тощо. Однак навіть так щільно упакована, молекула нуклеїнової кислоти весь час займається дуже складною діяльністю — побудовою так само високо впорядкованих величезних молекул білків<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Одним із перших учених, який почав вивчати властивості білків, був уже знайомий нам Гей-Люссак, ім'ям якого названо закон теплового розширення газу в ізобарному процесі.

Злагожене функціонування біологічних молекул не можна описати тими самими засобами, що описують будову речовини в неживій матерії.

Проте фізика і біологія, об'єднавшись, породили нову науку — біофізику. Ця наука вивчає будову живих організмів, використовуючи методи як фізики, так і біології (а також інших наук, наприклад хімії та інформатики).



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Як розташовані атоми (або молекули) у кристалах? Як називають такий тип розташування?
2. Чому атоми (молекули) у кристалах розташовані впорядковано?
3. Чи залежать властивості кристала від типу кристалічної ґратки? Наведіть приклад, що підтверджує вашу відповідь.
4. Які тіла мають певну температуру плавлення — кристалічні чи аморфні?
5. Опишіть основні властивості аморфних тіл і наведіть приклади таких тіл.
6. Що таке рідинні кристали?
7. Що таке плазма?
8. Яка основна особливість молекулярної будови живих організмів?

## § 9. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

1. Від рубила до мобільного телефону
2. Деформації твердих тіл
3. Закон Гука і модуль Юнга

*Механічні властивості твердих тіл мають величезне значення для їхнього використання в побуті і на виробництві. Ці властивості виявляються у процесі деформування твердих тел.*

*Ми розглянемо тут типи деформацій, а також основні механічні властивості твердих тіл: пружність, пластичність і міцність.*

### 1. ВІД РУБИЛА ДО МОБІЛЬНОГО ТЕЛЕФОНУ

Практично все, чим користувались і користуються люди, зроблено з твердих тіл — від рубила, меча та плуга до хмарочосів, космічних кораблів і комп'ютерів.

Використовувані людьми матеріали відігравали таку величезну роль у розвитку людства, що «на їхню честь» було навіть названо періоди історії.

Так, у кам'яному віці люди задовольнялися тими матеріалами, які їм удавалося знайти в природі.

На зміну кам'яному вікові прийшов бронзовий. Бронза — один із перших *штучно* створених людьми матеріалів: цей сплав міді з оловом виявився значно міцнішим, ніж мідь, а також і олово (нижче ми пояснимо чому). З бронзи виготовляли зброю та знаряддя праці.

На початку першого тисячоліття до нашої ери почався залізний вік. Він настав не «сам собою», як, наприклад, настає льодовиковий період: приходіві залізного віку сприяли багатоміліардні титанічні зусилля стародавніх металургів. І їхні зусилля виявилися не марними: залізний вік знаменує прощання людства з первіснообщинним ладом і народження великих античних цивілізацій.

Поява залізних знарядь зробила революцію в землеробстві і виробництві: з'явилися плуг і прості механізми.

Роль використовуваних матеріалів у розвитку цивілізації залишалась і залишається величезною й у наступні століття. Без

вирішального прогресу в металургії не змогли б настати ні вік пари, ні вік електрики: для створення парових машин, автомобілів, кораблів, генераторів, дротів тощо потрібні були матеріали зі спеціальними властивостями (переважно метали та їх сплави).

У 20-му столітті стався колосальний прорив у *матеріалознавстві* — науці про властивості матеріалів. Створено і продовжує створюватися безліч матеріалів із заданими властивостями. І вік космосу, і вік інформації, які настали, — це результат серйозних досягнень і в матеріалознавстві.

Наприклад, створення напівпровідників, про які ми докладніше розповімо в § 33. *Напівпровідникові прилади*, «проторувало шлях» створенню комп'ютерів і нових систем зв'язку, зокрема мобільних телефонів. Розроблення матеріалів для оболонок і двигунів космічних кораблів відкрило людині дорогу в космос (без цього не з'явилися б, зокрема, супутники зв'язку, які забезпечують телебачення).

У цьому параграфі ми розглянемо переважно механічні властивості тіл і спробуємо зрозуміти, якими особливостями будови тіл зумовлені ці властивості.

## 2. ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДИХ ТІЛ

### ТИПИ ДЕФОРМАЦІЙ

Якщо до твердого тіла прикласти силу, воно *деформується*, тобто змінює свій об'єм або форму, а найчастіше і те й інше. Основними типами деформацій є розтяг і стиск, а також зсув.

#### Розтяг і стиск

На рис. 9.1 схематично зображені деформації розтягу і стиску у вертикальному напрямку: видно, що, розтягуючись, тіло трохи «тоншає», а стискаючись — «товщає». Деформації розтягу зазнають троси, канати, ланцюги, а деформації стиску — опори.

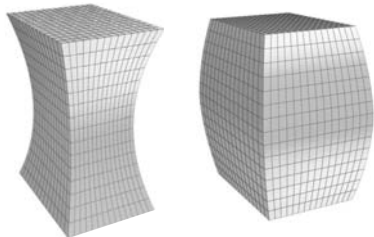


Рис. 9.1. Схематичне зображення деформацій розтягу і стиску у вертикальному напрямку. Зверніть увагу на зміну форми тіла.

Для розтягу або стиску головним є *зміна об'єму* тіла.

Комбінацією деформацій розтягу і стиску є *вигин*, показаний схематично на рис. 9.2: легко помітити, що при вигині одна частина тіла (верхня на рисунку) зазнає розтягу, а друга (нижня на рисунку) — стиску.

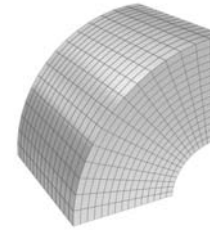


Рис. 9.2. Вигин. Вигин є комбінацією деформацій розтягу і стиску.

Деформації вигину зазнають, наприклад, рейки, коли по них рухається потяг, а також перекриття будинків, «підтримуючи» меблі та людей.

#### Зсув

На рис. 9.3 схематично зображено деформацію зсуву.

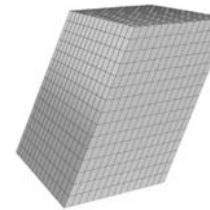


Рис. 9.3. Деформація зсуву. Головним є зміна форми тіла.

Для деформації зсуву головне — це *зміна форми* тіла. За такої деформації відбувається *зсув шарів* тіла відносно один одного. Варіантом деформації зсуву є *крутіння*, схематично зображене на рис. 9.4. Деформації крутіння зазнають, наприклад, болти при закручуванні.

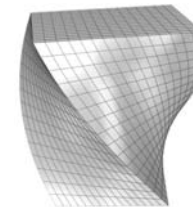


Рис. 9.4. Крутіння. Крутіння є варіантом деформації зсуву.

### ПРУЖНІ ТА НЕПРУЖНІ ДЕФОРМАЦІЇ

#### Пружні деформації

Якщо деформація порівняно невелика, то вона зникає після дії сили. Таку деформацію називають *пружною*. Ви добре знайомі з пружними

деформаціями на прикладі пружин, гумки. Але іноді пружні деформації виявляють себе, залишаючись зовні непомітними: такими є, наприклад, пружні деформації у разі зіткнення бильярдних або сталевих куль.

### Непружні деформації

Якщо деформація досить велика, вона не зникає після припинення дії сили. Таку деформацію називають **пластичною**. Такою є зазвичай деформація пластиліну (чим і зумовлена назва цієї речовини). Ви, напевно, знайомі також із пластичними деформаціями глини, свинцю та інших матеріалів.

## 3. ЗАКОН ГУКА І МОДУЛЬ ЮНГА

Буде деформація тіла пружною чи пластичною, визначають також властивості речовини, з якої зроблене це тіло: для кожної речовини існує своя «межа пружності».

### ЗАКОН ГУКА

Як ви вже знаєте з курсу фізики 9-го класу, закон Гука встановлює співвідношення між модулем подовження  $|\Delta l|$  і силою пружності:

$$F = k|\Delta l|.$$

Нагадаємо, що закон Гука справедливий тільки у випадку **пружних** деформацій.

Коефіцієнт  $k$  називають **жорсткістю**. Він характеризує механічні властивості даного **зразка**, тому що залежить не тільки від речовини, з якої зроблено цей зразок, але й від його **розмірів** (у випадку стрижня — від його поперечного перерізу та довжини). Однак для багатьох розрахунків важливо знати характеристику **речовини**, з якої зроблено даний зразок: тоді можна розраховувати сили пружності для **різних** зразків. Щоб визначити таку характеристику, знайдемо, як залежить жорсткість стрижня від площі його поперечного перерізу та від його довжини.

### МОДУЛЬ ЮНГА

У разі збільшення площі поперечного перерізу стрижня, наприклад, у  $n$  разів, його можна розглядати як  $n$  «паралельно» з'єднаних стрижнів (див. рис. 9.5). Очевидно, для того щоб розтягти **всі** ці стрижні на  $\Delta l$ , треба прикласти силу, у  $n$  разів більшу. Отже, жорсткість  $k$  стрижня прямо пропорційна до площі його поперечного перерізу  $S$ .



Рис. 9.5. Розгляд стрижня у вигляді «паралельно» з'єднаних стрижнів.

Стрижень зі збільшеною в  $n$  разів довжиною можна розглядати як  $n$  «поєднано» з'єднаних стрижнів (див. рис. 9.6). Якщо до цього стрижня прикласти ту ж силу, подовження стрижня буде, вочевидь, у  $n$  разів більшим, тому що кожний зі стрижнів «ланцюжка» подовжиться на  $\Delta l$ . Отже, жорсткість  $k$  стрижня обернено пропорційна до його довжини  $l_0$ .



Рис. 9.6. Розгляд стрижня у вигляді «поєднано» з'єднаних стрижнів.

Отже, ми можемо подати жорсткість  $k$  у вигляді  $k = E \frac{S}{l_0}$ , де

коефіцієнт  $E$  характеризує вже **речовину**, з якої зроблено даний зразок. Цей коефіцієнт називають **модулем пружності** або **модулем Юнга**.

Підставляючи в написане вище рівняння закону Гука  $k = E \frac{S}{l_0}$ , дістанемо  $F = E \frac{S}{l_0} |\Delta l|$ , або  $\frac{F}{S} = E \frac{|\Delta l|}{l_0}$ .

Величину  $\varepsilon = \Delta l / l_0$  називають **відносним подовженням**, а величину  $\sigma = F / S$  — **механічним напруженням**. Одиницею механічного напруження згідно з визначенням є  $\text{Н/м}^2$ .

Використовуючи ці величини, ми можемо написати закон Гука так:

$$\sigma = E|\varepsilon|.$$

З цієї формули випливає, зокрема, що модуль Юнга вимірюють у тих самих одиницях, що й механічне напруження.

Отже, для пружних деформацій механічне напруження прямо пропорційне до відносного подовження.

## ДІАГРАМА РОЗТЯГАННЯ

На рисунку 9.7 зображено здобуту на дослідах характерну криву залежності механічної напруги від відносного подовження (її часто називають **діаграмою розтягання**). Розглянемо її характерні властивості.

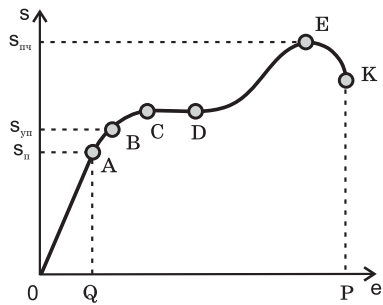


Рис. 9.7. Діаграма розтягання.

Ділянка *OA* відповідає малим пружним деформаціям — саме на цій ділянці справедливий закон Гука. Максимальне значення напруги  $\sigma_p$ , за якого ще справедливий закон Гука, називають **границею пропорційності**. На ділянці *AB* деформація залишається пружною, але для неї перестає виконуватися закон Гука: залежність  $\sigma$  від  $\epsilon$  стає нелінійною. Максимальне значення напруження  $\sigma_{пр}$ , за якого деформація ще залишається пружною, називають **границею пружності**. У разі подальшого збільшення напруження деформація стає непружною, тобто тіло залишається zdeформованим і після зняття навантаги. Якщо збільшувати навантагу й далі, тіло почне виявляти властивість **плинності**: на ділянці *CD* подовження збільшується практично за сталої навантаги. Однак якщо продовжувати збільшувати навантагу, тіло знову почне «чинити опір»: ми бачимо, що на ділянці *DE* збільшення подовження супроводжується збільшенням навантаги. Максимально можливе напруження називають **границею міцності**. У разі подальшого подовження механічне напруження зменшується, оскільки починається **руйнування** зразка.

Розраховуючи споруди і конструкції, завжди створюють **запас міцності**: межа міцності має бути в кілька разів більшою за механічні напруження, що виникають у процесі експлуатації.

## ЯКИМ Є МЕХАНІЗМ ПРУЖНИХ І ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ?

За **пружних** деформацій твердих тіл змінюються переважно відстані між атомами, і тому внаслідок дії міжатомних сил тіло намагається набуту попередньої форми.

За **пластичних** деформацій відбувається **ковзання** молекулярних шарів відносно один одного. При цьому не виникає «повертальної сили», тому що відстані між атомами не змінюються.

Що більше дефектів має кристалічна ґратка (наприклад, у вигляді вкраплень іншої речовини), то «важче» молекулярним шарам ковзати відносно один одного, унаслідок чого границя пружності речовини збільшується. Ось чому бронза, що є сплавом двох дуже пластичних металів — міді й олова, уже не є пластичним матеріалом, виявляючи властивості пружності. Те ж саме має місце і для дюралюмінію — сплаву алюмінію з міддю, манганом<sup>1</sup> і магнієм. Цей чудовий сплав дуже «легкий» (його густина близька до густини алюмінію), але значно міцніший за нього.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Чому властивості матеріалів мають таке велике значення для розвитку цивілізації? Наведіть приклади, що ілюструють вашу відповідь.
2. Які ви знаєте типи деформацій? Наведіть приклади кожного з цих типів.
3. Яка основна властивість пружних деформацій? Наведіть приклади таких деформацій.
4. Яка основна властивість пластичних деформацій? Наведіть приклади таких деформацій.
5. Сформулюйте закон Гука з використанням жорсткості.
6. Від чого залежить жорсткість зразка?
7. Сформулюйте закон Гука з використанням модуля Юнга.
8. Опишіть характер деформації, що відповідає різним ділянкам діаграми розтягання.
9. Яким є механізм пружних і пластичних деформацій?

<sup>1</sup> Раніше цю просту речовину називали «марганець».

## ГОЛОВНЕ В ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- **Усі речовини складаються з дрібних частинок**, які безперервно хаотично рухаються та взаємодіють одна з одною.
- Величини, які характеризують стан макроскопічних тіл у цілому, називають **макроскопічними** параметрами. Основні макроскопічні параметри — тиск, об'єм і температура.
- Величини, які характеризують властивості молекул речовини, називають **мікроскопічними** параметрами. Приклади мікроскопічних параметрів — маса молекули та середня кінетична енергія молекул.
- **Рівнянням стану** називають співвідношення між макроскопічними параметрами (температурою, об'ємом і тиском).
- **Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії** — вивести рівняння стану речовини, установивши зв'язок між макроскопічними та мікроскопічними параметрами.
- **Атомна одиниця маси** (а.о.м.) дорівнює 1/12 маси атома Карбону. **Відносна молекулярна маса**  $M_r$  дорівнює масі молекули речовини, вираженій в атомних одиницях маси.
- **Один моль** — це кількість речовини, що містить стільки ж молекул, скільки атомів Карбону міститься в 12 г вуглецю. Кількість речовини в молях позначають  $\nu$ .
- **Сталою Авогадро** називають кількість молекул в одному молі:  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ . Кількість молекул у зразку  $N = \nu N_A$ .
- **Молярна маса**  $M$  дорівнює масі одного моля. Маса зразка  $m$  пов'язана з молярною масою співвідношенням  $m = M\nu$ .
- **Температура** характеризує стан теплової рівноваги: тіла, що перебувають у тепловій рівновазі, мають однакову температуру.
- **Абсолютною температурою** називають температуру за абсолютною шкалою температур (шкалою Кельвіна), а нуль за цією шкалою — **абсолютним нулем температури**. Він відповідає  $t = -273^\circ\text{C}$  за шкалою Цельсія. Абсолютну температуру позначають  $T$ .
- **Ізопроцеси**: для даної маси газу  $\frac{V}{T} = \text{const}$  при  $p = \text{const}$  (**ізобарний** процес);  $\frac{p}{T} = \text{const}$  при  $V = \text{const}$  (**ізохорний** процес);  $pV = \text{const}$  при  $T = \text{const}$  (**ізотермічний** процес).

- **Рівняння Клапейрона**:  $\frac{pV}{T} = \text{const}$ .
- **Закон Авогадро**: за однакових температури і тиску в рівних об'ємах різних газів міститься однакова кількість молекул. Наслідками рівняння Клапейрона та закону Авогадро є співвідношення  $\frac{pV}{T} = kN$  і  $p = nkT$ , де  $k$  — стала Больцмана:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.
- **Рівняння Менделєєва — Клапейрона**:  $pV = \frac{m}{M}RT$ , де  $m$  — маса газу,  $M$  — його молярна маса. Універсальна газова стала  $R = kN_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .
- **Ідеальним газом** називають модель реального газу, у якій нехтують розмірами молекул газу і взаємодією молекул між зіткненнями.
- **Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії**  $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$ . Його можна записати також у вигляді  $p = \frac{2}{3} n \overline{E}$ .
- **Абсолютна температура** є мірою середньої кінетичної енергії руху молекул. Для одноатомного газу  $\overline{E} = \frac{3}{2} kT$ .
- Процес перетворення рідини на пару називають **пароутворенням**. Якщо пароутворення відбувається з вільної поверхні рідини, його називають **випаровуванням**. Процес, зворотний пароутворенню, тобто перетворення пари на рідину, називають **конденсацією**.
- Пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають **насиченою парою**.
- **Кипіння** являє собою пароутворення в усьому об'ємі рідини, а не тільки з її вільної поверхні. Рідина кипить за температури, за якої тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тискові. Цю температуру називають **температурою кипіння**.
- Температура кипіння збільшується в разі збільшення зовнішнього тиску і зменшується в разі зменшення зовнішнього тиску.



- **Відносна вологість**  $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100 \%$ , де  $p$  — тиск водяної пари за даної температури,  $p_n$  — тиск насиченої пари за тієї самої температури. Комфортні умови для людини відповідають вологості близько 50–60 %.
- Силу, з якою рідина діє на контур, що обмежує її поверхню, і яка прагне зменшити площу поверхні рідини, називають **силою поверхневого натягу**.
- Відношення сили поверхневого натягу  $F$  до довжини контуру  $l$  називають **поверхневим натягом** і позначають  $\sigma$ . Отже,  $\sigma = F/l$ .
- Рідина **змочує** поверхню твердого тіла, якщо молекули рідини сильніше взаємодіють із молекулами твердого тіла, ніж між собою. Унаслідок змочування рідина піднімається по капілярних трубках. Це явище називають **капілярністю**.
- Висоту  $h$  підняття рідини в капілярі, який змочується цією рідиною, визначають за формулою  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ , де  $\sigma$  — поверхневий натяг даної рідини,  $\rho$  — густина рідини,  $g$  — прискорення вільного падіння,  $r$  — радіус капіляра.
- У **кристалах** атоми або молекули розташовані впорядковано, утворюючи **кристалічну ґратку**; кристали плавляться за певної температури, яку називають **температурою плавлення**.
- В **аморфних** тілах є тільки «ближній порядок» у розташуванні атомів і молекул; аморфні тіла мають **плинність** і не мають певної температури плавлення.
- Закон Гука:  $\sigma = E|\varepsilon|$ , де  $\sigma = F/S$  — **механічна напруга**,  $E$  — модуль пружності (модуль Юнга),  $\varepsilon$  — відносне подовження.

## Розділ 2. ТЕРМОДИНАМІКА



Розділ фізики, що вивчає загальні закони теплових явищ, називають **термодинамікою**. Термодинаміка має велике значення для розроблення та створення теплових двигунів, широке застосування яких змінило хід світової історії.

У цьому розділі ми розглянемо закони термодинаміки, принципи роботи теплових двигунів, холодильників та кондиціонерів, а також питання охорони довкілля.

Крім того, ми розглянемо фазові переходи, тобто переходи речовини з одного агрегатного стану в інший.

## § 10. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

1. Внутрішня енергія
2. Закон збереження енергії в теплових явищах
3. Рівняння теплового балансу

У цьому параграфі розказано, які величезні запаси внутрішньої енергії мають тіла. Розглянуто способи змінювання внутрішньої енергії.

Ми розглянемо також закон збереження енергії, який щодо теплових процесів дістав назву першого закону термодинаміки, а також рівняння теплового балансу.

### 1. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ

Енергія хаотичного руху молекул є лише частиною всієї енергії, яка міститься в тілі.

Річ у тім, що атоми та молекули не тільки рухаються, але й **взаємодіють** одне з одним, тобто мають не тільки кінетичну, а й **потенціальну** енергію.

Суму кінетичної енергії хаотичного руху всіх частинок, що входять до складу даного тіла, і потенціальної енергії їхньої взаємодії одна з одною називають **внутрішньою енергією**.

**У яких процесах і яким чином може змінюватися внутрішня енергія?**

**Коли змінюється температура тіла**, змінюється кінетична енергія хаотичного руху атомів і молекул, а також потенціальна енергія взаємодії атомів і молекул у рідинах та твердих тілах.

**Коли відбуваються хімічні реакції** (наприклад, горіння або вибух) або **змінюється агрегатний стан речовини** (наприклад, речовина переходить з рідинного стану в твердий або газоподібний), змінюється потенціальна енергія атомів, які входять до складу молекул.

**Унаслідок ядерних реакцій** змінюється потенціальна енергія частинок, які входять до складу атомного ядра.

Розглянемо приклади, які допоможуть вам уявити «масштаби» змін внутрішньої енергії.

### ПРИКЛАДИ ЗМІН ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ

У чому виявляється зміна внутрішньої енергії	Приклад з механіки
<i>Нагрівання й охолодження</i>	
Коли змінюється температура, змінюється кінетична енергія хаотичного руху молекул, а в рідині і твердому тілі — також і потенціальна енергія взаємодії молекул.	Щоб нагріти від 0 °С до температури кипіння 1 літр води, треба витратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на дванадцять поверхів (рис. 10.1). Стільки ж енергії виділяється внаслідок охолодження 1 л води від температури кипіння до 0 °С.
<i>Плавлення та кристалізація</i>	
Коли руйнується або утворюється кристалічна ґратка, змінюється потенціальна енергія взаємодії атомів або молекул.	Щоб розплавити 1 кг льоду, треба витратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на десять поверхів. Стільки ж енергії виділяється внаслідок кристалізації 1 л води.
<i>Випаровування та конденсація</i>	
У разі розірвання або утворення зв'язків між молекулами змінюється потенціальна енергія їхньої взаємодії.	Щоб випарувати 1 кг води, треба витратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на 70 поверхів. Стільки ж енергії виділяється внаслідок конденсації 1 кг водяної пари.
<i>Хімічні реакції, що відбуваються з виділенням тепла</i>	
У разі перебудови молекул потенціальна енергія взаємодії атомів частково перетворюється в кінетичну енергію хаотичного руху молекул.	Унаслідок згорання 1 кг бензину виділяється стільки енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на гору висотою 4,5 км.
<i>Ядерні реакції</i>	
У разі поділу або синтезу (об'єднання) атомних ядер потенціальна енергія взаємодії частинок, які входять до складу атомного ядра, перетворюється на кінетичну енергію хаотичного руху частинок і енергію випромінювання.	Унаслідок повного поділу ядер 1 кг урану виділяється енергія, достатня для «закидання» навантаженого потягу на Місяць.

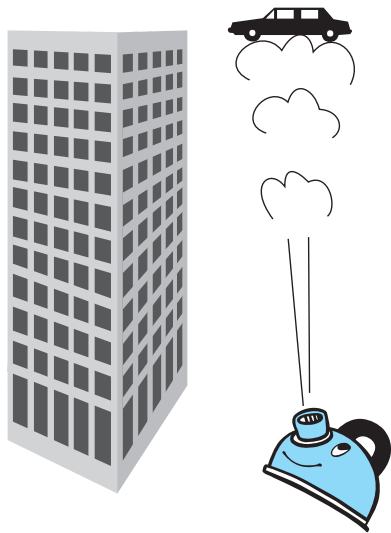


Рис. 10.1. До порівняння внутрішньої та механічної енергій. Щоб нагріти від  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температури кипіння 1 літр води, треба витратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття легкового автомобіля на дванадцять поверхів.

## 2. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВИХ ЯВИЩАХ

### СПОСОБИ ЗМІНЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що внутрішню енергію тіла можна змінити двома способами (рис. 10.2):

- 1) за допомогою **теплопередачі**, тобто не виконуючи роботи (наприклад, унаслідок контакту з тілом іншої температури);
- 2) **виконуючи роботу** (при зміні об'єму).

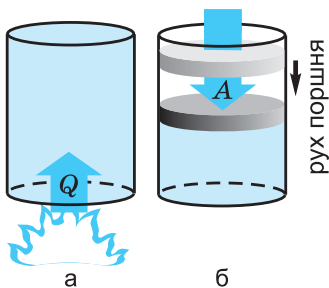


Рис. 10.3. Способи змінювання внутрішньої енергії: а) за допомогою теплопередачі; б) виконуючи роботу.

Міру зміни внутрішньої енергії в процесі теплопередачі називають **кількістю теплоти** і позначають  $Q$ . Кількість теплоти вимірюють у джоулях.

### ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Позначимо зміну внутрішньої енергії тіла  $\Delta U$ , а роботу, виконану **над** цим тілом, позначимо  $A$ . Відповідно до закону збереження енергії,

$$\Delta U = Q + A.$$

Закон збереження енергії щодо теплових явищ дістав назву **першого закону термодинаміки**.

Часто використовують також інше формулювання першого закону термодинаміки, у якому отриману тілом кількість теплоти виражають через зміну внутрішньої енергії та роботу, виконану **тілом**.

Позначимо цю роботу  $A_r$ , оскільки в теплових двигунах роботу виконує газ. Робота  $A_r$  пов'язана з роботою  $A$ , виконаною над тілом, співвідношенням  $A_r = -A$ . Тоді перший закон термодинаміки можна сформулювати так:

$$Q = \Delta U + A_r.$$

Приклади застосування першого закону термодинаміки до різних газових процесів розглянуто нижче.

### Хто відкрив перший закон термодинаміки?

Перший закон термодинаміки є одним із формулювань закону збереження енергії, який відкрили незалежно один від одного троє вчених: німецькі вчені Роберт Майєр і Герман Гельмгольц та англійський учений Джеймс Джоуль.

Згадаємо також французького вченого Саді Карно, праця якого «Міркування про рушійну силу вогню та про машини, здатні розвивати цю силу» відіграла особливо велику роль у розвитку термодинаміки. Ось що він писав (цитуючи його роботу, ми використовуємо сучасну наукову термінологію):

«Тепло – це механічна енергія, яка змінила свій вигляд: це енергія руху частинок тіла. Коли механічна енергія зникає, виникає водночас теплота в кількості, яка точно дорівнює кількості зниклої механічної енергії.

І, навпаки, коли зникає теплота, завжди виникає механічна енергія. Отже, енергія існує в природі в незмінній кількості; вона ніколи не виникає й ніколи не зникає, змінюючи тільки свою форму».

### 3. РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

Часто трапляються випадки, коли кілька тіл, не виконуючи роботи, обмінюються деякою кількістю теплоти *тільки одне з одним* (тобто теплообміном з іншими тілами можна знехтувати).

У таких випадках перший закон термодинаміки набуває вигляду  $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, *отримана* першим тілом, і т. д. Якщо якийсь тіло *віддавало* деяку кількість теплоти, то для нього  $Q < 0$ .

Співвідношення  $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0$  називають *рівнянням теплового балансу*.

Наприклад, у випадку теплообміну між двома тілами рівняння теплового балансу має вигляд  $Q_1 + Q_2 = 0$ , або  $Q_1 = -Q_2$ .

#### Приклад

Якщо в тонку склянку з гарячою водою долити холодної води, у результаті теплообміну вода стане теплою: вода, що *містилася* в склянці, віддасть деяку кількість теплоти, тобто її температура зменшиться, а *долита вода отримує* таку саму кількість теплоти, тобто її температура збільшиться. Це справедливо тільки за умови, що можна знехтувати теплообміном із навколишнім повітрям і склянкою — ось чому склянка має бути тонкою.

#### Питома теплоємність

Як ви вже знаєте, кількість теплоти  $Q$ , яку треба передати тілу для збільшення його температури на  $\Delta t$ , прямо пропорційна до маси тіла  $m$  і до різниці температур  $\Delta t$ .

Тому можна записати  $Q = cm\Delta t$ , де коефіцієнт  $c$  називають *питомою теплоємністю*. Вона характеризує речовину, з якої складається це тіло. Теплоємність вимірюють у  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Питома теплоємність чисельно дорівнює кількості теплоти, яку отримує 1 кг речовини в разі збільшення температури тіла на 1 К.

#### Питома теплота пароутворення

Складаючи рівняння теплового балансу, треба враховувати, що тіло може віддавати або отримувати деяку кількість теплоти, переходячи з одного агрегатного стану в інший (наприклад, із рідинного в газоподібний і назад).

Як ви вже знаєте, рідина, випаровуючись, охолоджується. Отже, щоб протягом випаровування температура рідини не

зменшувалася, треба підводити до рідини тепло. При цьому майже все підведене тепло йде на збільшення потенціальної енергії молекул, які вилітають із рідини, тобто на розрив зв'язків між молекулами.

Кількість теплоти  $Q$ , необхідна для того, щоб перетворити рідину на пару за сталої температури, пропорційна до маси  $m$  рідини:  $Q = Lm$ .

Величину  $L$  називають *питомою теплотою пароутворення* та вимірюють в Дж/кг.

Питома теплота пароутворення чисельно дорівнює кількості теплоти, необхідній для того, щоб перетворити на пару 1 кг рідини за сталої температури.

У разі конденсації теплота не поглинається, а виділяється: унаслідок конденсації 1 кг пари виділяється кількість теплоти, яка чисельно дорівнює  $L$ .

#### Приклад

Для перетворення одного літра води на пару необхідно витратити стільки ж енергії, скільки потрібно для підняття слона на двадцять поверхів. Але після літнього дощу калюжі висихають менш ніж за годину!

#### Питома теплота плавлення

У разі кристалізації (або плавлення) тіло також віддає (або отримує) деяку кількість теплоти.

Експеримент свідчить: щоб розплавити кристалічне тіло, недостатньо тільки нагріти його до температури плавлення — до нього треба *продовжувати* підводити тепло до *повного* перетворення на рідину.

Оскільки впродовж усього процесу плавлення температура тіла залишається *незмінною*, можна зробити висновок, що в процесі плавлення середня кінетична енергія молекул не змінюється. Отже, під час плавлення все підведене до тіла тепло йде на збільшення потенціальної енергії молекул.

Кількість теплоти  $Q$ , необхідна для того, щоб розплавити тіло за температури плавлення, пропорційна до маси  $m$  цього тіла:  $Q = \lambda m$ .

Величину  $\lambda$  називають *питомою теплотою плавлення* та вимірюють в Дж/кг.

Питома теплота плавлення чисельно дорівнює кількості теплоти, необхідній для того, щоб розплавити 1 кг кристалічної речовини за температури плавлення.

## Приклад

Щоб розплавити 1 кг льоду, треба витратити приблизно таку саму кількість теплоти, що і для нагрівання води, отриманої в результаті танення, до  $80\text{ }^\circ\text{C}$  (хоча під час танення льоду його температура залишається весь час незмінною!).

Ось що писав про питому теплоту плавлення англійський учений Джо-зеф Блек:

«Якби лід не мав великої теплоти плавлення, навесні вся маса льоду мала б розтанути за кілька хвилин або секунд, тому що теплота безупинно передається льодові з повітря. Наслідки цього були б жахливі; адже і за сучасного становища виникають великі повені й сильні потоки води, коли тануть великі маси льоду та снігу».



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Який розділ фізики називають термодинамікою?
2. Що таке внутрішня енергія?
3. Наведіть приклади процесів, у яких внутрішня енергія змінюється.
4. Як ви знаєте способи змінювання внутрішньої енергії?
5. Що таке кількість теплоти? У яких одиницях її вимірюють?
6. Сформулюйте перший закон термодинаміки.
7. Що таке рівняння теплового балансу? З яким законом збереження воно пов'язане?
8. Що таке питома теплоємність?
9. Що таке питома теплота пароутворення?
10. Що таке питома теплота плавлення?
11. Чому крапля води, потрапивши на розпечену сковороду, не випаровується відразу, а починає підстрибувати?
12. Чи впливає вітер на покази мокрого термометра? Сухого? Термометри перебувають у тіні.

## § 11. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ ТА ГАЗОВІ ПРОЦЕСИ

1. Внутрішня енергія газу
2. Робота газу
3. Застосування першого закону термодинаміки до газових процесів

*Для застосування першого закону термодинаміки до газових процесів треба знати, чому дорівнює внутрішня енергія газу, а також уміти обчислювати роботу, виконану газом. Ми покажемо тут, як знайти цю роботу за допомогою графіка залежності тиску газу від його об'єму.*

*Потім ми розглянемо застосування першого закону термодинаміки до ізопроцесів, а також до адіабатичного процесу, коли теплопередача відсутня.*

### 1. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ ГАЗУ

Почнемо з найпростішого випадку — одноатомного ідеального газу.

Внутрішня енергія такого газу — це тільки кінетична енергія поступального хаотичного руху молекул (ми не враховуємо тут енергії взаємодії атомів у молекулі та енергії взаємодії частинок у ядрі атома).

У цьому випадку сумарна енергія всіх молекул газу  $U = N\bar{E}$ .

Підставляючи сюди вирази  $N = \nu N_A$  та  $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ , дістаємо

$$U = \nu N_A \cdot \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}\nu N_A kT = \frac{3}{2}\nu RT.$$

Отже, внутрішня енергія газу залежить тільки від **температури** та **кількості речовини**.

Цей висновок залишається справедливим і для багатоатомних газів, хоча коефіцієнт пропорційності між внутрішньою енергією й абсолютною температурою буде іншим. Річ у тім, що молекули багатоатомних газів мають не тільки кінетичну енергію поступального руху, а ще й кінетичну енергію обертального руху, тому сумарна кінетична енергія

молекул таких газів більша, ніж  $\frac{3}{2}\nu RT$ .

Розрахунки показують, що сумарна енергія молекул двохатомного газу  $U = (5/2)\nu RT$ , а для газу, молекули якого містять три або більше атомів,  $U = 3\nu RT$ .

## 2. РОБОТА ГАЗУ

### РОБОТА ГАЗУ ЗА ІЗОБАРНОГО РОЗШИРЕННЯ

Найпростіше обчислити роботу газу за ізобарного розширення, тобто коли газ розширюється за сталого тиску.

У цьому випадку газ тисне на поршень з незмінною силою  $F = pS$ , де  $p$  — тиск газу,  $S$  — площа поршня. Виконана газом робота  $A_r = F \cdot \Delta h = pS \cdot \Delta h$ , де  $\Delta h$  — переміщення поршня. Оскільки  $S \cdot \Delta h = \Delta V$ , де  $\Delta V$  — зміна об'єму газу, дістаємо  $A_r = p \cdot \Delta V$ .

Значимо надалі, що вираз  $p \cdot \Delta V$  чисельно дорівнює площі під графіком залежності  $p(V)$  (див. рис. 11.1).

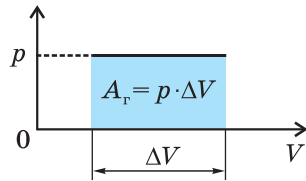


Рис. 11.1. Робота газу за ізобарного розширення. Ця робота чисельно дорівнює площі зафарбованого прямокутника.

### ГРАФІЧНЕ ЗНАХОДЖЕННЯ РОБОТИ ГАЗУ

Покажемо, що отриманий вище висновок можна узагальнити: робота, виконана газом, що розширився, чисельно дорівнює площі під графіком залежності тиску газу від його об'єму, тобто площі під графіком  $p(V)$ .

Розглянемо розширення газу, під час якого тиск газу не залишається сталим, а *змінюється*. На рис. 11.2 показано приклад залежності  $p(V)$  для такого процесу.

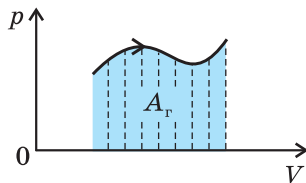


Рис. 11.2. Робота  $A_r$ , виконана газом під час його розширення, чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності  $p(V)$ .

Весь процес розширення газу можна подумки розбити на велику кількість етапів, у кожному з яких об'єм газу змінюється настільки мало, що тиск газу можна вважати практично сталим. Тоді для кожного етапу робота газу чисельно дорівнює площі під відповідною ділянкою графіка. Тому вся робота, виконана газом у разі розширення, дорівнює площі під усім графіком  $p(V)$ .

Якщо відбувається стискання газу, він виконує *від'ємну* роботу, яка дорівнює за модулем площі під графіком  $p(V)$  (див. рис. 11.3). А виконана *над газом* робота  $A = -A_r$  при цьому додатна і дорівнює площі під графіком  $p(V)$ .

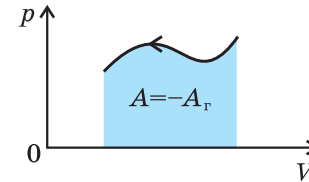


Рис. 11.3. Робота, виконана під час стискання газу. Робота  $A$ , виконана над газом, дорівнює площі під графіком залежності  $p(V)$ .

### РОБОТА ГАЗУ ЗА ЦИКЛІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Під час роботи теплових двигунів робоче тіло, тобто газ, здійснює *циклічний процес*, тобто повертається до свого початкового стану (див. рис. 11.4). Доведемо, що робота  $A_r$ , виконана газом у цьому процесі, чисельно дорівнює площі, яка міститься всередині графіка циклу в координатах  $p, V$ .

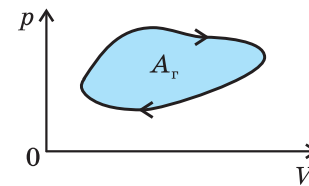


Рис. 11.4. Робота, виконана газом під час циклічного процесу, чисельно дорівнює площі, яка міститься всередині графіка циклу.

Проведемо ізохори  $a$  і  $b$ , які відповідають найменшому і найбільшому об'єму газу в циклічному процесі (див. рис. 11.5). Тоді циклічний процес можна уявити як послідовність процесів розширення (1) і стискання (2). У процесі 1 газ виконує додатну роботу, яка чисельно дорівнює площі під кривою 1, а в процесі 2 — від'ємну роботу, модуль якої чисельно дорівнює площі під кривою 2. Тому робота газу за весь цикл чисельно дорівнює різниці площ під кривою 1 і під кривою 2, тобто площі циклу.

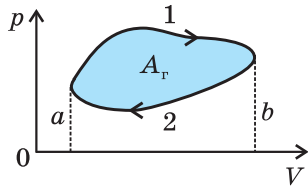


Рис. 11.5. Циклічний процес як послідовність двох процесів. У процесі 1 відбувається розширення газу, а в процесі 2 — стискування.

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРШОГО ЗАКОНУ ТЕРМОДИНАМІКИ ДО ГАЗОВИХ ПРОЦЕСІВ

#### ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС

Якщо газ нагрівається або охолоджується за сталого об'єму (наприклад, у товстостінному металевому балоні), він не рухає поршень, тобто не виконує роботи. Отже, внутрішня енергія газу змінюється тільки завдяки теплопередачі. З першого закону термодинаміки випливає, що в цьому випадку  $\Delta U = Q$ .

#### ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПРОЦЕС

Як ми вже знаємо (див. § 5. *Температура та середня кінетична енергія молекул газу*), внутрішня енергія газу залежить тільки від температури і тому за ізотермічного процесу не змінюється, тобто  $\Delta U = 0$ . Отже, з першого закону термодинаміки випливає, що у випадку ізотермічного процесу  $Q = A_r$ .

Якщо газ розширюється, він виконує додатну роботу, яка дорівнює, як ми бачимо, отримуваній ним кількості теплоти (через стінки посудини).

#### АДІАБАТНИЙ ПРОЦЕС

Накачуючи велосипедну камеру, Ви, можливо, помічали, що насос нагрівається. Відбувається це тому, що, стискаючи газ, ми виконуємо над ним роботу, збільшуючи його внутрішню енергію. У разі дуже швидкого стискування газ нагрівається настільки, що пальна суміш, яка перебуває в ньому, може зайнятися (див. рис. 11.6). Це використовують в дизельних двигунах.

Коли газ розширюється, його температура часто знижується: у цьому випадку роботу виконує газ, і тому його внутрішня енергія зменшується. Це пояснює, чому газувана вода, у якій розширюються бульбашки газу, прохолодніша за навколишнє повітря.

Утворення хмар також спричинено охолодженням під час розширення газу. Нагріте від поверхні Землі повітря, піднімаючись угору, розширюється (тому що тиск повітря зі збільшенням висоти зменшується) і внаслідок цього охолоджується. Охолоджуючись, водяна пара, що міститься в повітрі, конденсується, перетворюючись на малесенькі крапельки води.

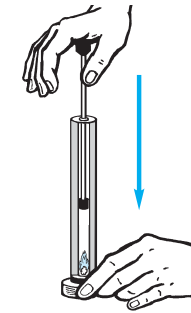


Рис. 11.6. Нагрівання внаслідок швидкого стискування газу. На дні товстостінного прозорого циліндра розташована змочена ефіром ватка. Якщо швидко вводити в циліндр поршень, газ у ньому (суміш повітря з парою ефіру) нагріється так сильно, що ватка займеться.

Наведені приклади відповідають випадкам, коли теплопередача мала — чи тому, що посудина з газом є теплоізолюваною, чи тому, що процес відбувається настільки швидко, що теплообмін із навколишнім середовищем не встигає відбутися. Процес, що відбувається без теплопередачі, називають **адіабатним**.

У випадку адіабатного процесу  $Q = 0$ , тому з першого закону термодинаміки випливає, що  $A_r = -\Delta U$ , тобто газ виконує роботу тільки завдяки зміні своєї внутрішньої енергії.

#### ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС

Як ви вже знаєте, у разі ізобарного розширення робота газу  $A_r = p\Delta V$ , де  $p$  — тиск газу,  $\Delta V$  — зміна його об'єму (у разі розширення  $\Delta V > 0$ ). Розширюючись, газ виконує роботу, тобто  $A_r > 0$ .

Відповідно до закону Гей-Люссака в разі ізобарного розширення газу температура підвищується, отже, збільшується і його внутрішня енергія, тобто  $\Delta U > 0$ . Тоді з першого закону термодинаміки, записаного у вигляді  $Q = \Delta U + A_r$ , випливає, що  $Q > 0$ , тобто газ може розширюватись ізобарно тільки за умови, що до нього підводиться деяка кількість теплоти.

#### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Чому дорівнює робота газу для ізобарного розширення?
2. Як знайти роботу газу за допомогою графіка залежності тиску газу від об'єму?
3. Чому дорівнює робота газу під час циклічного процесу?
4. Як пов'язані зміна внутрішньої енергії й отримана (віддана) газом кількість теплоти для ізохорного процесу? Чи отримує газ тепло, якщо його внутрішня енергія зменшується?

5. Чи змінюється внутрішня енергія газу під час ізотермічного процесу? Чи виконує газ при цьому роботу, якщо він отримує деяку кількість теплоти?
6. Який процес називають адіабатним? Як пов'язані робота газу та зміна його внутрішньої енергії для адіабатного процесу?
7. Чи може газ розширюватись ізобарно, якщо до нього не підводять тепло?
8. Газ ізотермічно стискується. Віддає чи отримує він при цьому деяку кількість теплоти?
9. У якому випадку, щоб нагріти газ на 1 К, треба передати йому більшу кількість теплоти – під час ізобарного чи під час ізохорного процесу? Обґрунтуйте вашу відповідь.
10. У якому процесі вся кількість теплоти, передана газу, перетворюється на роботу?
11. Газу передано деяку кількість теплоти. Чи може температура газу при цьому знизуватися?

## § 12. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ, ХОЛОДИЛЬНИКИ ТА КОНДИЦІОНЕРИ

1. Теплові двигуни
2. Холодильники та кондиціонери

*У цьому параграфі ми розглянемо принцип дії теплових двигунів і шляхи підвищення їхньої ефективності.*

*Крім того, буде розглянуто принципи дії холодильника та кондиціонера.*

### 1. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

Діапазон застосування теплових двигунів надзвичайно великий — від автомобілів до електростанцій і космічних ракет.

Широке застосування теплових двигунів стало можливим завдяки відкриттям вчених і винаходам інженерів. Серед учених слід особливо зазначити вже згаданого нами французького вченого Саді Карно, який першим розробив теорію теплових двигунів, а серед інженерів — англійського винахідника Джеймса Уатта (Ватта), ім'ям якого названо одиницю потужності ват.

#### ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ РОБОТІ ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА

У теплових двигунах хімічна енергія палива перетворюється на механічну енергію. Це відбувається у два етапи:

- 1) під час згоряння палива хімічна енергія (потенціальна енергія взаємодії атомів) перетворюється на кінетичну енергію хаотичного руху молекул. При цьому нагрівається деяка маса газу, яку називають **робочим тілом**;
- 2) газ (робоче тіло) розширюється, виконуючи роботу (рухаючи поршень). При цьому газ охолоджується, тобто кінетична енергія хаотичного руху молекул перетворюється на механічну енергію.

#### ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА

Дія теплового двигуна має **циклічний характер**: після того як робоче тіло (газ) розширилося, виконавши роботу, його необхідно стиснути до попереднього об'єму, аби воно могло виконати роботу в наступному циклі.



Однак, стискаючи газ, доводиться виконувати роботу *над газом*. Ця робота має бути *меншою* за роботу, виконану газом, — адже тільки в цьому разі тепловий двигун виконуватиме корисну роботу. Виходить, розширення газу має відбуватися за більшого тиску, а отже, і за *вищої температури*, ніж стискання.

Отже, для того щоб тепловий двигун виконував корисну роботу, треба періодично *нагрівати* й *охолоджувати* робоче тіло, тобто періодично передавати робочому тілу та відбирати в нього деяку кількість теплоти. Тому тепловий двигун має складатися з трьох основних елементів:

- 1) *робоче тіло* — зазвичай газ;
- 2) *нагрівач*, що має температуру  $T_1$ , у контакт з яким робочому тілу передається кількість теплоти  $Q_1$ ;
- 3) *холодильник*<sup>1</sup>, що має температуру  $T_2 < T_1$ , у контакт з яким від робочого тіла відбирається кількість теплоти  $Q_2$ .

Нагрівачем в остаточному підсумку є паливо, яке згоряє, а холодильником — найчастіше навколишнє повітря або вода водоєм.

### КОРИСНА РОБОТА ТЕПЛООВОГО ДВИГУНА

Після завершення кожного циклу робоче тіло повертається в початковий стан, тому зміна внутрішньої енергії робочого тіла за цикл  $\Delta U = 0$ . Тоді з першого закону термодинаміки випливає, що корисна робота, виконана двигуном,  $A_k = Q_1 - Q_2$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана робочим тілом від нагрівача, а  $Q_2$  — кількість теплоти, віддана робочим тілом холодильникові (рис. 12.1).

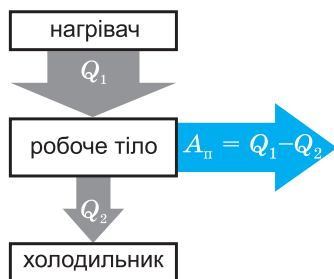


Рис. 12.1. Основні елементи теплового двигуна і перетворення енергії під час роботи.  
Корисна робота дорівнює різниці кількості теплоти, отриманої робочим тілом від нагрівача, і кількості теплоти, відданої холодильникові.

<sup>1</sup> Напевно, точніше було б називати його «охолоджувачем» (за аналогією з нагрівачем), оскільки холодильником називають також широко застосований прилад для охолодження (його роботу буде розглянуто нижче).

### КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ (ККД) ТЕПЛООВОГО ДВИГУНА

Ефективність теплового двигуна тим вища, чим більшу корисну роботу  $A_k$  він виконує за тієї самої кількості теплоти  $Q_1$ , отриманої від нагрівача.

*Коефіцієнтом корисної дії*  $\eta$  теплового двигуна називають відношення корисної роботи  $A_k$ , виконаної двигуном, до кількості теплоти  $Q_1$ , отриманої від нагрівача, виражене у відсотках:  $\eta = \frac{A_k}{Q_1} \cdot 100\%$ .

Оскільки  $A_k = Q_1 - Q_2$ , то  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$ . Кількість теп-

лоти  $Q_2$ , передана холодильникові, додатна, тому коефіцієнт корисної дії будь-якого теплового двигуна менший, ніж 100 %.

Отже, на механічну роботу можна перетворити тільки *частину* кількості теплоти, отриманої від нагрівача.

### Максимально можливий ККД теплового двигуна

У процесі створення теплових двигунів виникло запитання: яким є максимально можливий коефіцієнт корисної дії теплового двигуна за визначених температур нагрівача і холодильника? Відповідь дав Саді Карно у праці «Міркування про русійну силу вогню та про машини, здатні розвивати цю силу».

Досліджуючи, від чого залежить ККД теплового двигуна, Карно довів, що максимально можливий ККД має так званий «ідеальний тепловий двигун», під час роботи якого *відсутній контакт тіл із різною температурою*. Під час роботи ідеального теплового двигуна це досягається завдяки тому, що в ньому виконується так званий «цикл Карно», у якому робоче тіло:

- 1) отримує від нагрівача деяку кількість теплоти за температури, що дорівнює температурі нагрівача;
- 2) адіабатно розширюється, охолоджуючись при цьому до температури холодильника;
- 3) віддає холодильникові деяку кількість теплоти за температури, що дорівнює температурі холодильника;
- 4) адіабатно стискується, нагріваючись при цьому до температури нагрівача.

Карно довів, що ідеальний тепловий двигун має

*максимально можливий коефіцієнт корисної дії, який дорівнює*  $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot 100\%$ .

### Як збільшити ККД теплового двигуна?

Із формули для максимально можливого ККД теплового двигуна видно, що для його підвищення треба зменшувати відношення  $T_2/T_1$ . Цього можна досягти двома способами: або знижуючи температуру холодильника  $T_2$ , або підвищуючи температуру нагрівача  $T_1$ . Проте температура холодильника  $T_2$  не може бути нижчою за температуру навколишнього середовища, тому реально збільшувати  $\eta_{\max}$  можна, тільки збільшуючи температуру нагрівача  $T_1$ . При цьому, однак, треба врахувати, що температура нагрівача не має перевищувати температури плавлення матеріалів, із яких виготовлено двигун.

Формула  $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$  відповідає максимально можливому

ККД теплового двигуна. Такий ККД мав би «ідеальний тепловий двигун», у якому був би відсутній контакт між тілами з різною температурою. Однак такий тепловий двигун, маючи теоретично максимально можливий ККД, із погляду практики був би далеко не ідеальним, тому що за відсутності різниці температур між робочим тілом і нагрівачем (або холодильником) теплопередача відбувалася б нескінченно повільно. Тому в реальних теплових двигунах, у яких є контакт між тілами з різною температурою, ККД набагато менший за максимально можливий.

Наприклад, у двигуна внутрішнього згоряння  $\eta_{\max} \approx 70\%$ , а реальний ККД не перевищує 30%. Дизельні двигуни мають ККД близько 40%.

## 2. ХОЛОДИЛЬНИКИ ТА КОНДИЦІОНЕРИ

У цьому розділі ми будемо використовувати слово «холодильник» в іншому значенні (для багатьох звичнішому). Ми будемо називати так **холодильну машину**, тобто прилад, призначений охолоджувати.

### ХОЛОДИЛЬНИК

Те, що холодильник **охолоджує** продукти, які містяться в ньому, відомо всім, а ось те, що під час цього він нагріває повітря в приміщенні, знає далеко не кожний. Але доторкніться обережно до тонких трубок теплообмінника на задній стінці домашнього холодильника — ви відчуєте, що вони гарячі!

Отже, холодильник передає тепло від **холоднішого** тіла (холодних продуктів у холодильній камері) **теплішому** тілу (повітря в приміщенні).

Однак для здійснення потоку тепла у **зворотному** напрямку (від холодного тіла до гарячого) необхідно **виконувати роботу**. У холодильнику цю роботу виконує електродвигун: ось чому для роботи холодильника його треба вмикати в електричну мережу (див. рис. 12.2).

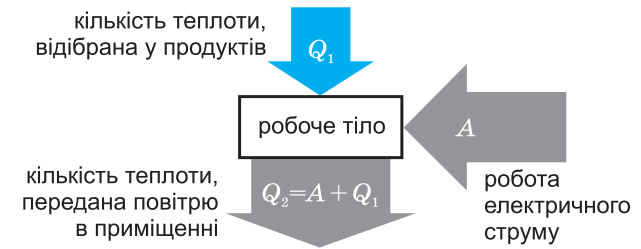


Рис. 12.2. Перетворення енергії під час роботи холодильника.

Щоб зрозуміти принцип роботи холодильника, уявімо, що робоче тіло (газ) здійснює цикл у зворотному напрямку — розширюється за низької температури, а стискується — за вищої. Розширюючись за низької температури, газ **відбирає тепло в холоднішого тіла**, а стискуючись за високої температури, він **віддає тепло теплішому тілу**<sup>1</sup>.

Щоб здійснювати потік тепла у зворотному напрямку (від холодного тіла до гарячого), доводиться **виконувати** роботу: адже тепер треба стискати газ за високої температури, тобто за високого тиску, а розширюється він за низької температури, тобто за низького тиску. Стискає газ в холодильній машині компресор, який споживає енергію з електричної мережі.

## КОНДИЦІОНЕР І ТЕПЛОВИЙ НАСОС

### Кондиціонер

Якщо відчинену холодильну камеру холодильника залишити **всередині** кімнати, а гарячі трубки теплообмінника винести **назовні**, то холодильна камера відбиратиме тепло в повітря в кімнаті, а гарячі трубки теплообмінника віддаватимуть тепло зовнішньому повітрю. У результаті кімната охолоджуватиметься, а зовнішнє повітря — нагріватиметься. Саме так і працює **кондиціонер** (див. рис. 12.3).

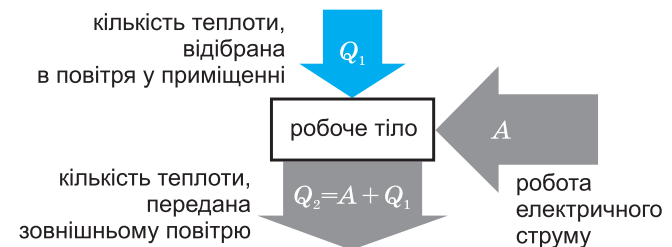


Рис. 12.3. Перетворення енергії під час роботи кондиціонера.

<sup>1</sup> У побутових і промислових холодильниках замість розширення й стискування газу відбувається випаровування та конденсація спеціальної рідини: під час випаровування поглинається велика кількість теплоти, а під час конденсації — виділяється.

## Тепловий насос

Цікаво, що прилад із таким самим принципом дії, як і в холодильника, можна використовувати не тільки для охолодження, але й для **обігрівання** приміщення! Для цього знову «рознесемо у просторі» холодильну камеру та гарячі трубки теплообмінника, але цього разу гарячі трубки залишимо в кімнаті, а холодильну камеру винесемо назовні.

Холодильна камера тепер відбиратиме тепло в зовнішнього повітря, а трубки теплообмінника передаватимуть тепло повітрю в приміщенні. Це є **тепловий насос**.

Тепловий насос економічно вигідніший від електричного обігрівача, тому що передана повітрю в кімнаті кількість теплоти  $Q_2 = A + Q_1$  більша від роботи  $A$  електричного струму на величину  $Q_1$ , яка дорівнює кількості теплоти, відібраній у зовнішнього повітря.

Сучасні побутові кондиціонери конструюють так, що вони можуть працювати й як кондиціонери, й як теплові насоси – залежно від пори року.



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які перетворення енергії відбуваються під час роботи теплового двигуна?
2. Які основні елементи теплового двигуна?
3. Навіщо потрібні нагрівач і холодильник під час роботи теплового двигуна?
4. Як пов'язана корисна робота, виконувана тепловим двигуном, із кількістю теплоти, отриманою від нагрівача, та кількістю теплоти, відданою холодильникові?
5. Що таке коефіцієнт корисної дії теплового двигуна? Чому він не може дорівнювати 100 %?
6. Чому дорівнює максимально можливий коефіцієнт корисної дії теплового двигуна? Що його визначає?
7. Які є можливості підвищити коефіцієнт корисної дії теплового двигуна?
8. Чим відрізняється дія побутового холодильника від дії теплового двигуна і що в них спільного?
9. Спекотного дня господарка вирішила залишити на кухні ввімкнений холодильник відчиненим, аби він «охолоджував кухню». Чи справді в кухні стане прохолодніше?
10. Чи дорівнюватиме коефіцієнт корисної дії теплового двигуна 100 %, якщо зникне тертя між частинами машини?

## § 13. НЕОБОРОТНІСТЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ. ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

1. Необоротність процесів і другий закон термодинаміки
2. Енергетична та екологічна кризи

*У цьому параграфі ми розповімо про другий закон термодинаміки, пов'язаний із необоротністю процесів у природі.*

*Ми покажемо, що саме необоротність процесів зумовлює «енергетичну кризу», а також розглянемо наслідки дедалі більшого необоротного перетворення енергії на Землі, пов'язаного з виробничою діяльністю людини.*

### 1. НЕОБОРОТНІСТЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ

#### ОБОРОТНІ ТА НЕОБОРОТНІ ПРОЦЕСИ

Серед явищ, які відбуваються навколо нас, є такі, що можуть проходити практично однаково як у прямому, так і в «зворотному» напрямку в часі — як у фільмі, який показують у зворотному порядку, від кінця до початку. Такі явища називають **оборотними**.

Явища ж, які можуть проходити лише в одному напрямку, називають **необоротними**.

#### Механічні явища

Практично оборотними є механічні явища, у яких дуже малою є роль тертя: прикладами можуть бути коливання вантажу на нитці або на пружині. Якщо зняти на плівку такі явища, а потім показувати фільм у зворотному порядку, глядачі не помітять «обернення часу»: їм буде здаватися, що вони спостерігають реальний процес.

Однак ті механічні явища, у яких **тертя** відіграє істотну роль, є «очевидно» необоротними: якщо показувати фільм про такі явища у зворотному порядку, глядачі відразу ж помітять зворотний порядок показу. Наприклад, якщо за «прямого» показу фільму м'яч, що котиться по траві, природно сповільнює свій рух і так само природно зрештою зупиняється, то за «зворотного» показу м'яч, який лежить на траві, раптом ні з сього ні з того зовсім «неприродно» починає котитися, причому швидкість його буде збільшуватися.

## Теплові явища

Серед теплових явищ також є оборотні. Наприклад, за адіабатного стискання та розширення газу (тобто за відсутності теплопередачі) газ поводить себе подібно до пружини: якщо натиснути на поршень, під яким перебуває газ у теплоізолюваній циліндричній посудині, і потім відпустити поршень, він почне коливатися — як вантаж, що лежить на пружині.

Однак ті теплові явища, у яких істотну роль відіграє **теплопередача**, явно необоротні, тому що потік тепла спрямований завжди в один бік — від гарячого тіла до холодного.

Можна було б заперечити, що домашній холодильник передає тепло у «зворотному» напрямку – від холодного тіла до гарячого (див. § 12. *Теплові двигуни, холодильники та кондиціонери*). Але для цього, як ми бачили, необхідно виконувати роботу. Її виконує електродвигун, а електроенергію для його роботи виробляють на електростанції, де роботу виконують теплові двигуни. Робота ж теплових двигунів завжди супроводжується необоротними процесами, про які мова піде далі в цьому параграфі.

## Необоротність реальних процесів

Оскільки тертя або теплопередача певною мірою присутні в будь-якому процесі, усі процеси, які відбуваються в природі, є необоротними. Наприклад, коливання вантажу, підвішеного на нитці або на пружині, зрештою згасають.

## ЧИ ЗУМОВЛЕНА НЕОБОРОТНІСТЬ ПРОЦЕСІВ ЗАКОНОМ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ?

Розглянемо приклад із м'ячем, який за «зворотного» перебігу часу починав би сам котитися по траві. Може, такий процес неможливий тому, що при цьому порушувався б закон збереження енергії: дійсно, звідкіля м'яч, який лежить на траві, отримав би енергію, щоб почати рух? Звідкіля потім береться енергія для розгону м'яча?

Проте уважніший розгляд показує, що закон збереження енергії у «зворотних» процесах не порушувався б. Адже через тертя м'яч і трава нагріваються, тобто механічна енергія м'яча перетворюється на внутрішню енергію м'яча і трави. Тоді що ж заважає здійснитися зворотному процесові: чому м'яч не може отримати механічну енергію за рахунок деякого охолодження м'яча і трави?

Розглянемо з цього погляду і процес теплопередачі. У «зворотному» процесі, коли гаряче тіло ставало б іще гарячішим, а холодне – ще холоднішим, закон збереження енергії теж не порушувався б: адже якщо кількість теплоти, віддана холодним тілом, дорівнює кількості теплоти, отриманої гарячим тілом, то сумарна внутрішня енергія обох тіл залишилася б незмінною!

## ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Дослідження показали, що необоротність процесів зумовлена загальною закономірністю, яка виявляється в тому, що **більш упорядкований стан речовини згодом переходить у менш упорядкований**<sup>1</sup>.

Наприклад, механічний рух тіла **як цілого** внаслідок тертя перетворюється на **хаотичний** рух молекул. Унаслідок теплопередачі «ступінь порядку» також зменшується: коли тіла мають різну температуру, їхні молекули «розсортовані» по енергіях (середня енергія молекул одного тіла більша за середню енергію молекул іншого тіла), а після вирівнювання температур середні енергії молекул обох тіл стають рівними.

Твердження про необоротність процесів у природі дістало назву **другого закону термодинаміки**. Є різні формулювання цього закону, але ми в нашому курсі не можемо обговорювати це докладніше.

## 2. ЕНЕРГЕТИЧНА Й ЕКОЛОГІЧНА КРИЗИ

### ЕНЕРГЕТИЧНА КРИЗА

Енергетичну кризу, яку розуміють як недостачу енергії для розвитку промислового виробництва, вважають сьогодні однією з найгостріших проблем цивілізації.

Але як узгодити енергетичну кризу із законом збереження енергії: адже якщо енергія **зберігається**, як її може **не вистачати**?

Річ у тім, що енергетична криза полягає не просто в недостачі енергії, а в недостачі енергії, **придатної для перетворення на механічну енергію**.

Наприклад, ми бачили, що під час роботи теплових двигунів хімічна енергія палива перетворюється на механічну енергію. Це перетворення енергії є **необоротним**, а запаси палива на нашій планеті неухильно зменшуються: наприклад, розвіданих запасів нафти за нинішнього темпу її використання вистачить усього на кілька десятиліть. І цей темп продовжує зростати!

Отже, енергетична криза є наслідком **необоротності** процесів, які відбуваються в природі й техніці.

### ЕКОЛОГІЧНА КРИЗА ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

Друга, не менш серйозна проблема, що постає перед людством, — це екологічна криза.

Величезні масштаби перетворення енергії вже почали справляти «планетарний» вплив на клімат Землі та склад атмосфери.

<sup>1</sup> Закономірність такого переходу можна обґрунтувати за допомогою теорії ймовірностей, але це обґрунтування виходить за межі нашого курсу.

Як ви вже знаєте, для роботи теплових двигунів потрібен холодильник, у контакті з яким робоче тіло віддає йому деяку кількість теплоти.

У всіх теплових двигунах як такий холодильник використовують навколишнє середовище (атмосферне повітря та воду відкритих водойм). У результаті відбувається підвищення температури довкілля, назване «тепловим забрудненням» (рис. 13.1).

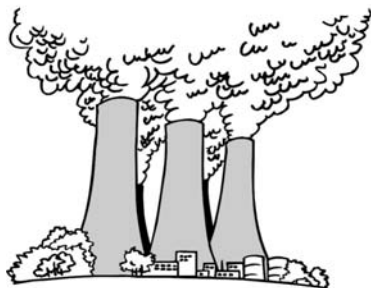


Рис. 13.1. Хімічне й теплове забруднення довкілля тепловими двигунами.

Теплове забруднення посилюється тим, що внаслідок згоряння величезної кількості палива підвищується концентрація вуглекислого газу в земній атмосфері, а за великої концентрації вуглекислого газу атмосфера не «випускає» у космічний простір теплове проміння нагрітої Сонцем поверхні Землі.

У результаті виникає «парниковий ефект», тобто температура підвищується ще більше.

Тому внаслідок роботи великої та дедалі більшої кількості теплових двигунів — переважно на електростанціях і в автомобілях — середня температура на нашій Землі протягом останніх десятиліть неухильно підвищується.

Це загрожує глобальним потеплінням із досить небажаними наслідками, до яких належать танення льодовиків і підйом рівня світового океану.

Крім того, під час спалювання палива в теплових двигунах витрачається необхідний для життя атмосферний кисень, а також утворюються шкідливі речовини, які забруднюють атмосферу.

Аби зменшити негативні наслідки роботи теплових двигунів, діють у двох напрямках: з одного боку, удосконалюють ці двигуни, підвищуючи їхній ККД і зменшуючи викиди шкідливих речовин, з другого боку — використовують **енергоощадні технології**.

У країнах, де ці технології широко застосовують, споживання енергії на виробництво тієї ж самої продукції (наприклад, автомобіля) у кілька разів нижче, ніж у країнах, де енергоощадним технологіям поки що не приділяють належної уваги.

## ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що означає необоротність процесів у часі?
2. У яких випадках процеси та явища можна вважати практично оборотними?
3. Чи може бути оборотним процес, у якому тертя або теплопередача відіграють істотну роль?
4. Чому наявність енергетичної кризи не суперечить законам збереження енергії?
5. Опишіть, як впливають теплові двигуни на довкілля.
6. Як зменшити шкідливий вплив теплових двигунів на довкілля?

## ГОЛОВНЕ В ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- **Внутрішня енергія** — це сума кінетичної енергії хаотичного руху всіх частинок, які входять до складу даного тіла, і потенціальної енергії їхньої взаємодії одного з одним.
- Внутрішню енергію тіла можна змінити, по-перше, за допомогою **теплопередачі**, не виконуючи роботи (наприклад, у разі контакту тіл різної температури), і, по друге, **виконуючи роботу**.
- **Перший закон термодинаміки**: зміна внутрішньої енергії тіла дорівнює сумі кількості теплоти, переданої тілу, та роботи, виконаної над тілом:  $\Delta U = Q + A$ . Інше формулювання: кількість теплоти, передана тілу, дорівнює сумі зміни внутрішньої енергії тіла та роботи, виконаної тілом:  $Q = \Delta U + A_r$ .
- **Рівняння теплового балансу**:  $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0$ .
- У разі зміни температури тіла  $Q = cm\Delta t$ , де коефіцієнт  $c$  називають **питомою теплоємністю**. Вона характеризує речовину, з якої зроблене це тіло.
- Кількість теплоти  $Q$ , необхідна для того, щоб перетворити рідину на пару за сталої температури, пропорційна до маси  $m$  рідини:  $Q = Lm$ . Величину  $L$  називають **питомою теплотою паротворення**.
- Кількість теплоти  $Q$ , необхідна для того, щоб розплавити тіло за температури плавлення, пропорційна до маси  $m$  цього тіла:  $Q = \lambda m$ . Величину  $\lambda$  називають **питомою теплотою плавлення**.
- Робота, виконана газом під час розширення, чисельно дорівнює площі під графіком залежності тиску газу від його об'єму, тобто площі під графіком  $p(V)$ .
- За ізобарного розширення робота газу  $A_r = p\Delta V$ .
- Робота  $A_r$ , виконана газом під час циклічного процесу, чисельно дорівнює площі, що міститься всередині графіка циклу в координатах  $p, V$ .
- Для ізотермічного процесу  $Q = A_r$ .
- Процес, який відбувається без теплопередачі, називають **адіабатним**. Для адіабатного процесу  $A_r = -\Delta U$ .

- **Основні елементи теплового двигуна**: робоче тіло, нагрівач і холодильник. Корисна робота, виконана тепловим двигуном,  $A_k = Q_1 - Q_2$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана робочим тілом від нагрівача,  $Q_2$  — кількість теплоти, віддана робочим тілом холодильникові. **Коефіцієнт корисної дії** теплового двигуна  $\eta = \frac{A_k}{Q_1} \cdot 100\%$ . Максимально можливий

$$\text{ККД теплового двигуна } \eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%.$$

- Для зменшення шкідливих впливів теплових двигунів на довкілля підвищують ККД двигунів, зменшують викид шкідливих речовин і використовують **енергоощадні технології**.

# ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

## Розділ 3. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ



У цьому розділі ми розглянемо взаємодію заряджених тіл, що перебувають у спокої. Розділ фізики, у якому розглядають такі взаємодії, називають електростатикою.

Електричні взаємодії відіграють виняткову роль у будові атома й утворенні молекул. Вони проявляють себе й у механіці «під виглядом» уже знайомих вам сили пружності й сили тертя.

Ми розглянемо також графічне зображення електричного поля за допомогою ліній напруженості, потенціальну енергію заряду в електричному полі й питання про енергію електричного поля.

### § 14. ПРИРОДА ЕЛЕКТРИКИ

1. Від електрона-бурштину до електрона-частинки
2. Роль електричних взаємодій

У цьому параграфі ми розглянемо питання про природу електрики й розповімо про двохтисячорічний шлях, пройдений наукою — від електрона-бурштину до електрона-частинки.

Ми розповімо також про роль електричних взаємодій у будові атома й утворенні молекул, а також про електричну природу сил пружності й тертя.

#### 1. ВІД ЕЛЕКТРОНА-БУРШТИНУ ДО ЕЛЕКТРОНА-ЧАСТИНКИ

##### «ЖИВИЙ КАМІНЬ» ТА «ЕЛЕКТРИЧНА СИЛА»

Слово «електрика» походить від слова «електрон» — так у Давній Греції називали бурштин<sup>1</sup>. Коли з бурштину виготовляли прикраси, його натирали, щоб додати каменю блиску. І натертій бурштин виявляв дивну особливість: він притягував легкі предмети — пушинки, волосся, пір'я. Це притягання здавалося дивним тому, що воно було першою поміченою людьми «дією на відстані»: адже всі інші впливи тіл одне на одне проявлялися тільки за їхнього безпосереднього контакту<sup>2</sup>. Давньогрецький учений Фалес припустив навіть, що бурштин є живим.

Понад два тисячоріччя властивість натертого бурштину притягувати предмети створювало йому особливу славу. Але в 16-му столітті англійський учений Вільям Гілберт виявив, що й інші речовини — наприклад, алмаз, гірський криштал, сірка, смола — притягують легкі предмети після натирання. Гілберт назвав цю «притягальну силу» **електричною** — на честь електрона-бурштину, у якого її було помічено вперше.

##### Проведемо дослід

Сьогодні кожен із вас може легко переконатися в існуванні «електричної сили». Проведіть кілька разів гребінцем по сухому

<sup>1</sup> Цю скам'янілу викопну смолу хвойних дерев раніше називали янтар.

<sup>2</sup> Притягання тіл Землею — не кажучи вже про притягання планет Сонцем — дуже довго не усвідомлювалося як «дія на відстані».

волосся. Після цього гребінець притягатиме легкі предмети, наприклад шматочки паперу (рис. 14.1).

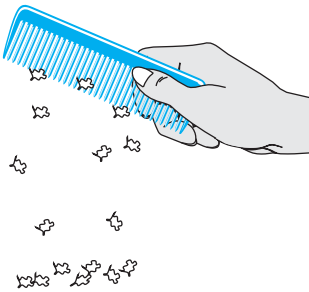


Рис. 14.1. Електричне притягання. Після розчісування сухого волосся пластмасовий гребінець притягує легкі шматочки паперу.

У шкільних дослідах «електричну силу» демонструють зазвичай, натираючи вовняною тканиною ебонітову<sup>1</sup> або скляну паличку.

Пояснення того, чому заряджене тіло притягає легкі **незаряджені** предмети, ми дамо в § 17. *Провідники й діелектрики в електростатичному полі.*

## ДВА ЗНАКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАРЯДІВ

У 17-му столітті німецький учений Отто фон Геріке виявив, що електрична взаємодія може бути не тільки **притяганням**, але й **відштовхуванням**. Наприклад, пушинка, що притяглася до натертої кулі із сірки, торкнувшись кулі, починає відштовхуватися від неї.

У § 17. *Провідники й діелектрики в електростатичному полі* ми розповімо, чому електричне відштовхування було відкрито тільки через дві тисячі років після того, як було відкрито електричне притягання.

Пояснення щодо двох типів електричної взаємодії — притягання й відштовхування — запропонував на початку 18-го століття французький учений Шарль Дюфе. Кажучи сучасною мовою, він припустив, що електрична взаємодія зумовлена взаємодією **електричних зарядів двох** знаків: заряди одного знаку відштовхуються, а різних знаків — притягуються.

Відповідно до сучасних уявлень,

**електричний заряд** — це властивість тіл або частинок, яка характеризує інтенсивність їхніх електромагнітних взаємодій.

<sup>1</sup> Ебоніт — тверда речовина чорного кольору, яка складається з сірки та каучуку.

Щоб переконатися на досліді у відштовхуванні зарядів одного знаку, доторкніться натертою скляною паличкою до підвішених поруч гільз із фольги. Гільзи набудуть електричного заряду однакового знаку й почнуть відштовхуватися одна від одної (рис. 14.2).



Рис. 14.2. Відштовхування однойменно заряджених тіл.

## Чому електричні заряди були названі позитивним і негативним?

У середині 18-го століття дослідженням електричних явищ зацікавився американець Бенджамін Франклін, що ввійшов в історію не тільки як учений, але й як видатний громадський і державний діяч.

Електричні явища Франклін пояснював наявністю в тілах «електричної рідини». Він уважав, що частинки «електричної рідини» відштовхуються одна від одної, але притягуються до частинок, з яких складається саме тіло. Якщо потерти два тіла, деяка кількість «електричної рідини» перетікає з одного тіла до іншого, унаслідок чого в одному тілі створюється нестача «електричної рідини», а в другому — надлишок. Тому тіла й набувають електричних зарядів двох різних знаків. Виходячи з цього уявлення, Франклін назвав ці електричні заряди **позитивним** і **негативним**, вважаючи, що позитивний заряд тіла зумовлено надлишком «електричної рідини», а негативний — нестачею.

Як ми незабаром побачимо, у своєму поясненні електричних явищ Франклін виявив дивну прозорливість, хоча й інтуїція дещо підвела вченого. Він вирішив, що в разі натирання сургучу вовною «електрична рідина» перетікає із сургучу на вовну, унаслідок чого сургуч набуває негативного заряду, а вовна — позитивного. Цей зроблений Франкліном вибір знаків електричних зарядів закріпився в науці й «діє» дотепер. Саме він і виявився не зовсім удалим: у 20-му столітті з'ясувалося, що, коли потерти два тіла, вони насправді набувають електричних зарядів тому, що дещо переходить із одного тіла на друге, але в напрямі, протилежному тому, який припустив Франклін.

## ЕЛЕКТРОНИ

У 1897 році англійський учений Дж. Дж. Томсон<sup>1</sup> виявив, що при електричних розрядах виникають потоки надзвичайно легких електрично заряджених частинок. Знак заряду цих части-

<sup>1</sup> Обидва ініціали Джозефа Джона Томсона вказують, щоб відрізнити його від іншого відомого фізика — Джорджа Паджета Томсона, сина Дж. Дж. Томсона.



нок, виходячи з уже зробленого Франкліном вибору знаків електричних зарядів, слід вважати **негативним**.

Відкрити Томсоном частинку на згадку про електрон-бурштин — «першу електричну речовину» — назвали **електроном**. Електрон став першою з відкритих **елементарних частинок**, тобто найдрібніших частинок речовини.

На початку 20-го століття англійський учений Ернест Резерфорд, досліджуючи будову атома, довів, що в центрі атома розташовано позитивно заряджене ядро, навколо якого рухаються негативно заряджені електрони. Їх утримують поблизу ядра сили електричного притягання.

### Електризація тіл

Найвіддаленіші від ядра електрони слабкіше пов'язані з ядром. При тісному контакті двох тіл електрони, що належать до атомів поверхневого шару, можуть переходити з одного тіла на друге. Саме цим пояснюють, чому під час тертя тіла заряджаються: тертя забезпечує тісний контакт між тілами, у результаті чого електрони переходять з одного тіла на друге. В одному тілі виникає **надлишок електронів**, і тому воно набуває **негативного** електричного заряду, а в другому тілі виникає **нестача електронів**, унаслідок чого воно набуває **позитивного** заряду (див. рис. 14.3). Заряди тіл будуть при цьому однакові за модулем.

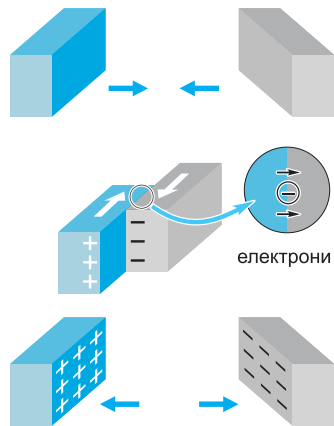


Рис. 14.3. Електризація внаслідок тертя. Електрони переходять від одного тіла до другого, унаслідок чого тіла набувають протилежних за знаком електричних зарядів.

Описаний **розподіл зарядів** спричиняє, таким чином, **електризацію** тіл, тобто виникнення в них електричних зарядів.

Отже, у своєму поясненні електричних явищ Франклін, власне кажучи, мав рацію. У процесі електризації тіл «щось заряджене» насправді переходить з одного тіла на інше — це електрони. Але вони переходять у напрямі, **протилежному** тому, який

припустив Франклін для перетікання «електричної рідини», і тому внаслідок зробленого ним вибору знаків зарядів **надлишок** електронів надає тілу **негативного** електричного заряду.

### Напрямок електричного струму і напрям руху електронів

Невдалий вибір знака зарядів виявляє себе переважно при вивченні електричного струму. З курсу фізики 8-го класу ви вже знаєте, що **електричним струмом називають спрямований рух заряджених частинок**, причому за напрям струму умовно обрано напрям руху **позитивно** заряджених частинок. У 20-му столітті з'ясувалося, що електричний струм у металах зумовлений рухом **негативно** заряджених електронів, і тому умовно обраний напрям струму виявився **протилежним** напрямку руху реальних носіїв заряду в металах — електронів (рис. 14.4).

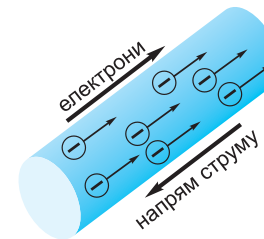


Рис. 14.4. Напрямок струму й напрям руху електронів. Електрони в металі рухаються протилежно умовно обраному напрямку струму.

### НОСІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ

Отже, ми бачимо, що електрична взаємодія заряджених тіл зумовлена взаємодією **заряджених частинок**, які входять до їх складу, — негативно заряджених електронів і позитивно заряджених атомних ядер.

Заряджені частинки називають **носіями електричного заряду**, тому що **електричного заряду без частинок не існує**. Пам'ятаючи про це, ми будемо, однак, для стислості називати іноді заряджені частинки або тіла просто зарядами.

Як ми вже знаємо, «найактивнішим» носієм електричного заряду є електрон. Проте існують й інші носії електричного заряду, наприклад **іони**<sup>1</sup> — атоми, що втратили або придбали один або кілька електронів. Атом, що втратив електрон (електрони), стає позитивно зарядженим іоном, а атом, що придбав, — негативно зарядженим.

Наприклад, у розчині кухонної солі (хімічна формула NaCl) носіями електричного заряду є позитивно заряджені іони Натрію й негативно заряджені іони Хлору. Якщо в цьому розчині йде струм, то позитивно заряджені іони рухаються в напрямі

<sup>1</sup> Від грецького «іон» — мандрівник.

струму, а негативно заряджені — у протилежному напрямі. Проте рух як позитивних, так і негативних іонів відповідає *тому самому* напрямку струму.

### ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ

Унаслідок електризації тіло, що втратило деяку частину електронів, заряджається позитивно, а тіло, що отримало додаткові електрони, — негативно. Загальна кількість електронів залишається незмінною, тому позитивний заряд, що його набуває одне з тіл, дорівнює за модулем негативному заряду, якого набуває друге тіло. У цьому полягає

**закон збереження електричного заряду:** алгебраїчна сума зарядів електрично ізольованої<sup>1</sup> системи тіл є незмінною.

У 20-му столітті з'ясувалося, що закон збереження електричного заряду — один із найфундаментальніших законів природи. Він виконується й у тих випадках, коли заряджені частинки зазнають перетворень — наприклад, коли при зіткненні частинок народжуються нові частинки. У цих випадках алгебраїчна сума зарядів частинок після зіткнення дорівнює алгебраїчній сумі зарядів частинок до зіткнення. Наприклад, при зіткненні двох *нейтральних* (що не мають електричного заряду) частинок можуть народжуватися *заряджені* частинки, однак при цьому алгебраїчна сума зарядів народжених частинок дорівнює *нулю* (разом з позитивно зарядженими частинками завжди народжуються й негативно заряджені частинки).

## 2. РОЛЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ

### ЕЛЕКТРИЧНІ ВЗАЄМОДІЇ І БУДОВА РЕЧОВИНИ

Ми вже знаємо, що електрична взаємодія лежить в основі будови атома: негативно заряджені електрони притягуються до позитивно зарядженого атомного ядра. Проте електричну природу має й взаємодія атомів: саме завдяки їй атоми з'єднуються в молекули, а з атомів і молекул утворюються рідинні й тверді тіла (рис. 14.5).

Взаємодія електрично нейтральних атомів спричинена тим, що електричний заряд в атомі розподілено нерівномірно. На дуже малих відстанях атоми відштовхуються, оскільки основну роль при цьому відіграє відштовхування однойменно зарядже-

<sup>1</sup> Електрично ізольованою системою тіл називають систему тіл, що не обмінюються електричними зарядами з тілами, які не входять до цієї системи.

них електронів. Ним зумовлені міцність твердих тіл і мала стисливість рідин. У разі збільшення відстані між атомами більшу роль починають відігравати сили притягання між електронами одного атома та ядром другого атома, унаслідок чого відштовхування атомів змінюється їх притяганням. Цим зумовлена, наприклад, міцність багатьох твердих тіл на розрив.

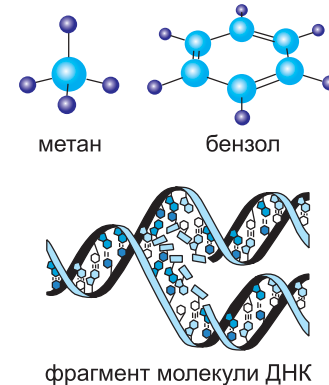


Рис. 14.5. Атоми з'єднуються в молекули завдяки електричним взаємодіям. На рисунку зображено будову молекул метану, бензолу й фрагмента складної молекули ДНК, що містить спадкову інформацію для живих істот.

Про силу електричних взаємодій можна судити з такого прикладу: спробуйте розірвати капронову нитку перерізом  $1 \text{ мм}^2$ . Це не просто, хоча зусиллям усього тіла протистоять сили *електричної* взаємодії крихітних частинок у малому перерізі нитки. Електричними взаємодіями зумовлено й багато процесів у живих тканинах. Зокрема, електричною є природа імпульсів у нервових клітинах, у тому числі — у клітинах головного мозку.

### ЧИ ПРОЯВЛЯЮТЬСЯ ЕЛЕКТРИЧНІ ВЗАЄМОДІЇ В МЕХАНІЧНИХ ЯВИЩАХ?

Як ви пам'ятаєте, у механіці розглядають три види сил — сила тяжіння, сила пружності й сила тертя. Чому ж, вивчаючи механічні явища, ми не враховуємо електричних взаємодій?

Річ у тім, що сила пружності й сила тертя зумовлені саме електричною взаємодією: адже ці сили виникають унаслідок взаємодії молекул, з яких складаються тіла, а взаємодія молекул, як ми вже знаємо, має електричну природу.

### ЧОМУ ТАК РІДКО ВИЯВЛЯЄТЬСЯ ЕЛЕКТРИЧНА ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ТІЛ?

Як уже зазначалося на початку цього параграфа, електричну взаємодію заряджених тіл удалося помітити спочатку як «дивину» — у вигляді крихітної сили, з якою натерті шматочки бурш-

тину притягують пір'їнки та пушинки. Причина такого рідкісного вияву взаємодії заряджених тіл полягає в тому, що практично всі навколишні тіла **електрично нейтральні**. Тільки тому ми й не помічаємо, наскільки великими є сили електричної взаємодії, «заховані» усередині речовини, хоча саме вони забезпечують, наприклад, міцність твердих тел.

Щоб ви змогли ще краще уявити собі, якими великими є сили електричної взаємодії, наведемо такий приклад. Якби з однієї крапельки води можна було забрати всього одну тисячну частку всіх електронів, що містяться в ній, і передати їх другій крапельці, розташованій на відстані одного метра, то ці крапельки притягувалися б із силою, яка дорівнює вазі сотні слонів.

У наступному параграфі ми порівняємо сили електричної і гравітаційної взаємодій.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Чим зумовлена взаємодія електрично заряджених тіл? У якому випадку це притягання, а в якому — відштовхування?
2. Які властивості має електричний заряд?
3. У чому виявляється збереження електричного заряду?
4. Які частинки є носіями електричного заряду?
5. Що таке електризація тіл? Як можна наелектризувати тіла?
6. Яким є знак електричного заряду тіла, у якому є надлишок електронів?
7. Як зв'язані напрям електричного струму і напрям руху електронів у металі?
8. Якою є роль електричних взаємодій у будові атома й утворенні молекул?
9. Чи виявляються електричні взаємодії в механічних явищах?
10. Атоми металів, уступаючи в хімічні реакції, порівняно легко «віддають» електрони. Якими іонами вони при цьому стають — позитивними або негативними?
11. Носіями заряду в розчині кухонної солі є іони. Які іони (Натрію чи Хлору) переносять позитивний заряд, а які — негативний?
12. Під час натирання сургучу вовною сургуч заряджається негативно. Як унаслідок електризації змінюються маси зразків сургучу й вовни? Чому цієї зміни мас практично непомітно?

## § 15. ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАРЯДІВ

1. Закон Кулона
2. Електричне поле

*У цьому параграфі ми розглянемо основний закон електростатики — закон Кулона, який визначає взаємодію точкових електричних зарядів.*

*Ми розповімо про елементарний електричний заряд, що дорівнює за модулем зарядові електрона, а також про те, як було виміряно цей заряд.*

*Електричні заряди взаємодіють за допомогою електричного поля. Уявлення про поле ввів англійський учений Майкл Фарадей. Багато хто вважає, що електричне поле невидиме і його не можна відчутти. Ми побачимо, однак, що це зовсім не так.*

### 1. ЗАКОН КУЛОНА

#### ОДИНИЦЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ

Щоб кількісно виразити силу взаємодії між зарядженими тілами, необхідно визначити одиницю електричного заряду.

У системі СІ одиницею електричного заряду є 1 кулон (Кл). Одиниця заряду в системі СІ не є основною, і її визначають через одиницю сили струму — ампер. Із курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що 1 кулон дорівнює зарядові, що пройшов через поперечний переріз провідника за 1 с за сили струму в провіднику, який дорівнює 1 амперу (А). Тому  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$ . Про те, як визначають одиницю сили струму, ми розповімо в § 24. *Взаємодія магнітів і струмів.*

#### ДОСЛІД КУЛОНА

Заряджені тіла, розміри яких набагато менші за відстань між ними, називають **точковими зарядами**. Закон взаємодії точкових зарядів був установлений на досліді наприкінці 18-го століття французьким ученим Шарлем Кулоном.

Кулон вимірював силу взаємодії невеликих заряджених кульок. На рис. 15.1 схематично зображено дослідну установку Кулона.



Шарль Кулон  
(1736—1806)

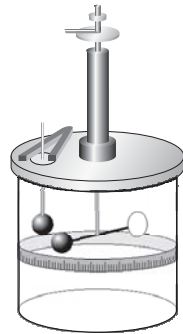


Рис. 15.1. Дослідна установка Кулона.

До тонкої пружної нитки підвішено горизонтально легку папичку, на одному кінці якої укріплено заряджену кульку, а на другому — противагу у вигляді паперового кружка. Другу заряджену кульку укріплено на нерухомому стрижні. Унаслідок електричної взаємодії між кульками нитка закручується на деякий кут. Виміривши цей кут, можна вичислити силу взаємодії кульок.

Щоб визначити залежність сили взаємодії від величини заряду кульок, Кулон зменшував заряд кульки вдвічі, дотикаючи її до другої такої самої кульки (рис. 15.2).

При цьому виявлялося, що сила взаємодії цієї кульки з кулькою, заряд якої залишався незмінним, зменшується також удвічі (за тієї самої відстані між кульками).

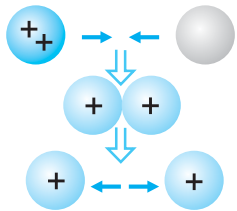


Рис. 15.2. Поділ заряду навпіл.  
Якщо зіткнуті дві однакові кульки, одна з яких заряджена, заряд розподілиться між кульками порівну.

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАКОНУ КУЛОНА

На підставі проведених ним дослідів Кулон установив, що

нерухомі точкові заряди  $q_1$  й  $q_2$  взаємодіють у вакуумі із силою  $F$ , прямо пропорційною до модулів зарядів й обернено пропорційною до квадрата відстані  $r$  між зарядами:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}.$$

При цьому, як ми вже знаємо, однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні — притягуються.

У системі СІ коефіцієнт  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ . Його іноді записують у вигляді  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  — так

звана **електрична стала**.

На початку 20-го століття англійський учений Ернест Резерфорд, досліджуючи будову атома, установив на досліді, що заряджені частинки взаємодіють із атомним ядром точнісінько за законом Кулона.

Так було доведено, що закон Кулона справедливий не тільки для взаємодії невеликих заряджених тіл, але й для взаємодії найдрібніших частинок речовини.

### Чи великим є заряд в 1 кулон?

Відповідь на це запитання залежить від того, чи розглядаємо ми тіло, яке має заряд 1 Кл, чи **протікання** заряду, який дорівнює 1 Кл.

Надати тілу заряд 1 Кл практично неможливо. Справді, із закону Кулона випливає, що два точкових заряди по 1 Кл кожний, розташовані на відстані 1 м один від одного, взаємоділяли б із силою, що дорівнює  $9 \cdot 10^9 \text{ Н}$ . Це вага навантаженого потяга довжиною приблизно від Києва до Харкова. Ось чому не можна надати заряд 1 Кл тілу «звичайних» розмірів: наприклад, надлишкові електрони, відштовхуючись із величезною силою один від одного, розлетілися б навсідіч.

Але тіло дуже великих розмірів може мати й набагато більший заряд: наприклад, земна куля має заряд, що дорівнює приблизно 0,6 мільйона кулонів (утім, як ми побачимо нижче, це майже вдвічі менше від сумарного заряду електронів в одній столовій ложці води).

Однак, незважаючи на величезність заряду 1 Кл, **протікання** такого заряду є зовсім рядовою подією: наприклад, заряд 1 Кл протікає через лампочку кишенькового ліхтарика всього за кілька секунд.

### Порівняння закону Кулона із законом всесвітнього тяжіння

Ви, мабуть, помітили, що закон Кулона подібний до закону всесвітнього тяжіння: нагадаємо, що сила гравітаційного притягання матеріальних точок також спадає обернено пропорційно до квадрата відстані. Однак між цими законами є й істотні відмінності:

1) гравітаційна взаємодія є тільки притяганням, а електрична може бути як притяганням, так і відштовхуванням;

2) електрична взаємодія незрівнянно сильніша за гравітаційну: наприклад, сила електричного відштовхування двох електронів приблизно в  $10^{42}$  раз більша, ніж сила їх гравітаційного притягання. Число  $10^{42}$  уявити дуже важко: наприклад, наша Галактика, яка містить сотні мільярдів зірок, більша від атома «усього» у  $10^{31}$  разів: це число в сто мільярдів разів менше  $10^{42}$ .

### ЕЛЕМЕНТАРНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД

У багатьох дослідах було встановлено, що всі відомі елементарні частинки або не мають електричного заряду (такі частинки називають нейтральними), або мають заряд, кратний за модулем до заряду електрона<sup>1</sup>. Тому модуль заряду електрона назвали **елементарним електричним зарядом**. Елементарний електричний заряд позначають  $e$ .

Виміри й розрахунки показали, що

модуль заряду електрона, тобто елементарний електричний заряд  $e$ , дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Заряд електрона виміряв на початку 20-го століття американський фізик Роберт Міллікен. Він впорскував крапельки олії між горизонтальними різнойменно зарядженими металевими пластинами й спостерігав за рухом крапель. Коли краплю опромінювали рентгенівськими променями, вона втрачала один або кілька електронів, у результаті чого вона здобувала електричний заряд. Заряджена крапля починала взаємодіяти із зарядженими пластинами, унаслідок чого швидкість її руху змінювалася.

Наприклад, якщо крапля зупинялася, це означало, що електрична сила, яка діє на неї, урівноважує силу тяжіння (рис. 15.3). Оскільки силу тяжіння можна знайти, вимірявши густину олії й радіус крапельки, то можна визначити й електричну силу, а разом із нею й заряд крапельки.

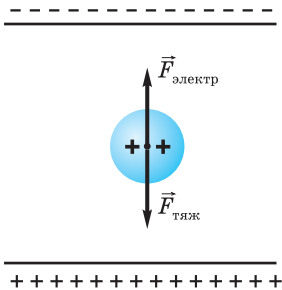


Рис. 15.3. Ідея досліду Міллікена. Якщо крапелька, що падає, після опромінення зупинялася, це означало, що на неї діє електрична сила, яка врівноважує силу тяжіння. Знаючи силу тяжіння, що діє на крапельку, можна визначити електричну силу, а разом з нею — і заряд крапельки.

<sup>1</sup> Є підстави вважати, що деякі елементарні частинки складаються з ще більш «елементарних» частинок із дробовими зарядами — так званих «кварків». Однак у вільному стані кварки не спостерігали.

Виявилось, що зміна заряду крапельки завжди кратна до величини  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

### Заряди атомних ядер різних хімічних елементів

Заряд будь-якого атомного ядра кратний до елементарного заряду, оскільки ядро складається із двох типів частинок: протонів, що мають позитивний заряд, який дорівнює за модулем заряду електрона, і нейтронів, що не мають електричного заряду<sup>1</sup>. Оскільки атом у цілому є електрично нейтральним, кількість електронів у ньому дорівнює кількості протонів у ядрі, яке називають *атомним номером*.

Атомний номер хімічного елемента записують у верхній частині комірки таблиці Менделєєва, що відповідає цьому елементові. Наприклад, атомний номер Оксигену дорівнює 8, атомний номер Гелію дорівнює 2, атомний номер Урану дорівнює 92.

### Чи є великим заряд електрона?

Заряд одного електрона, який дорівнює за модулем  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, звісно, дуже малий (можна навіть сказати — менше не буває<sup>2</sup>).

Згадаємо, однак, про величезну кількість електронів у будь-якому макроскопічному тілі. Розрахунок показує, що сумарний заряд електронів в одній столовій ложці води дорівнює приблизно **мільйону кулонів**, — а ми вже знаємо, яким величезним зарядом є лише **один** кулон.

Отже, якби позитивний і негативний заряди у двох столових ложках води були б не скомпенсовані всього-на-всього на одну мільйонну частку, ці «ложки води» мали б заряд в 1 Кл і, розташовуючись на відстані 1 м одна від одної, взаємодіяли б з тією величезною силою, про яку ми вже згадували.

Насправді ми не спостерігаємо нічого подібного, і це означає, що електричні заряди частинок, які входять до складу макроскопічних тіл, компенсують одне одну з винятково високою точністю. І колосальний електричний заряд електронів, що містяться в однієї столовій ложці води, не виявляє себе лише тому, що його точно компенсує такий самий колосальний і протилежний йому за знаком електричний заряд атомних ядер у тій самій столовій ложці води.

Наша подорож усередину речовини допоможе вам уявити, які величезні сили приховано під «гладдю» спокійної води лише в столовій ложці.

<sup>1</sup> Назва «нейтрон» пов'язана саме з нейтральністю цієї частинки.

<sup>2</sup> Якщо не враховувати кварків (див. виноску про кварки на попередній сторінці).

## 2. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

### ВІДКРИТТЯ ФАРАДЕЯ, МАКСВЕЛЛА І ГЕРЦА

На початку 19-го століття англійський учений Майкл Фарадей припустив, що заряджені тіла взаємодіють за допомогою **електричного поля**: кожне із цих тіл створює поле, яке діє на інше тіло.

Отже,

**електричне поле** — це вид матерії, що оточує електричні заряди і виявляється в дії на ці заряди.

Розвиваючи ідеї Фарадея, англійський фізик Джеймс Клерк Максвелл показав, що електричне й магнітне поля є окремими виявами **електромагнітного** поля, та побудував теорію цього поля. Із цієї теорії випливало, що електромагнітне поле поширюється в просторі у вигляді хвиль. Обчислена Максвеллом швидкість поширення електромагнітних хвиль збіглася зі швидкістю світла, на підставі чого вчений припустив, що світло — це також електромагнітні хвилі.

Наприкінці 19-го століття існування електромагнітних хвиль було підтверджено на досліді німецьким фізиком Генріхом Герцем. Здобуті ним результати підтвердили основні положення теорії Максвелла й переконали вчених у реальності електромагнітного поля.

Про електромагнітне поле ми розповімо докладніше в курсі фізики 11-го класу. Наразі для нас важливо, що «невидиме» електричне поле є таким самим реальним, як і всі предмети, які ми бачимо, чуємо або відчуваємо в будь-який інший спосіб, — більше того, лише завдяки електричному полю ми їх і відчуваємо. Розповімо про це докладніше.

### ЧИ МОЖНА ВІДЧУТИ ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ?

Розглянемо: що ж насправді сприймають усі п'ять наших органів почуттів?

#### Зір

Почнемо із **зору**, оскільки близько 90 % усієї інформації про навколишній світ ми одержуємо завдяки зору.

Як не дивно, **єдине**, що сприймає око, — це **електричне поле** електромагнітної хвилі, оскільки світло — це електромагнітні хвилі певного діапазону частот. Електромагнітні ж хвилі інших частот, а також електричне поле, що оточує заряджені тіла, зорових відчуттів не викликають. Але «невидимість» цього поля

не означає, що його не існує: адже наше вухо, наприклад, не сприймає ультразвук, але його реальність ні в кого не викликає сумнівів.

Для того й винаходять різні прилади, щоб суттєво розширити можливості наших органів чуттів: спостерігаючи за показами приладів, ми бачимо або чуємо те, що недоступно оку або вуху безпосередньо. І за допомогою приладів або спеціально проведених дослідів можна легко виявити наявність електричного поля: у наступному параграфі ми розповімо, як можна «побачити» електричне поле, що його створюють заряджені тіла, які перебувають у спокої.

#### Дотик

Коли ви відчуваєте який-небудь предмет на дотик, між вашою рукою й цим предметом діють сили пружності або сили тертя. Однак обидві ці сили, як ви вже знаєте, мають електричну природу. Наприклад, якщо ви спробуєте «проткнути пальцем стіну», рухові вашого пальця крізь стіну перешкодить електричне поле, створене зарядженими частинками стіни: це воно рішучо зупинить заряджені частинки вашого пальця.

#### Слух

Слухові відчуття зумовлені змінним тиском звукових хвиль на барабанну перетинку, тобто зумовлені силами пружності. А ці сили, як ми вже казали, мають електричну природу.

#### Смак і нюх

Сприйняття смаку й запаху має хімічну природу, а ми вже знаємо, що взаємодія молекул також має електричну природу.

### ЧИ МАЄ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ЕНЕРГІЮ?

Електромагнітне поле уявляється багатьом як щось досить примарне, із чим важко навіть зв'язати уявлення про енергію. Однак саме електромагнітне поле доставляє на Землю енергію Сонця, що є джерелом майже всіх видів енергії на Землі.

І саме електромагнітне поле мчить зі швидкістю світла вздовж ліній електропередач, несучи електроенергію містам і селам. Уявіть собі: уздовж дротів з колосальною швидкістю мчить величезна енергія — наприклад, енергія великої річки, що живить гідроелектростанцію.

Має енергію й електричне поле, створене зарядами, що перебувають у спокої. Таке поле називають електростатичним. Докладніше ми розглянемо це в § 19. *Електроємність. Енергія електричного поля.*



## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Як називають одиницю електричного заряду в системі СІ?
2. Що таке точковий заряд?
3. Сформулюйте закон Кулона.
4. Що таке елементарний електричний заряд?
5. Як і ким було виміряно заряд електрона?
6. Що спільного в законі Кулона із законом всесвітнього тяжіння й чим відрізняються ці закони?
7. Які основні властивості електричного поля? Хто ввів уявлення про це поле?
8. Чи можна відчутти електричне поле?
9. Чому дорівнює електричний заряд ядра Карбону? Заліза?
10. Як за допомогою поділу заряду навпіл одержати заряд, який дорівнює  $\frac{3}{4}q$ ? Заряд, який дорівнює  $\frac{5}{8}q$ ?
11. Чи існує гравітаційне притягання між однойменно зарядженими тілами? Якщо так, то чому його зазвичай не враховують?

## § 16. НАПРУЖЕНІСТЬ І ЛІНІЇ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

1. Напруженість електричного поля
2. Лінії напруженості

У цьому параграфі ми визначимо напруженість поля — величину, яка характеризує електричне поле в кожній точці простору.

Ми розглянемо також наочне графічне зображення електричного поля за допомогою ліній напруженості й наведемо приклади ліній напруженості полів, створених різними розподілами зарядів.

### 1. НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

У цьому розділі ми будемо розглядати електричне поле, створене електричними зарядами, **що перебувають у спокої**. Нагадаємо, що таке поле називають **електростатичним**.

Як ми вже знаємо, електричне поле виявляє себе тим, що діє з деякою силою на електричний заряд, який поміщено в це поле. Тому характеризувати поле в даній точці простору можна за допомогою сили, що діє на точковий «пробний» заряд<sup>1</sup>, поміщений у цю точку.

Однак ця сила залежить також від пробного заряду: як показує дослід, сила  $\vec{F}$ , яка діє на пробний заряд  $q$ , пропорційна до цього заряду. А це значить, що **відношення** сили до заряду не залежить від величини заряду й тому характеризує саме електричне поле.

Фізична величина, яка дорівнює відношенню сили  $\vec{F}$ , що діє з боку електричного поля на точковий пробний заряд  $q$ , уміщений у дану точку поля, до цього заряду, називають **напруженістю**  $\vec{E}$  електричного поля в даній точці:  $\vec{E} = \vec{F}/q$ .

Із цього визначення випливає, що напруженість поля є **векторною величиною**: її напрям збігається з напрямом сили, що діє з боку поля на **позитивний** заряд.

<sup>1</sup> Пробний заряд має бути досить малим, щоб поле, яке він створює, не спричиняло перерозподілу зарядів, поле яких ми хочемо дослідити.

Одиницею напруженості поля є 1 Н/Кл.

Щоб повністю охарактеризувати електричне поле, треба задати його напруженість у кожній точці простору: тоді силу  $\vec{F}_1$ , яка діє на будь-який заряд  $q_1$ , розташований в даній точці, можна знайти за формулою  $\vec{F}_1 = q_1 \vec{E}$ , де  $\vec{E}$  — напруженість поля в даній точці.

Оскільки напруженість поля визначають за допомогою сили, що діє на заряд, її називають **силовою** характеристикою поля. Надалі ми зустрінемося і з енергетичною характеристикою поля.

## НАПРУЖЕНІСТЬ ПОЛЯ ТОЧКОВОГО ЗАРЯДУ

Виберемо спочатку для певності позитивний заряд  $Q$ .

Щоб знайти напрям напруженості поля в даній точці, скористаємося тим, що він збігається з напрямом сили, яка діє на позитивний пробний заряд  $q$ . Оскільки однойменні заряди відштовхуються, напруженість поля точкового заряду в будь-якій точці буде спрямована вздовж променя, напрямленого від заряду  $Q$  в дану точку. На рис. 16.1 зображено напруженість поля позитивного точкового заряду в деяких точках.

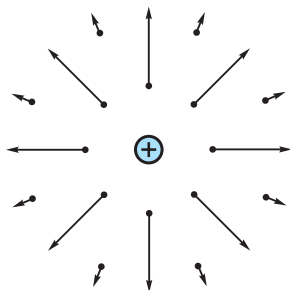


Рис. 16.1. Напруженість поля позитивного точкового заряду в деяких точках. Зверніть увагу на те, що модуль напруженості в разі віддалення від заряду зменшується.

Модуль напруженості поля в даній точці знайдемо за допомогою закону Кулона. На пробний заряд  $q$ , розташований на відстані  $r$  від

заряду  $Q$ , діє сила  $F = k \frac{Qq}{r^2}$ . Оскільки модуль напруженості поля

$E = F/q$ , модуль напруженості поля, створюваного позитивним точ-

ковим зарядом  $Q$ , дорівнює  $E = k \frac{Q}{r^2}$ .

Напруженість поля негативного точкового заряду відрізняється від напруженості поля позитивного заряду тільки напрямом, оскільки позитивний пробний заряд притягується до негативного заряду. А в наведеній вище формулі для модуля напруженості треба тільки замінити  $Q$  на  $|Q|$ . Тоді вона буде придатною для модуля напруженості поля точкового заряду будь-якого знака.

## ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦІЇ ПОЛІВ

Дослід показує, що коли пробний заряд розташовано в полі, створеному **кількома** зарядами, то кожний із них діє на пробний заряд незалежно від інших.

Отже, напруженість поля  $\vec{E}$ , створеного в даній точці кількома зарядами, дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створених у цій точці кожним із зарядів:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$ . Це положення називають **принципом суперпозиції** (накладання) полів.

Принцип суперпозиції дає змогу знайти напруженість поля, створеного кількома зарядами, а також зарядами, розподіленими по поверхнях (наприклад, сфери або площини).

## 2. ЛІНІЇ НАПРУЖЕНОСТІ

Можна помітити, що вектори напруженості в різних точках ніби «вишикуються» вздовж певних ліній.

Уявні лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом напруженості електричного поля, називають **лініями напруженості** електричного поля<sup>1</sup>.

Щоб охарактеризувати не тільки напрям, але й модуль напруженості поля в різних точках, лінії напруженості проводять так, щоб **щільність ліній напруженості була пропорційною до модуля напруженості**.

За цієї умови лінії напруженості будуть **безперервними**, тобто **починатимуться на позитивних зарядах і закінчуватимуться на негативних зарядах**<sup>2</sup>.

**Лінії напруженості електричного поля не перетинаються** (якби вони перетиналися, то в точці їх перетину напрям напруженості поля не було б визначено).

## ПРИКЛАДИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

### Поля точкових зарядів

На рис. 16.2а наведені як приклад лінії напруженості поля позитивного точкового заряду, на рис. 16.2б — негативного точкового заряду, а на рис. 16.3 — поля, створеного однакоковими за модулем зарядами (різноїменними й однойменними).

<sup>1</sup> Іноді їх називають також «силовими лініями».

<sup>2</sup> Лінії напруженості точкових зарядів, показані на рис. 16.2, закінчуються (або починаються) на віддалених зарядах протилежного знака.



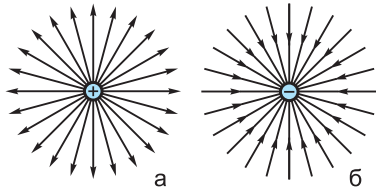


Рис. 16.2. Лінії напруженості полів точкових зарядів:  
а) позитивного, б) негативного.

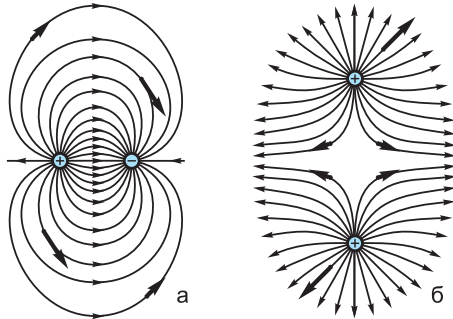


Рис. 16.3. Лінії напруженості полів, створених парами різнойменних і однойменних точкових зарядів.  
Для наочності в деяких точках зображено вектор напруженості поля.

### Поле рівномірно зарядженої сфери

Розрахунки показують, що всередині рівномірно зарядженої сфери напруженість поля дорівнює нулю. Причина цього полягає в тому, що в будь-якій точці всередині сфери електричні поля, створені зарядами, розташованими на різних частинах поверхні сфери, компенсують одне одного.

Тому лінії напруженості, що починаються на рівномірно зарядженій сфері, виходять назовні і, унаслідок сферичної симетрії, напрямлені вздовж променів, що виходять із центра сфери. Отже, поза рівномірно зарядженою сферою створюване нею поле збігається з полем точкового заряду, розміщеного в центрі сфери. На рис. 16.4 зображено лінії напруженості поля рівномірно зарядженої сфери.

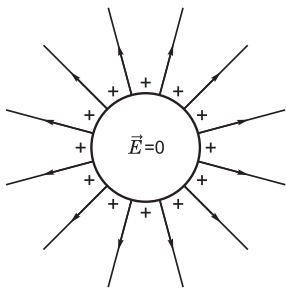


Рис. 16.4. Лінії напруженості поля рівномірно зарядженої сфери.

### Поле рівномірно зарядженої площини

Якщо напруженість поля в усіх точках деякої області простору однакова, поле в цій області називають **однорідним**. Таке поле створює рівномірно заряджена плоска поверхня досить великих розмірів. На рис. 16.5 зображено лінії напруженості такого поля: це паралельні прямі, розташовані на рівних відстанях одна від одної. По різні боки від площини вектор напруженості поля напрямлений у протилежні боки. Якщо площина заряджена позитивно, вектор напруженості напрямлений «від площини», а якщо негативно — «до площини».

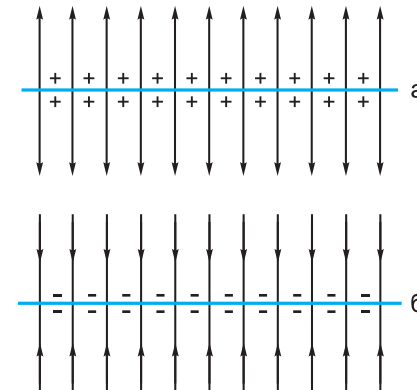


Рис. 16.5. Поле однорідно зарядженої площини:  
а) позитивно зарядженої, б) негативно зарядженої.

### Поле двох різнойменно заряджених плоских пластин

Якщо дві рівномірно заряджені плоскі пластини з однаковою щільністю зарядів **протилежних знаків** розташовані паралельно на малій відстані одна від одної, то електричне поле буде зосереджено переважно тільки між пластинами, де воно буде практично однорідним (рис. 16.6). Поза пластинами напруженість поля практично дорівнюватиме нулю.

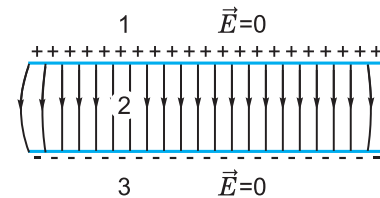


Рис. 16.6. Поле двох різнойменно заряджених плоских пластин.

Причина цього полягає в тому, що в областях 1 і 2 поза пластинами (див. рис. 16.6) вектори напруженості полів, створених пластинами, рівні за модулем й протилежні за напрямом, унаслідок чого сумарна напруженість поля дорівнює нулю, а в області 3, тобто між пластинами, вектори напруженості цих полів напрямлені в один бік і тому сумарна напруженість поля буде вдвічі більша за напруженість поля, створюваного якоюсь одною пластиною.

Як ми побачимо пізніше (див. § 19. *Електроємність. Енергія електричного поля*), на двох близько розташованих паралельних пластинах можна нагромаджувати великі електричні заряди. Пристрої, які нагромаджують електричні заряди, називають конденсаторами. Їх широко використовують, наприклад, у радіоприймачах і радіопередавачах.

### ЧИ МОЖНА «ПОБАЧИТИ» ЛІНІЇ НАПРУЖЕНОСТІ?

Лінії напруженості електричного поля є уявними лініями, але їх можна зробити «видимими», якщо помістити в це поле дрібні тіла довгастої форми — кристалики, частинки манної крупи, дрібно настрижене волосся й т.п. Річ у тім, що такі тіла повертаються в електричному полі, орієнтуючись уздовж вектора напруженості (причину цього ми розглянемо в § 17. *Провідники й діелектрики в електростатичному полі*).

Отже, якщо надати таким тілам можливість повертатися (наприклад, помістивши їх у олію), вони досить швидко «вишикуються» уздовж ліній напруженості поля, зробивши їх дуже наочними. На рис. 16.7 наведено фотографії результатів дослідів з однойменними й різнойменно зарядженими кульками. Порівняйте їх зі схематичними зображеннями полів, наведеними вище на рис. 16.3.

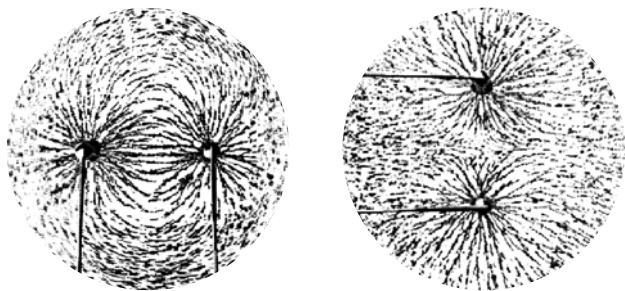


Рис. 16.7. «Візуалізація» ліній напруженості електричних полів.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке напруженість електричного поля? Чи є вона величиною скалярною або векторною?
2. Наведіть формулу для напруженості поля точкового заряду. Як напрямлена напруженість цього поля у випадку позитивного й негативного зарядів?
3. У чому полягає принцип суперпозиції для електричних полів?
4. Що таке лінії напруженості? Де вони починаються й де закінчуються? Що визначає щільність ліній напруженості? Чи можуть лінії напруженості перетинатися?
5. Зобразіть схематично лінії напруженості для: а) поля точкового заряду (позитивного й негативного); б) поля рівномірно зарядженої сфери; в) поля рівномірно зарядженої площини; г) поля двох різнойменно заряджених пластин із рівними за модулем зарядами.
6. Опишіть дослід, за допомогою якого можна «побачити» лінії напруженості.
7. Точка розташована на середині відрізка, що з'єднує два однакових за модулем електричні заряди. Чи може напруженість поля, створюваного в цій точці обома зарядами, дорівнювати нулю? Обґрунтуйте свою відповідь.

## § 17. ПРОВІДНИКИ Й ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

1. Провідники
2. Діелектрики

У цьому параграфі ми розглянемо, як впливає електричне поле на провідники й діелектрики.

Ми побачимо, що завдяки наявності в провідниках вільних зарядів напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю.

Ми розповімо також, чому напруженість електричного поля в діелектриках зменшується.

### 1. ПРОВІДНИКИ

У деяких речовинах є заряджені частинки, які можуть вільно переміщатися в речовині. Такі частинки називають **вільними зарядами**, а речовини, що містять вільні заряди, називають **провідниками**.

Якщо помістити провідник в електричне поле, то під дією поля вільні заряди, що перебувають у ньому, почнуть рухатися, у результаті чого **в провіднику** виникне електричний струм. Провідники тому так і називають, що вони можуть проводити електричний струм. Електричний струм і пов'язані з ним явища ми розглянемо в *Розділі 4. Закони постійного струму*.

Найкращі провідники — це **метали**. Річ у тім, що в атомах металів зовнішні (так звані «валентні») електрони слабо зв'язані зі своїми атомами й тому легко відриваються від них й «колективізуються», належачи всьому шматку металу загалом. Колективізовані електрони утворюють «електронний газ», що оточує кристалічну ґратку з позитивних іонів металу. Такі електрони називають часто «**вільними електронами**» або «**електронами провідності**», тому що вони можуть вільно переміщатися по всьому шматку металу.

Провідниками є також розчини солей (наприклад, кухонної солі). У цьому випадку роль вільних зарядів відіграють позитивно й негативно заряджені **іони**. Оскільки живі тканини містять розчини солей, вони є провідниками.

### ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

Якщо провідник ізольований, то під дією електричного поля вільні заряди можуть тільки перерозподілятися в ньому: в одних частинах провідника буде виникати їх надлишок, а в інших — нестача. У результаті частини провідника набудуть електричних зарядів протилежних знаків.

Розглянемо приклад: металеву кулю вносять в однорідне електричне поле, напруженість якого напрямлена зліва направо (рис. 17.1).

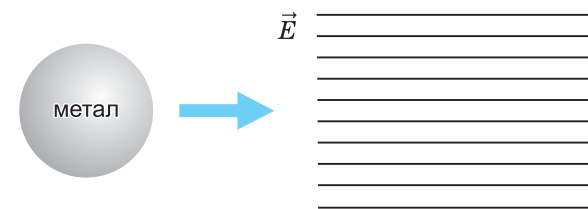


Рис. 17.1. Металеву незаряджену кулю вносять в однорідне електричне поле.

Під дією поля вільні електрони в металі почнуть рухатися. Оскільки вони мають негативний заряд, то вони рухатимуться протилежно напруженості поля (на рис. 17.1 — ліворуч). У результаті на правому боці кулі утвориться нестача електронів, тобто виникне позитивний заряд, а на лівому боці кулі утвориться надлишок електронів, тобто виникне негативний заряд (див. рис. 17.2).

Рух електронів триватиме доти, поки напруженість сумарного поля всередині кулі не стане дорівнювати **нулю**<sup>1</sup>. Тому, коли заряди перебувають у рівновазі,

напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю.

На рис. 17.2 показано лінії напруженості електричного поля після внесення до нього металеві кулі. Усередині кулі напруженість поля дорівнює нулю. Зверніть увагу на те, що внаслідок появи зарядів на поверхні кулі поле поза кулею також змінилося.

Якщо провідник заряджений, його вільні заряди також перерозподіляться таким чином, щоб напруженість електричного поля **всередині** провідника дорівнювала нулю, оскільки й у цьому разі вільні заряди переміщатимуться в провіднику доти, поки на них діє сила з боку електричного поля.

<sup>1</sup> Заряди перерозподіляються дуже швидко.

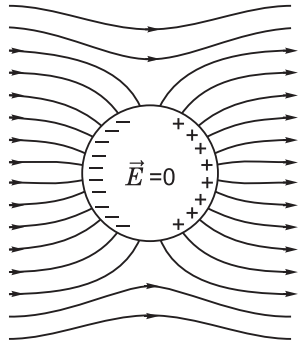


Рис. 17.2. Металева куля в електричному полі. Напруженість поля всередині кулі дорівнює нулю.

Розрахунки й досліди показують, що електричний заряд завжди буде розташовуватися **на поверхні** провідника — як у випадку зарядженого, так і у випадку незарядженого провідника.

### Електростатичний захист

Рівність нулю напруженості електричного поля всередині провідника використовують для створення так званого **електростатичного захисту**. Оскільки заряди на провіднику розташовуються на його поверхні, розподіл зарядів буде однаковим для суцільного й порожнього провідників — наприклад, для кулі й сфери такого самого радіуса. Отже, напруженість електричного поля всередині провідної сфери або будь-якої іншої замкнутої області, оточеної провідником, дорівнює нулю. Тому чутливі до електричного поля прилади вміщують у металеві ящики.

Для того щоб напруженість поля всередині порожнього провідника дорівнювала нулю, не обов'язково навіть, щоб поверхня провідника була суцільною: роль електростатичного захисту з успіхом відіграє тонка дротяна сітка (її називають іноді «сіткою» Фарадея — рис. 17.3).

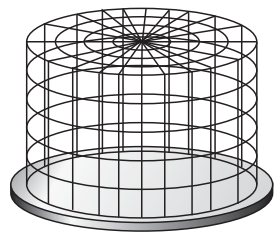


Рис. 17.3. «Сітка» Фарадея.

Електростатичний захист використовують і для того, щоб захистити людей, які працюють із пристроями, розташованими в сильному електричному полі: у такому разі металевою сіткою оточують простір, у якому працюють люди.

## 2. ДІЕЛЕКТРИКИ

Речовини, у яких вільні заряди відсутні, називають **діелектриками** (або **ізоляторами**, оскільки такі речовини не проводять електричний струм і тому ізолюють провідники один від одного).

Діелектриками є гази (у тому числі повітря) і багато рідин (у тому числі чиста вода, що не містить солей). Серед твердих тіл найпоширеніші діелектрики — скло, пластмаси, гума.

У діелектриках електрони міцно пов'язані зі своїми молекулами (або атомами). Однак це не означає, що діелектрики «не відчують» електричного поля: під його дією молекули діелектриків повертаються або деформуються. Це спричинює виникнення на поверхні діелектрика електричних зарядів, у результаті чого напруженість електричного поля всередині діелектрика зменшується (але не стає такою, що дорівнює нулю, як у випадку провідника). Розглянемо це докладніше.

### ДВА ВИДИ ДІЕЛЕКТРИКІВ

#### Полярні діелектрики

У молекулах деяких речовин центри розподілу позитивних і негативних зарядів не збігаються. Такі діелектрики називають **полярними**, оскільки в їхніх молекулах є ніби два «полюси» зарядів — позитивний і негативний (рис. 17.4). Наприклад, у молекулі води  $H_2O$ , яка складається з одного атома Оксигену й двох атомів Гідрогену, електрони атомів Гідрогену більшу частину часу проводять поблизу атома Оксигену, у результаті чого негативний заряд зміщується в бік атома Оксигену, а поблизу атомів Гідрогену виникає позитивний заряд.

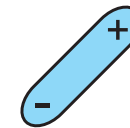


Рис. 17.4. Схематичне зображення полярної молекули.

Молекули полярних діелектриків під дією електричного поля повертаються, як схематично зображено на рис. 17.5а, набуваючи положення, показаного на рис. 17.5б.

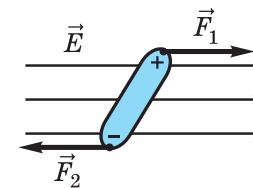


Рис. 17.5а. Поворот молекули полярного діелектрика в електричному полі.

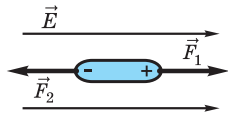


Рис. 17.56. Положення, що набуває молекула полярного діелектрика в електричному полі.

### Неполярні діелектрики

Діелектрики, у молекулах яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються, називають **неполярними**. До них належать, наприклад, інертні гази, кисень, бензол.

Під дією зовнішнього електричного поля позитивні й негативні заряди в молекулі «розтаскуються» у протилежні боки. У результаті центри розподілу позитивних і негативних зарядів молекули перестають збігатися, і розподіл зарядів у цій молекулі стає подібним до розподілу зарядів у полярній молекулі, зорієнтованої «уздовж поля» (як показано на рисунку 17.56).

### ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Як ми бачили, під дією електричного поля молекули діелектриків «вишикуються» у напрямі напруженості зовнішнього електричного поля<sup>1</sup>. Це явище називають **поляризацією діелектрика**.

При цьому, як видно на рис. 17.6, усередині діелектрика позитивний і негативний заряди компенсуються, але на його **поверхні** з'являються заряди. Ці заряди називають **зв'язаними**, оскільки вони зумовлені перерозподілом заряду тільки всередині молекул (а не в усьому зразку, як це відбувається, коли вільні заряди рухаються в провіднику).

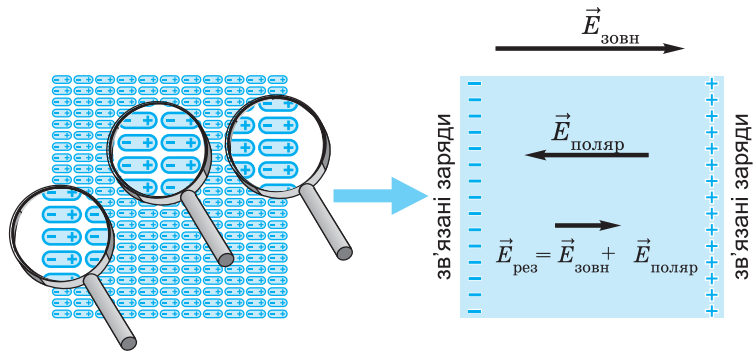


Рис. 17.6. Схематичне зображення поляризації діелектрика.

<sup>1</sup> Насправді молекули полярних діелектриків лише частково зорієнтовуються.

Ми бачимо, що напруженість «внутрішнього» поля  $\vec{E}_{\text{поляр}}$ , що виникло в результаті поляризації діелектрика, напрямлена **протилежно** напруженості  $\vec{E}_{\text{зовн}}$  зовнішнього електричного поля. У результаті модуль напруженості сумарного поля  $\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_{\text{зовн}} + \vec{E}_{\text{поляр}}$  зменшується. Отже,

унаслідок поляризації діелектрика напруженість електростатичного поля всередині діелектрика зменшується.

### ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ

Величину, що показує, у скільки разів зменшується напруженість електричного поля всередині однорідного діелектрика, називають **діелектричною проникністю** і позначають  $\epsilon$ .

У результаті зменшення напруженості електричного поля зменшується й сила взаємодії заряджених тіл, занурених у діелектрик, тому що вони взаємодіють за допомогою поля. Наприклад, для зарядів, що перебувають в однорідному діелектрику з діелектричною проникністю  $\epsilon$ , закон Кулона набуває вигляду

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Значення діелектричної проникності для різних речовин можуть сильно відрізнятися.

Наприклад, для повітря  $\epsilon = 1,0006$ , тобто надто мало відрізняється від 1. Дуже близька до 1 діелектрична проникність й інших газів. Діелектрична проникність рідин змінюється в широких межах. Особливо великим  $\epsilon$  значення діелектричної проникності у води, для якої  $\epsilon = 81$ . У більшості твердих діелектриків діелектрична проникність дорівнює декільком одиницям, але  $\epsilon$  речовини, у яких вона досягає кількох тисяч.

### ЧОМУ ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ДІЄ НА НЕЗАРЯДЖЕНІ ПРЕДМЕТИ?

Як ви пам'ятаєте, цей розділ почався з розповіді про чудову властивість натертого бурштину притягати дрібні предмети, яка здивувала стародавніх греків. Ця властивість залишається поки дивною і для нас — навіть після того, як ми просунулися в розумінні природи електричних явищ. Ми вже знаємо, що натертій бурштин набуває електричного заряду, але чому заряджений бурштин притягує **незаряджені** легкі предмети (пушинки, шматочки паперу)?

Згадаємо також дослід із «візуалізації» ліній напруженості електричного поля (див. § 16. *Напруженість і лінії напруженості електричного поля*). Ця демонстрація є можливою завдяки орієнтувальній дії електричного поля: дрібні тіла довгастої форми — кристалики, частинки манної крупи, дрібно настрижене волосся й т.п. — поверталися під дією електричного поля, «вишикуючись» уздовж його ліній напруженості. І знову виникає запитання: чому електричне поле орієнтує *незаряджені* тіла? З відповіді на це запитання ми й почнемо.

#### Чому тіла довгастої форми повертаються в електричному полі?

Ви вже знаєте, що внаслідок поляризації діелектрика на його поверхні з'являються зв'язані заряди *протилежних* знаків. Якщо зразок діелектрика має довгасту форму, ці заряди зосереджено переважно *на кінцях* зразка. Тому якщо зразок розташовано під деяким кутом до ліній напруженості, на один кінець зразка з боку поля буде діяти сила, напрямлена в один бік, а на другий кінець — у протилежний. Саме ці сили й будуть повертати зразок уздовж ліній напруженості поля. Орієнтувальна дія електричного поля на довгасті частинки діелектрика подібна, таким чином, до орієнтувальної дії цього поля на молекули полярного діелектрика (див. рис. 17.5а).

Електричне поле орієнтуватиме і металеві предмети довгастої форми (наприклад, ошурки): у цьому разі заряди протилежних знаків зосереджуються на кінцях предмета внаслідок перерозподілу вільних зарядів під дією зовнішнього поля.

#### Чому незаряджені предмети притягуються до заряджених?

Навколо заряджених предметів виникає зазвичай *неоднорідне* електричне поле: у разі віддалення від зарядженого предмета напруженість поля спадає, а *в разі наближення до предмета* — *збільшується* (винятком, як ви вже знаєте, є поле поблизу великої зарядженої пластини).

Розглянемо тепер, що відбувається, коли ми вносимо незаряджене тіло з діелектрика в неоднорідне поле. Унаслідок поляризації діелектрика на його поверхні з'являються зв'язані заряди протилежних знаків, у результаті чого на різні частини предмета діятимуть з боку поля *протилежно* напрямлені сили. У *неоднорідному* полі ці сили не рівні: «перемагає» та сила, що діє на заряди, розташовані в сильнішому полі, тобто *ближче до зарядженого тіла* (рис. 17.7). А це й означає, що незаряджене тіло буде *притягуватися* до зарядженого.

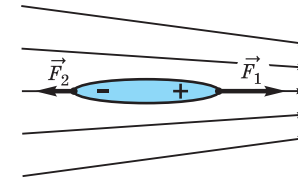


Рис. 17.7. Втягування діелектрика в область сильнішого поля.

Незаряджене тіло, що складається з провідника, також буде притягатися до зарядженого тіла: у цьому разі заряди на поверхні тіла з'являються внаслідок перерозподілу вільних зарядів.

Тепер стає зрозумілим, чому спочатку було виявлене *притягання*, зумовлене електричною взаємодією, і тільки через дві тисячі років після цього — відштовхування. Адже для того, щоб тіла притягалися, досить, аби лише *одне* з них було зарядженим (причому зарядом будь-якого знака), а для того, щоб тіла відштовхувалися, необхідно, щоб *обидва* тіла були зарядженими (причому обов'язково різнойменно).

### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які речовини називають провідниками, а які — діелектриками?
2. Чому, якщо вільні заряди перебувають у рівновазі, електростатичне поле всередині провідника дорівнює нулю?
3. Що таке електростатичний захист? Коли його використовують?
4. Які вам відомі види діелектриків? Чим вони відрізняються?
5. Що таке поляризація діелектрика? Де при цьому з'являються електричні заряди? Як їх називають?
6. Як змінюється електричне поле, якщо в нього вносять діелектрик? Чим зумовлена ця зміна?
7. Чому електричне поле діє на незаряджені предмети?
8. Чому незаряджені предмети притягуються до заряджених?
9. Зарядженою металевою кулькою дотикаються до незарядженої порожньої металевої кульки такого самого радіуса. Як розподілиться заряд між кульками?
10. Чи буде взаємодіяти заряджена скляна кулька з такою самою, але незарядженою кулькою? Обґрунтуйте свою відповідь.

## § 18. ПОТЕНЦІАЛЬНА ЕНЕРГІЯ ЗАРЯДУ. ПОТЕНЦІАЛ І РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ

1. Потенціальна енергія заряду в електростатичному полі
2. Потенціал електростатичного поля та різниця потенціалів
3. Зв'язок між різницею потенціалів і напруженістю електричного поля
4. Чому бувають грози?

У цьому параграфі ми розглянемо потенціальну енергію заряду в електростатичному полі й уведемо енергетичну характеристику такого поля — потенціал і різницю потенціалів.

Ми розглянемо зв'язок між основними характеристиками електростатичного поля — різницею потенціалів і напруженістю.

Наприкінці параграфа ми розповімо, чому відбуваються грози. Ми побачимо, що блискавки не зменшують електричний заряд Землі, а, навпаки, постійно «відтворюють» його.

### 1. ПОТЕНЦІАЛЬНА ЕНЕРГІЯ ЗАРЯДУ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

На заряд<sup>1</sup>, розташований в електростатичному полі, діє сила з боку цього поля. Ця сила може виконувати роботу (ми для стислості називатимемо її роботою поля). Отже, система «заряд + поле» *може виконувати роботу*.

З курсу механіки ви вже знаєте, що така система може мати *потенціальну енергію*, причому зміна потенціальної енергії  $\Delta W_p$  пов'язана з виконаною системою роботою  $A$  співвідношенням  $\Delta W_p = -A$  (знак «мінус» означає, що якщо система виконує додатну роботу, її потенціальна енергія зменшується, а якщо від'ємну — збільшується).

Якщо даний заряд досить малий (так званий «пробний» заряд), то часто для стислості кажуть про *потенціальну енергію заряду* в даному електростатичному полі.

Увести поняття потенціальної енергії заряду можна тільки в тому разі, коли робота поля з переміщення заряду з однієї точки в іншу *залежить тільки від положення* цих точок і *не зале-*

<sup>1</sup> Нагадаємо, що зарядом ми для стислості називаємо тут заряджене тіло (якщо головною для нас властивістю є електрична взаємодія даного тіла з іншими зарядженими тілами).

*жить від траєкторії* руху заряду. Справді, якби робота в разі переміщення заряду з точки 1 у точку 2 для траєкторій  $a$  і  $b$  була б різною (рис. 18.1), то різними були б і зміни потенціальної енергії заряду в разі переміщення з точки 1 у точку 2. Тому не можна було б однозначно визначити зміну потенціальної енергії заряду в разі переміщення його з однієї точки в іншу, і, отже, не можна було б казати й про потенціальну енергію заряду в поле.

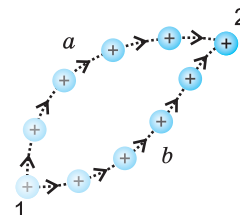


Рис. 18.1. Дві різні траєкторії переміщення заряду із точки 1 у точку 2.

Розрахунки й дослід показують, що *електростатичне* поле, тобто поле, створене електричними зарядами, які перебувають у спокої, саме має таку властивість, що робота поля в разі переміщення заряду з однієї точки в іншу залежить лише від положення цих точок і не залежить від траєкторії руху заряду. Отже, *для заряду в електростатичному полі можна ввести поняття потенціальної енергії заряду*.

### Вихрове електричне поле

У курсі фізики 11-го класу ви довідаєтеся, що існує і таке електричне поле, у якому робота поля при переміщенні заряду з однієї точки в іншу залежить не тільки від положення цих точок, але й від *траєкторії* руху заряду. Лінії напруженості такого поля не починаються на позитивних зарядах і не закінчуються на негативних — вони *замкнуті*. Тому це поле називають *вихровим електричним полем*. Воно відіграє величезну роль як у природі, так і в техніці: наприклад, зумовлює поширення електромагнітних хвиль (у тому числі світла й радіохвиль), а також дію генераторів на електростанціях. Із зазначених вище причин у такому полі не можна ввести поняття потенціальної енергії заряду.

### Нульовий рівень потенціальної енергії

З курсу механіки ви знаєте, що *нульовий рівень* потенціальної енергії, тобто стан системи, якому ставлять у відповідність нульове значення потенціальної енергії, можна вибирати довільно, виходячи з міркувань зручності<sup>1</sup>. Часто нульове значення потенціальної енергії зіставляють із так званим «нескінченно віддаленим» зарядом, тобто зарядом, розташованим настільки далеко від зарядів, які створюють поле, що дією цього поля на даний заряд можна нехтувати.

<sup>1</sup> Нагадаємо: це зумовлено тим, що робота, яку виконує система, дорівнює тільки *зміні* потенціальної енергії.

## 2. ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ ТА РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ

У багатьох випадках, наприклад, коли вивчають дію електричного струму, основний інтерес становить не сила, що діє на заряд в електричному полі, а **робота**, виконана полем у разі переміщення заряду. Так, саме вона визначає яскравість електричних ламп і потужність електродвигунів.

Роботу, виконувану полем під час переміщення заряду, можна легко виразити через **енергетичну** характеристику поля, яку ми зараз і розглянемо.

### ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Визначимо енергетичну характеристику поля аналогічно до того, як ми визначали силову характеристику поля (напруженість) у § 16. **Напруженість і лінії напруженості електричного поля**. Нагадаємо: тоді ми скористалися тим, що сила, яка діє на пробний заряд, пропорційна до величини цього заряду, унаслідок чого **відношення** сили до пробного заряду не залежить від заряду й характеризує **саме поле**.

Зазначимо тепер, що оскільки сила, яка діє з боку поля на заряд, пропорційна до цього заряду, то й робота, виконувана полем під час переміщення заряду, також пропорційна до заряду. А оскільки робота дорівнює з оберненим знаком зміні потенціальної енергії, то й потенціальна енергія заряду в полі пропорційна до заряду. Отже, **відношення** потенціальної енергії заряду до заряду не залежить від заряду й тому характеризує **саме поле**.

**Потенціалом** електростатичного поля  $\varphi$  у даній точці називають фізичну величину, яка дорівнює відношенню потенціальної енергії  $W_p$  заряду  $q$ , поміщеного в дану точку поля, до цього заряду:  $\varphi = \frac{W_p}{q}$ .

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

Із цього визначення випливає, що потенціал поля є **скалярною** величиною (на відміну від напруженості поля, що є векторною величиною).

### Приклади

Знайдемо, як змінюється потенціал електростатичного поля точкового заряду в разі наближення до цього заряду.

1. Однойменні заряди відштовхуються, тому коли позитивний пробний заряд наближається до позитивного заряду,

поле виконує від'ємну роботу. Отже, відповідно до формули  $\Delta W_p = -A$  потенціальна енергія пробного заряду збільшується. Це означає, що **в разі наближення до позитивного заряду потенціал електростатичного поля цього заряду збільшується**.

2. Різнойменні заряди притягуються, тому коли позитивний пробний заряд наближається до негативного заряду, поле виконує додатну роботу. Отже, потенціальна енергія пробного заряду зменшується. Це означає, що **в разі наближення до негативного заряду потенціал електростатичного поля цього заряду зменшується**.

### РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ

Ви вже знаєте, що фізичний зміст має не сама потенціальна енергія, а лише **зміна** потенціальної енергії  $\Delta W_p$ : саме вона пов'язана з роботою, виконаною системою, співвідношенням  $\Delta W_p = -A$ .

Відповідно до цього й фізичний зміст має не сам потенціал поля, а **різниця** потенціалів між якимись точками. Виходячи з визначення потенціалу, дістаємо, що

**різниця потенціалів** між точками 1 й 2 дорівнює відношенню роботи поля, виконаної в разі переміщення заряду з точки 1 у точку 2, до цього заряду:  $\varphi_1 - \varphi_2 = A/q$ .

Різницю потенціалів називають також **напругою**<sup>1</sup> й позначають  $U$ .

### Одиниця різниці потенціалів

У системі СІ одиницею різниці потенціалів є **вольт** (скорочено В). Ця одиниця названа на честь італійського вченого Алессандро Волта, який створив перше хімічне джерело електричного струму. З визначення різниці потенціалів випливає, що  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$ . Це означає, що якщо різниця потенціалів між двома точками дорівнює 1 В, то в разі переміщення заряду в 1 Кл із однієї точки в іншу електричне поле виконує роботу 1 Дж.

### Електрон-вольт

В атомній фізиці як одиницю енергії часто використовують **електрон-вольт** (скорочено еВ). Один електрон-вольт дорівнює

<sup>1</sup> Не плутайте напругу з напруженістю: напруга (скаляр) є енергетичною характеристикою поля, а напруженість (вектор) — силовою характеристикою.



модулю зміни енергії електрона  $\Delta E$  у разі проходження ним різниці потенціалів  $\Delta\phi = 1 \text{ В}$ .

Оскільки модуль заряду електрона дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , то  $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot \text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

### Чи є великою різниця потенціалів 1 В?

Різниця потенціалів між двома розімкнутими полюсами хімічного джерела струму становить зазвичай від 1,5 В до 9 В. Напруга в електроустаткованні автомобіля й у шкільних приладах для лабораторних робіт не перевищує 12 В. Така напруга не становить небезпеки для людини.

В освітлювальній же мережі всередині квартири напруга дорівнює 220 В. Така напруга **небезпечна для життя**, тому перш ніж ремонтувати несправний електроприлад (праску, вимикач, розетку тощо), необхідно **знеструмити** його (рис. 18.2).

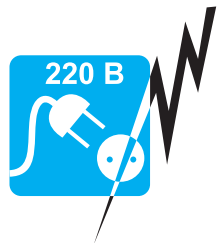


Рис. 18.2. Перш ніж ремонтувати електроприлади, необхідно їх знеструмити!

## 3. ЗВ'ЯЗОК МІЖ РІЗНИЦЕЮ ПОТЕНЦІАЛІВ І НАПРУЖЕНІСТЮ

Силова й енергетична характеристики поля, тобто напруженість і різниця потенціалів, зв'язані одне з одним: адже знаючи силу, що діє на заряд, можна знайти й роботу, виконувану при переміщенні заряду.

Найпростіше знайти співвідношення між різницею потенціалів і напруженістю в однорідному полі.

Нехай позитивний пробний заряд  $q$  переміщається в однорідному електростатичному полі з напруженістю  $\vec{E}$  в напрямі ліній напруженості (рис. 18.3). Тоді на заряд з боку поля діє сила  $q\vec{E}$ , спрямована вздовж переміщення. Отже, у разі переміщення заряду на відстань  $d$  поле виконує роботу  $A = qEd$ .

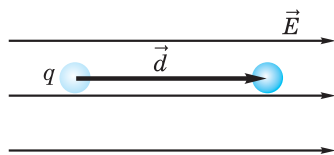


Рис. 18.3. Щодо знаходження роботи поля при переміщенні заряду.

Ця робота пов'язана з різницею потенціалів співвідношенням

$$U = \phi_1 - \phi_2 = \frac{A}{q}. \text{ Підставляючи сюди знайдений вище вираз для роботи } A,$$

одержуємо, що в однорідному електростатичному полі різниця потенціалів між точками, розташованими на одній силовій лінії на відстані  $d$  одна від одної, дорівнює  $U = Ed$ .

Це і є шукане співвідношення між різницею потенціалів і напруженістю.

Його можна записати також у вигляді  $E = \frac{U}{d}$ .

**Напруженість поля напрямлена в бік зменшення потенціалу.**

Наприклад, віддаляючись від позитивного заряду, ми рухаємося в напрямі напруженості поля цього заряду, а потенціал поля заряду при цьому спадає.

### Одиниця напруженості поля

Одиницю напруженості поля можна визначити також, виходячи з формули  $E = \frac{U}{d}$ . Цю одиницю напруженості називають

**вольт на метр** (скорочено  $\frac{\text{В}}{\text{м}}$ ). Вона збігається з одиницею

$1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ , уведеною в § 16. **Напруженість і лінії напруженості електричного поля.**

Напруженість однорідного поля дорівнює  $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ,

якщо різниця потенціалів між двома точками, з'єднаними вектором довжиною 1 м і напрямленим уздовж напруженості поля, становить 1 В.

Людина може без шкоди для здоров'я перебувати в полі напруженістю в кілька сотень  $\frac{\text{В}}{\text{м}}$ . Наприклад, напруженість електричного поля поблизу поверхні Землі дорівнює  $130 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

Причину виникнення електричного поля поблизу поверхні Землі розглянуто нижче в розділі «Чому бувають грози?».

### ЕКВІПОТЕНЦІАЛЬНІ ПОВЕРХНІ

Поле не завжди виконує роботу в разі переміщення заряду.

З курсу механіки ви знаєте, що коли напрям переміщення перпендикулярний до напрямку сили, робота цієї сили дорівнює

нулю. А якщо робота в разі переміщення заряду з однієї точки в іншу дорівнює нулю, то дорівнює нулю й різниця потенціалів між цими точками.

Тому, якщо заряд переміщається в напрямі, перпендикулярному до напрямку ліній напруженості, як показано на рис. 18.4, то робота поля в разі переміщення заряду дорівнює нулю.

А отже, дорівнює нулю й різниця потенціалів між початковою й кінцевою точками траєкторії заряду.

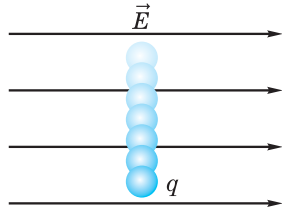


Рис. 18.4. Якщо заряд переміщується в напрямі, перпендикулярному до ліній напруженості, робота поля дорівнює нулю.

У полі точкового заряду дорівнює нулю різниця потенціалів між точками, розташованими на однаковій відстані від цього заряду.

Справді, у цьому випадку пробний заряд можна перемістити з однієї точки в іншу вздовж дуги кола з центром у точці розташування заряду, і при цьому напрям переміщення на кожній малій частині дуги буде перпендикулярним до напрямку напруженості поля (рис. 18.5).

Узагальнюючи розглянуті приклади, можна сказати, що в будь-якому електростатичному полі дорівнює нулю різниця потенціалів між точками, що лежать на поверхні, **перпендикулярній в кожній точці до ліній напруженості поля**. Справді, у разі переміщення пробного заряду з однієї точки в іншу вздовж цієї поверхні поле не виконує роботи.

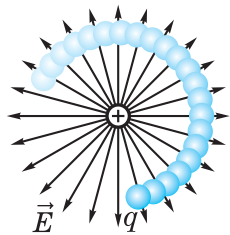


Рис. 18.5. У разі зображеного переміщення пробного заряду в полі точкового заряду робота поля дорівнює нулю.

Отже, усі точки такої поверхні мають однаковий потенціал. Поверхні з однаковим потенціалом називають **еквіпотенціальними поверхнями**.

## Приклади

### 1. Однорідне поле

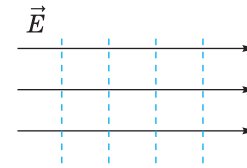


Рис. 18.6. Еквіпотенціальною поверхнею однорідного поля є будь-яка площина, перпендикулярна до напрямку напруженості поля. Пунктирними лініями позначено еквіпотенціальні поверхні.

### 2. Поле точкового заряду

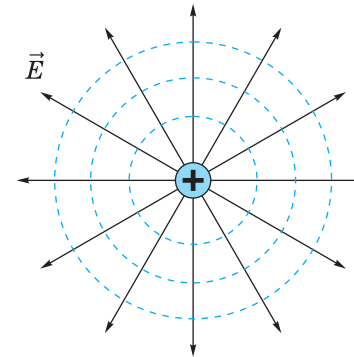


Рис. 18.7. Еквіпотенціальною поверхнею поля точкового заряду є будь-яка сфера з центром у точці знаходження заряду. Пунктирними лініями позначено еквіпотенціальні поверхні.

### Чи може бути еквіпотенціальним об'ємне тіло?

Так, може — якщо в разі переміщення заряду з однієї точки тіла в **будь-яку** іншу поле не виконує роботи. Для цього необхідно, щоб напруженість поля в усьому об'ємі цього тіла дорівнювала нулю. А це не така вже рідкість: ми знаємо, що саме таку властивість має провідник в електростатичному полі, коли вільні заряди перебувають у рівновазі (див. § 17. Провідники й діелектрики в електростатичному полі).

Отже, при цьому всі точки провідника мають однаковий потенціал, який для стислості називають **потенціалом провідника**. Поняттям потенціалу провідника ми скористаємось у наступному параграфі.

Оскільки всі точки провідника мають однаковий потенціал, поверхня провідника є еквіпотенціальною поверхнею. Звідси випливає, що **лінії напруженості поля поблизу поверхні провідника перпендикулярні до його поверхні**.

Справді, якби це було не так, то існувала б складова напруженості, напрямлена вздовж поверхні провідника. Діючи на вільні заряди, вона викликала б їхній постійний рух уздовж поверхні провідника — а це суперечить тому, що заряди перебувають у рівновазі.

#### 4. ЧОМУ БУВАЮТЬ ГРОЗИ?

Наша Земля — величезна негативно заряджена куля: її електричний заряд дорівнює (за модулем) близько 600 000 кулонів.

А на висоті 50–100 км від поверхні Землі розташовано позитивно заряджений сферичний шар іонів — так звана «іоносфера» (рис. 18.8).

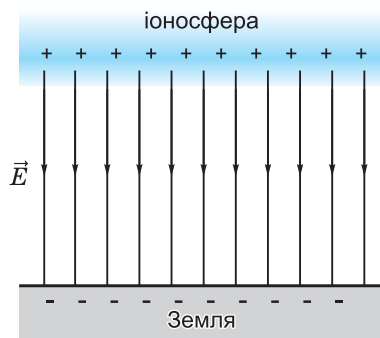


Рис. 18.8. Електричне поле поблизу поверхні Землі в ясну погоду.

Отже, поблизу поверхні Землі існує електростатичне поле, до того ж досить велике: поблизу поверхні Землі різниця потенціалів між точками, розташованими на рівні голови й ніг людини, що стоїть, становить близько 200 вольтів. Ми не відчуваємо цього поля тому, що наше тіло є непоганим провідником, а в провіднику, як ми вже знаємо, заряди швидко перерозподіляються, що й компенсує зовнішнє поле. Перерозподіляючись, заряди рухаються, тобто виникає короточасний електричний струм. Отже, коли ми сідаємо, встаємо або лягаємо, по нашому тілу завжди пробігає невеликий струм.

У ясну погоду Земля поступово розряджається: від іоносфери до поверхні Землі тече струм. Але повної розрядки не відбувається через... грози: виявляється, грози не розряджають, а заряджають Землю!

Падаючи з великої висоти, краплі води або кристалики льоду електризуються внаслідок зіткнень з іонами, а також іншими мікроскопічними частинками. У результаті краплі води набувають **негативного** заряду. Падаючи, вони переносять його в нижню частину грозової хмари.

У нижній частині грозової хмари нагромаджується великий **негативний** заряд. Цей негативний заряд притягує до ділянки поверхні Землі, яка перебуває під хмарою, великий **позитивний** заряд. У просторі між цими зарядами виникає величезна різниця потенціалів — у десятки й сотні мільйонів вольтів. Електричне

поле стає настільки великим, що виникає електричний розряд через повітря — величезна іскра завдовжки в кілька кілометрів. Це і є блискавка (рис. 18.9 і 18.10).



Рис. 18.9. Розподіл електричних зарядів у грозовій хмарі й поверхневому шарі Землі, розташованому під нею.



Рис. 18.10. Гігантська природна електрична батарея. Ви бачите на цьому знімку її заряджання.

Блискавки переносять негативний заряд на Землю, знову й знову заряджаючи її. Так і працює ця гігантська електрична батарея — ось уже мільярди років.

Що ж живить її енергією? Урешті-решт Сонце, оскільки водяні краплі в хмарі з'являються внаслідок конденсації водяної пари, що випаровується з морів та океанів завдяки теплу, одержаному від Сонця. Енергія ж сонячного проміння — це теж енергія електромагнітного поля.

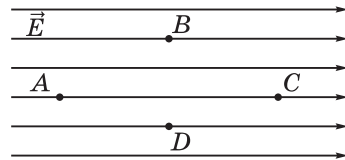
#### ЯК ЗАХИСТИТИСЯ ВІД БЛИСКАВКИ?

Блискавка «шукає» шлях найменшого опору в буквальному значенні слова, якщо під опором розуміти **електричний** опір. Тому вона так «полюбляє» високі металеві вістря — адже опір металу набагато менший за опір повітря. Щоб, ударивши в таке вістря, блискавка не завдала шкоди й пішла в землю, вістря треба заземлити, з'єднавши металевим провідником із досить

глибокими (вологими) шарами землі. Саме так улаштований блискавковідвід<sup>1</sup>, який запропонував Бенджамін Франклін і який використовують нині в усьому світі.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. У якому полі можна ввести поняття потенціальної енергії заряду? Чи є електростатичне поле таким полем?
2. Який стан зазвичай ставлять у відповідність нульовому значенню потенціальної енергії?
3. Що таке потенціал електростатичного поля?
4. Як змінюється потенціал електростатичного поля в разі наближення до позитивного заряду? До негативного?
5. Що таке різниця потенціалів? Яка різниця потенціалів становить небезпеку для життя?
6. Як зв'язана різниця потенціалів з напруженістю поля у випадку однорідного поля?
7. Як напрямлена напруженість поля: у бік збільшення або зменшення потенціалу?
8. Що таке екіпотенціальні поверхні? Наведіть приклади таких поверхонь в однорідному електростатичному полі й у полі точкового заряду.
9. Чому бувають грози?
10. На рисунку зображені силові лінії електричного поля й точки А, В, С, D. Між якими точками напруга дорівнює нулю? Між якими точками напруга найбільша?



11. Чому дорівнює потенціал точки, розташованої точно посередині між двома різнойменними точковими зарядами, рівними за модулем? Чи можете ви обґрунтувати свою відповідь?
12. Поблизу позитивно зарядженої кулі поміщають ізольований провідник. Потенціал якої точки провідника буде вище: розташованої ближче до кулі або далі від кулі? Обґрунтуйте свою відповідь.

<sup>1</sup> Блискавковідвід дотепер часто називають громовідводом. Однак правильна його назва саме блискавковідвід, бо він охороняє будівлі від руйнівної дії блискавки, але ніяк не рятує від грому.

## § 19. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

1. Електроємність
2. Енергія електричного поля

У цьому параграфі ми розповімо про те, як пов'язаний заряд провідника з його потенціалом і введемо поняття електроємності — характеристики провідника, що показує, який заряд можна на ньому нагромадити для заданого потенціалу.

Ми побачимо, що набагато більший заряд можна нагромадити не на одному провіднику, а на двох близько розташованих провідниках, якщо надати їм різнойменні й рівні за модулем заряди.

Ми розглянемо також питання про енергію електричного поля й про те, як вона пов'язана з потенціальною енергією взаємодії заряджених тел.

### 1. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ

#### ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ ВІДОКРЕМЛЕННОГО ПРОВІДНИКА

Якщо надати провідному тілу (для стислості будемо називати його далі просто провідником) електричний заряд, потенціал провідника стане відмінним від нуля. Як пов'язаний потенціал провідника з його зарядом?

Розглянемо спочатку так званий «відокремлений провідник», тобто розташований досить далеко від інших провідників. Якщо цей провідник є кулею (або сферою), розрахунок показує, що його потенціал  $\varphi$  пов'язаний із зарядом  $q$  простим співвідно-

шенням  $\varphi = k \frac{q}{R}$ , де  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  — стала, яка входить до закону Кулона,  $R$  — радіус кулі (сфери).

Насамперед звернемо увагу на те, що **потенціал і заряд кулі пропорційні один до одного**. Це справедливо не тільки для кулі, але й для **будь-якого** провідника, тому що впливає з принципу суперпозиції для електричного поля. Справді, якщо збільшити заряд провідника, наприклад удвічі, то відповідно до принципу суперпозиції напруженість створюваного провідником поля в

кожній точці простору збільшиться теж удвічі. А отже, і робота, виконувана цим полем у разі переміщення пробного заряду з поверхні провідника у віддалену точку («нескінченність»), також збільшиться у 2 рази. Це й означає, що потенціал провідника збільшився у 2 рази — так само, як і його заряд.

Отже, **відношення** заряду відокремленого провідника до його потенціалу не залежить ні від заряду провідника, ні від його потенціалу і тому є характеристикою самого **провідника**.

Відношення заряду  $q$  відокремленого провідника до його потенціалу  $\varphi$ , тобто величину  $C = \frac{q}{\varphi}$ , називають **електроємністю** даного провідника.

Що більша електроємність провідника, то більший заряд можна надати цьому провіднику за заданого потенціалу.

Наприклад, електроємність кулі  $C_k = \frac{q}{\varphi} = \frac{q}{kq/R} = \frac{R}{k}$ , тому

що для кулі, як ми вже знаємо,  $\varphi = k \frac{q}{R}$ . Ми бачимо, що електроємність кулі пропорційна до його радіуса: що більший радіус кулі, то більший заряд йому можна надати за заданого потенціалу.

### Одиниця електроємності

Одиницю електроємності назвали на честь Майкла Фарадея **фарад** (Ф):  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ .

Якщо провідник має електроємність 1 Ф, то в разі збільшення його заряду на 1 Кл потенціал провідника збільшується на 1 В. З формули  $C_k = \frac{R}{k}$  для електроємності кулі випливає,

що електроємність 1 Ф має куля радіусом  $9 \cdot 10^9 \text{ м} = 9$  мільйонів кілометрів. Ця куля приблизно в 13 разів більша за Сонце.

Тому для практичних цілей використовують малі частки фарада: мікрофард ( $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ) і пікофард ( $1 \text{ пкФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

Використання на практиці електроємності навіть в 1 мкФ здається неможливим: адже таку електроємність має куля радіусом 9 кілометрів. Як же провідники з такою електроємністю можуть використовуватися в радіотехніці?

Виявляється, що на **двох** різнойменно заряджених провідниках можна нагромадити в багато разів більший заряд, ніж на **одному** провіднику. Про це ми зараз і розповімо.

## КОНДЕНСАТОРИ

### Лейденська банка

У середині 18-го століття голландський учений Пітер Мушенбрук, який працював у місті Лейдені, поставив дослід, про який він написав своєму вченому другові, що «у жодному разі не радить його повторювати». У цьому досліді, за визнанням самого вченого, його тіло «здригнулося, мов від блискавки». У чому ж полягав цей дослід?

Мушенбруку довелося спробувати на собі проходження величезного (за тим часом) електричного заряду, нагромадженого за допомогою... банки — так, так, звичайної скляної банки. З'ясувалося, що коли викласти її внутрішню поверхню провідником — металевою фольгою — й обернути банку зовні іншим шаром фольги, то на цих провідниках можна нагромадити дуже великий заряд.

Секрет «лейденської банки», що стала відразу ж одним з улюблених приладів для дослідів з електрики, розгадав уже знайомий нам Бенджамін Франклін. Нагромадження великих зарядів у лейденській банці стає можливим тому, що на внутрішньому і зовнішньому її шарах нагромаджуються **різнойменні й рівні за модулем електричні заряди**. Схематично будову лейденської банки зображено на рис. 19.1.

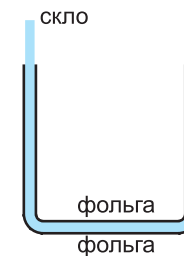


Рис. 19.1. Будова «лейденської банки».

### Конденсатор

Лейденська банка стала першим в історії фізики **конденсатором**<sup>1</sup> — пристроєм, спеціально призначеним для нагромадження електричних зарядів.

Конденсатор являє собою два провідники (дві обкладки), розділені тонким шаром діелектрика (зокрема, повітря).

<sup>1</sup> Від латинського «конденсато» — згущення.

На обкладки конденсатора поміщають рівні за модулем й протилежні за знаком електричні заряди. У такому випадку поле, створене зарядами, зосереджено переважно між обкладками.

Електроємністю конденсатора  $C$  називають фізичну величину, що дорівнює відношенню модуля заряду  $q$  однієї з його обкладок до різниці потенціалів (напруги)  $U$  між обкладками:  $C = \frac{q}{U}$ .

### Плоский конденсатор

Чому ж електроємність конденсатора набагато більша за електроємність відокремленого провідника? Як ми зараз побачимо, річ у тім, що різниця потенціалів між *близько розташованими* різнойменно зарядженими провідниками може бути порівняно невеликою навіть коли на цих провідниках перебувають великі заряди.

Розглянемо так званий *плоский конденсатор*, що являє собою вже знайому нам систему із двох близько розташованих плоских пластин з різнойменними рівними за модулем зарядами (див. § 16. *Напруженість і лінії напруженості електричного поля*).

Як ми вже знаємо, електричне поле, створене зарядами на цих пластинах, однорідне й зосереджено переважно між пластинами. Позначимо модуль напруженості цього поля  $E$ , а відстань між пластинами  $d$ . Різниця потенціалів між пластинами  $U = Ed$  (див. § 18. *Потенціальна енергія заряду. Потенціал і різниця потенціалів*). Вирішальним є те, що для заданих зарядів пластин напруженість поля між пластинами не залежить від відстані між ними (якщо ця відстань залишається малою порівняно з розмірами пластин). Отже, у разі зменшення відстані  $d$  між пластинами різниця потенціалів  $U = Ed$  зменшується. А оскільки заряд пластин залишається незмінним, то з формули  $C = \frac{q}{U}$  випливає, що при зменшенні відстані між пластинами електроємність конденсатора збільшується.

Розрахунки показують, що електроємність плоского повітряного<sup>1</sup> конденсатора  $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ , де  $\epsilon_0$  — електрична стала,  $S$  — площа однієї із пластин. А оскільки відстань  $d$  між пластинами можна зробити дуже малою, електроємність плоского конденсатора може бути досить великою.

<sup>1</sup> Тобто такого, між обкладками якого міститься повітря.

### Проведемо дослід

Залежність електроємності конденсатора від відстані між його пластинами можна наочно продемонструвати на такому досліді (див. рис. 19.2).

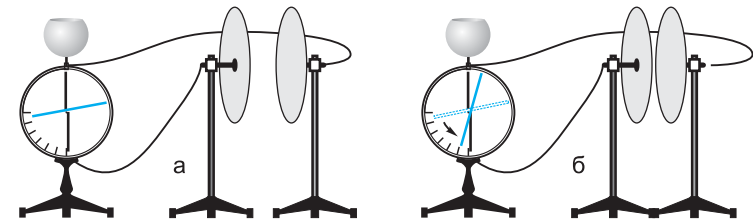


Рис. 19.2. Демонстрація залежності ємності плоского конденсатора від відстані між його пластинами.

З'єднаємо одну з плоских пластин із корпусом електрометра (приладу, що вимірює різницю потенціалів), а другу — зі стрижнем електрометра. Зарядимо конденсатор, торкнувшись наелектризованою паличкою пластини, з'єднаної зі стрижнем. Електрометр покаже різницю потенціалів між пластинами. Якщо збільшувати відстань між пластинами, покази електрометра збільшуються, що свідчить про збільшення різниці потенціалів між пластинами, тобто про зменшення електроємності конденсатора. У разі зближення ж пластин ми побачимо, що різниця потенціалів між ними зменшується, тобто електроємність конденсатора збільшується.

### Порівняння електроємності плоского конденсатора з електроємністю кулі

Порівняємо електроємність плоского конденсатора з електроємністю відокремленого провідника, наприклад кулі. Ми вже бачили, що електроємність 1 мкФ має куля радіусом 9 км. Знайдемо, якими мають бути розміри плоского конденсатора такої самої електроємності. Будемо вважати, що його пластини є квадратами зі стороною  $a$ . З формули для електроємності плоского конденсатора дістаємо  $a = \sqrt{4\pi kCd}$ .

У сучасних конденсаторах великої електроємності як ізолятор між обкладками часто використовують папір, просочений парафіном, тому відстань між обкладками не перевищує 0,1 мм. Тоді при  $C = 1$  мкФ сторона пластини конденсатора становить усього 3,4 м, що в багато разів менше за радіус згаданої вище кулі. На практиці конденсатори роблять не плоскими, а «багат шаровими»: вони являють собою багаторазово згорнуті подвійні смужки фольги, розділені паперовою смугою. Отже, реальний розмір конденсатора електроємністю в 1 мкФ невеликий — такий конденсатор цілком уміщується всередині приладу.

Зазначимо нарешті, що насправді площа пластин у цьому разі має бути ще приблизно в 2 рази меншою від розрахованої вище внаслідок діелектричної проникності діелектрика (паперу, просоченого парафіном). Про залежність електроємності конденсатора від діелектричної проникності діелектрика, що заповнює простір між його пластинами, ми зараз розповімо.

### Як залежить електроємність конденсатора від діелектричної проникності діелектрика?

Якщо заповнити простір між обкладками конденсатора діелектриком з діелектричною проникністю  $\epsilon$ , напруженість поля в конденсаторі зменшиться в  $\epsilon$  разів (див. § 17. *Провідники й діелектрики в електростатичному полі*). Отже, у стільки ж разів зменшиться й різниця потенціалів  $U$  між обкладками конденсатора.

Тому

в разі заповнення простору між обкладками конденсатора діелектриком з діелектричною проникністю  $\epsilon$  електроємність конденсатора збільшується в  $\epsilon$  разів, тобто дорівнюватиме  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ .

## 2. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

### НАВІЩО СЬОГОДНІ ПОТРІБНІ КОНДЕНСАТОРИ?

Конденсатори спочатку використовували для нагромадження електричного заряду. Але сьогодні, коли є різні джерела струму, потреба в нагромадженні електричного заряду зникла. Проте конденсатори і сьогодні широко застосовують — особливо в радіотехніці. Без них був би неможливим радіозв'язок, тобто не працювали б ні телевізори, ні мобільні телефони.

Конденсатори використовують сьогодні переважно не як «нагромаджувачі» електричного заряду, а як «нагромаджувачі» енергії електричного поля. Річ у тім, що чудовою властивістю конденсатора як «сховища енергії» виявилася його «мобільність»: конденсатор може нагромаджувати й віддавати енергію майже миттєво.

### ЕНЕРГІЯ ЗАРЯДЖЕНОГО КОНДЕНСАТОРА

Для знаходження енергії зарядженого конденсатора скористаємося законом збереження енергії. Розсовуючи пластини конденсатора, ми виконуємо позитивну роботу, оскільки вони притягуються одна до одної.

Отже, енергія конденсатора  $W_p$  при цьому збільшується на величину, що дорівнює виконаній нами роботі  $A$ , тобто  $\Delta W_p = A$ .

Якщо ми збільшимо відстань між пластинами на  $\Delta d$ , то виконаємо роботу  $A = F \Delta d$ , де  $F$  — сила притягання пластин, яка дорівнює заряду  $q$  однієї із пластин, помноженому на напруженість поля, створеного другою пластиною. Обидві пластини дають рівний внесок у напруженість поля  $E$  усередині конденсатора, тому напруженість поля, створеного однією пластиною, дорівнює  $E/2$ . Отже,  $F = qE/2$ , звідки  $A = qE \Delta d/2$ .

Якщо початкова відстань між пластинами дорівнює нулю, а кінцева дорівнює  $d$ , то виконана в процесі розсовування пластин робота дорівнює енергії зарядженого конденсатора:  $W_p = qEd/2$ . Оскільки

$Ed = U$ , де  $U$  — різниця потенціалів між обкладками конденсатора, дістаємо  $W_p = qU/2$ . Використовуючи співвідношення  $q = CU$ , яке випливає з визначення електроємності, можна записати три еквівалентні формули для енергії зарядженого конденсатора:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

### ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Ми вже знаємо, що заряджені тіла взаємодіють за допомогою *електричного поля*. Тому виникає запитання: як потенціальна енергія взаємодії заряджених часток пов'язана з енергією електричного поля?

Найкращим прикладом для розгляду цього питання є саме взаємодія пластин плоского конденсатора. Ми шойно знайшли, чому дорівнює енергія зарядженого конденсатора, розглядаючи її як потенціальну енергію заряджених пластин. Де ж зосереджена ця енергія?

Розсовуючи пластини конденсатора, ми виконували роботу, *збільшуючи об'єм простору, у якому є електричне поле*. Тому *потенціальна енергія взаємодії заряджених пластин — це енергія електричного поля*, оскільки це поле виникло саме в процесі розсовування пластин.

Розрахунки показують, що потенціальна енергія заряджених тіл — це частина енергії електромагнітного поля. Наприклад, у разі зближення різнойменно заряджених тіл електричне поле виконує роботу, унаслідок чого його енергія зменшується.

Надалі ми побачимо, що енергію має й магнітне поле, створене електричними зарядами, які рухаються, і електричними

струмами. Урахування енергії цих полів — електричного й магнітного — приводить до *узагальнення закону збереження енергії*: у разі взаємодії заряджених тіл їхня кінетична енергія й енергія електричних і магнітних полів змінюються так, що *сума всіх цих енергій залишається сталою*.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Як пов'язаний заряд відокремленого провідника з його потенціалом?
2. Що таке електроємність відокремленого провідника?
3. Як називають одиницю електроємності? Які одиниці електроємності використовують на практиці?
4. Що таке конденсатор? Для чого його використовують?
5. Що таке електроємність конденсатора?
6. Чому дорівнює електроємність плоского конденсатора?
7. Як залежить електроємність конденсатора від діелектричної проникності діелектрика?
8. Чому дорівнює енергія зарядженого конденсатора?
9. Однойменно заряджені тіла зближають. Яку роботу при цьому виконують сили електричного поля — додатну чи від'ємну? Як змінюється енергія електричного поля: збільшується чи зменшується?
10. Пластини плоского конденсатора розсовують за сталого заряду пластин. Як змінюється при цьому різниця потенціалів між пластинами? Як змінюється енергія конденсатора?

### ГОЛОВНЕ У ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- **Електричну взаємодію** заряджених тіл спричиняє взаємодія **електричних зарядів** двох видів, названих позитивними й негативними. Однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні — притягуються.
- **Електризацію тіл** спричиняє перехід частини електронів з одного тіла на інше. Тіло, у якому утворилася нестача електронів, набуває позитивного заряду, а тіло, у якому утворився надлишок електронів, набуває негативного заряду.
- **Закон збереження електричного заряду**: алгебраїчна сума зарядів ізольованої системи тіл залишається незмінною.
- **Носіями електричного заряду** є заряджені частинки — **електрони** (у металах) та **іони** (наприклад, у розчинах солей).
- **Електричними взаємодіями** зумовлено будову атома й утворення молекул. У механічних явищах електричні взаємодії проявляють себе як сили пружності й сили тертя.
- **Закон Кулона**: нерухомі точкові заряди  $q_1$  і  $q_2$  взаємодіють у вакуумі із силою  $F$ , прямо пропорційною до модулів зарядів та обернено пропорційною до квадрата відстані  $r$  між зарядами:  $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$ . У системі СІ  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ .
- Усі відомі елементарні частинки або не мають електричного заряду (тобто нейтральні), або мають заряд, кратний за модулем заряду електрона. Модуль заряду електрона називають **елементарним електричним зарядом**. Елементарний електричний заряд дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.
- Заряджені тіла взаємодіють за допомогою **електричного поля**: кожне із цих тіл створює поле, що діє на інше тіло. Електричне поле створюють заряджені тіла, і воно діє на заряджені тіла.
- **Напруженістю**  $\vec{E}$  електричного поля в даній точці називають фізичну величину, що дорівнює відношенню сили  $\vec{F}$ , яка діє з боку електричного поля на точковий пробний заряд  $q$ , розміщений у дану точку поля, до цього заряду:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ . Напруженість поля є **векторною величиною** і являє собою **силову характеристику** електричного поля.



- **Напруженість поля точкового заряду**  $E = k \frac{|Q|}{r^2}$ .
- **Принцип суперпозиції електричних полів:** напруженість поля  $\vec{E}$ , створеного в даній точці кількома зарядами, дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створених у цій точці кожним із зарядів:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$ .
- **Лініями напруженості** електричного поля називають уявні лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом напруженості електричного поля. Лінії напруженості електростатичного поля безперервні. Вони починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних зарядах. Щільність ліній напруженості пропорційна до модуля напруженості поля.
- Заряджені частинки, які можуть вільно переміщатися в речовині, називають вільними зарядами. Речовини, що містять вільні заряди, називають **провідниками**. Найкращі провідники — **метали**, у яких вільними зарядами є електрони.
- **Напруженість електричного поля всередині провідника дорівнює нулю**, якщо заряди перебувають у рівновазі.
- Речовини, у яких вільні заряди відсутні, називають **діелектриками**.
- Якщо помістити **провідник в електричне поле**, у результаті перерозподілу зарядів напруженість поля всередині провідника дорівнюватиме нулю. Це використовують для створення електростатичного захисту.
- Якщо помістити діелектрик в електричне поле, у результаті **поляризації діелектрика** на його поверхні з'являються зв'язані заряди. Унаслідок поляризації діелектрика **напруженість електростатичного поля всередині діелектрика зменшується**.
- Величину, що показує, у скільки разів зменшується напруженість електричного поля всередині однорідного діелектрика, називають **діелектричною проникністю** й позначають  $\epsilon$ .
- **Потенціалом** електростатичного поля  $\phi$  у даній точці називають фізичну величину, що дорівнює відношенню потенціальної енергії  $W_p$  заряду  $q$ , поміщеного в дану точку поля, до цього заряду:  $\phi = \frac{W_p}{q}$ . Потенціал поля є ска-

лярною величиною і являє собою енергетичну характеристику електростатичного поля.

- **Різниця потенціалів** між двома точками дорівнює відношенню роботи поля в разі переміщення заряду з початкової точки в кінцеву до цього заряду:  $\phi_1 - \phi_2 = \frac{A}{q}$ . Різницю потенціалів називають також **напругою**.
- **Зв'язок між різницею потенціалів і напруженістю:** в однорідному електростатичному полі різниця потенціалів між точками, розташованими на одній силовій лінії на відстані  $d$  одна від одної, дорівнює  $U = Ed$ .
- **Еквіпотенціальними поверхнями** називають поверхні рівного потенціалу.
- **Конденсатор** являє собою два провідники (обкладки), розділені тонким шаром діелектрика (зокрема, повітря).
- **Електроємністю  $C$  конденсатора** називають фізичну величину, що дорівнює відношенню модуля заряду  $q$  однієї з його обкладок до різниці потенціалів (напруги)  $U$  між обкладками:  $C = \frac{q}{U}$ .
- **Електроємність плоского конденсатора**  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ , де  $S$  — площа однієї із пластин,  $d$  — відстань між пластинами,  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика, що заповнює конденсатор,  $\epsilon_0$  — електрична стала.
- Енергія зарядженого конденсатора:  $W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$ .

# Розділ 4. ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ



*Широке застосування електрики стало можливим завдяки використанню електричного струму: за його допомогою освітлюють вулиці й квартири, обігрівають приміщення, струм надає руху потягам електричок і метро, мільйонам верстатів на тисячах заводів.*

*У цьому розділі ми розглянемо основні закони постійного струму: закон Ома для ділянки кола й для повного кола, а також закон Джоуля—Ленца. Ми розглянемо також паралельне й послідовне з'єднання провідників і знайдемо, як перерозподіляються між провідниками сила струму, напруга й потужність.*

## § 20. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

1. Джерела постійного струму
2. Сила струму
3. Дії електричного струму

*У цьому параграфі ми розповімо, хто і як винайшов перше джерело електричного струму.*

*Ми визначимо, що таке сила струму, і розглянемо основні дії струму: теплову, магнітну й хімічну.*

### 1. ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

До кінця 18-го століття «отримувати електрику», тобто зарядити тіла, розділяючи електричні заряди, уміли тільки за допомогою тертя. А електричний розряд між зарядженими тілами відбувався зазвичай миттєво — у вигляді іскри.

Тому протягом довгого часу вчені могли вивчати тільки взаємодію заряджених тіл й електричні розряди. При цьому, як ви вже знаєте, були зроблені важливі відкриття: установлено існування двох типів електричних зарядів, знайдено закон взаємодії точкових зарядів (закон Кулона), виявлено спорідненість електричних розрядів із блискавкою.

Однак практичного застосування цим відкриттям знайти не вдалося, і тому їх використовували переважно для ефектних демонстрацій та розваг. Наприклад, електричний розряд пропустили крізь довгий ланцюг придворних французького короля, що взяли за руки. При цьому ошатні дами й блискучі кавалери, на радість короля, одночасно верещали й підстрибували.

Крутий поворот у «долі електрики» відбувся завдяки відкриттю італійського вченого Алессандро Вольта, яке він зробив наприкінці 18-го століття.

#### ВІДКРИТТЯ ВОЛЬТА

Вольта виявив, що між мідним і цинковим провідниками, зануреними в розчин кухонної солі, виникає різниця потенціалів. Електровимірювальних приладів тоді ще не було, і Вольта визначив наявність різниці потенціалів «на язик»: коли він дотикався язиком до обох провідників, відчувався кислуватий присмак, знайомий сьогодні кожному, хто пробував лизнути полюси батарейки для кишенькового ліхтарика (обидва водночас).

Для одержання більшої різниці потенціалів Вольта склав стовпчиком кілька десятків мідних і цинкових кружків, переклавши їх картонними кружками, просоченими солоною водою. Коли вчений доторкнувся однією рукою до верхнього мідного кружка, а другою — до нижнього цинкового, він зазнав відчутного електричного удару. Однак це не завадило йому зрадіти з того, що прилад при цьому не розряджався: скільки б разів учений не торкався кружків, удар повторювався знову й знову.

Розподіл електричних зарядів у «вольтовому стовпі», як охрестили цей прилад сучасники Вольта, відбувався *безупинно*: на одному провіднику нагромаджувався позитивний заряд, а на другому — негативний. Ці провідники назвали *позитивним і негативним полюсами*. Якщо з'єднати ці полюси провідником, то по ньому впродовж тривалого часу буде проходити *електричний струм*.

У такий спосіб було винайдене *джерело постійного струму*. Відразу ж після цього почалося вивчення електричного струму та дій, що він спричиняє. Воно породило феєрверк відкриттів, завдяки яким електрика дістала таке широке застосування, що однією з назв 20-го століття стало «вік електрики».

## 2. СИЛА СТРУМУ

Якщо через поперечний переріз провідника за будь-які рівні проміжки часу проходять рівні заряди, кажуть, що по цьому провіднику тече *постійний струм*.

У цьому випадку заряд, який проходить через поперечний переріз провідника, прямо пропорційний до часу проходження струму. Тому постійний струм характеризують відношенням заряду до проміжку часу, протягом якого було перенесено заряд. Цю фізичну величину називають *силою струму*<sup>1</sup>. Отже,

*сила струму*  $I$  — фізична величина, яка дорівнює відношенню заряду  $q$ , перенесеного через поперечний переріз провідника за проміжок часу  $t$ , до цього проміжку часу:  $I = \frac{q}{t}$ .

У системі СІ силу струму вимірюють в амперах (А). Ампер визначають за допомогою магнітної взаємодії струмів (див. § 24 *Взаємодія магнітів і струмів*). За сили струму 1 А через попереч-

<sup>1</sup> Це не зовсім вдала назва, оскільки сила струму — зовсім не сила в її механічному розумінні; однак ця назва настільки «прижилася» в науці, що її досі не змогли змінити.

ний переріз провідника щосекунди проходить заряд 1 Кл. Ампер є однією з основних одиниць системи СІ.

### ЧИ ВЕЛИКИМ Є СТРУМ СИЛОЮ В 1 АМПЕР?

Ми вже знаємо, що заряд 1 Кл є дуже великим (див. § 15. *Взаємодія електричних зарядів*). Тому можна подумати, що коли по провіднику тече струм силою 1 А, це дуже великий струм.

Насправді ж, як ми незабаром побачимо, в електротехніці струм силою 1 А — досить «рядовий»: наприклад, через настільну лампу або лампочку кишенькового ліхтарика протікає струм силою кілька десятків ампера (як не дивно, сила струму в цих настільки різних за яскравістю лампах майже однакова; із чим пов'язана велика розбіжність у їх яскравості, ми розглянемо в § 22. *Робота й потужність постійного струму*). А через електричний чайник протікає струм силою майже 10 А.

Однак те, що добре для чайника або лампочки, для людини — смерть: її може погубити струм силою всього 0,05 А. Тому будьте дуже обережні з електрикою!

### ЯКОЮ Є ШВИДКІСТЬ СПРЯМОВАНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ?

Якщо замкнути електричне коло, спрямований рух заряджених частинок виникає практично одночасно в усьому колі: цього руху надає вільним зарядам електричне поле, яке поширюється вздовж кола зі швидкістю світла. Саме цю швидкість і називають зазвичай «швидкістю електричного струму».

А з якою швидкістю рухаються самі електрони? І як саме вони рухаються?

Розрахунки свідчать, що коли в мідному провіднику перерізом 1 мм<sup>2</sup> тече струм силою 1 А, швидкість *спрямованого* руху електронів становить менш ніж 0,1 мм/с. Це набагато менше від швидкості равлика.

Але чи означає це, що вільні електрони в провіднику зі струмом справді ледве рухаються? Зовсім ні. Насправді вони рухаються всередині провідника зі швидкостями, які становлять *десятки тисяч кілометрів за секунду* — саме така середня швидкість хаотичного руху вільних електронів.

На тлі настільки інтенсивного хаотичного руху *спрямований* рух електронів під дією електричного поля нагадує легкий вітерець на тлі інтенсивного хаотичного руху молекул у повітрі. Тому такий спрямований рух електронів називають часто «дрейфом».

### 3. ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Зазвичай розглядають *хімічну*, *теплову* й *магнітну* дії струму. Кожна з них набула найширшого застосування. Ми зараз стисло опишемо їх, а потім розглянемо докладніше.

Ще одна дуже важлива дія електричного струму полягає в тому, що за його допомогою можна *направляти* потік енергії електромагнітного поля, передаючи енергію на великій відстані. Про це ми розповімо в курсі фізики 11-го класу.

#### ХІМІЧНА ДІЯ СТРУМУ

Опустимо в розчин мідного купоросу вугільні електроди й почнемо пропускати крізь розчин постійний електричний струм. Ми помітимо, що через кілька хвилин на одному з чорних електродів з'явився мідний наліт. Із чим це пов'язано?

Річ у тім, що розчин мідного купоросу містить позитивно заряджені іони міді. Під дією електричного поля вони рухаються до негативного електрода й осаджуються на ньому. Отже, коли струм проходить крізь розчин, відбувається хімічна реакція, у результаті якої виділяється чистий метал.

Подібні процеси відбуваються й тоді, коли струм проходить крізь інші розчини або розплави солей, кислот і лугів, у яких у результаті дисоціації (розпаду) молекул утворюються *іони*. Такі рідини називають *електролітами*. Коли струм проходить крізь електроліт, позитивно й негативно заряджені іони рухаються до різних електродів й осаджуються на них або виділяються у вигляді бульбашок газу. Це явище називають *електролізом*. Його дуже широко застосовують: наприклад, за допомогою електролізу нікелюють і хромують вироби, виплавляють деякі метали (зокрема, алюміній).

Хімічну дію струму почав вивчати ще сам Вольт, але найбільш повно її дослідив на початку 19-го століття англійський учений Майкл Фарадей, який установив кількісні закони електролізу. Ми розглянемо їх в § 29. *Електричний струм у електролітах*.

#### ТЕПЛОВА ДІЯ СТРУМУ

Нагрівання провідників, по яких проходить струм, було помічено відразу ж після появи перших джерел струму: виявилось, що провідник при цьому може розжаритися настільки, що стає червоним або навіть білим. А оскільки в ті часи міста по ночах поринали в глибокий морок (адже електрики не було!), теплову дію струму використали насамперед для створення потужних джерел світла.

Усього через два роки після появи «вольтова стовпа» російський учений В. В. Петров, зібравши «вольтів стовп» з декількох тисяч мідних і цинкових кружків, виявив, що в разі проходження струму великої сили крізь вугільні електроди між ними виникає сліпуча яскрава дуга розпеченого газу — так звана «електрична дуга». Незабаром електричним світлом освітілись площі європейських столиць.

Теплова дія струму зумовлена тим, що, спрямовано рухаючись крізь речовину, заряджені частинки зіштовхуються з іонами, атомами й молекулами речовини, збільшуючи при цьому кінетичну енергію свого хаотичного «теплого» руху. Найповніше дослідження теплової дії струму провели англійський учений Дж. Джоуль та російський учений Е. Х. Ленц. Вони встановили кількісний закон теплової дії струму (закон Джоуля—Ленца). Ми розглянемо його в § 22. *Робота й потужність постійного струму*.

#### МАГНІТНА ДІЯ СТРУМУ

Найдовше очікувала свого відкриття магнітна дія струму: лише 1820 року, через 20 років після появи джерел постійного струму, данський учений Ганс Крістіан Ерстед виявив, що магнітна стрілка поблизу провідника зі струмом повертається, орієнтуючись перпендикулярно до провідника. Незабаром після цього французький учений Андре Марі Ампер відкрив, що провідники зі струмом також взаємодіють один з одним, і припустив, що взаємодія постійного магніту із провідником, по якому проходить струм, має ту саму природу, тобто зумовлена наявністю «прихованих» струмів у магнітах.

Подальші дослідження довели, що магнітна дія струму зумовлена тим, що навколо зарядів, які рухаються, *існує магнітне* поле, яке діє на інші заряди, що рухаються. Докладніше ми розповімо про це в § 24. *Взаємодія магнітів і струмів*.

Довге очікування відкриття магнітної дії електричного струму виявилось не марним: саме ця дія струму проторувала шлях до широкого застосування електрики. Ледь помітний рух магнітної стрілки «перетворився» згодом на невтомну роботу мільйонів електродвигунів, без яких не можна уявити сучасний світ.

Магнітна дія струму має таку характерну рису: вона виявляється *завжди*, тоді як інші дії струму (хімічна і теплова) можуть у деяких випадках і не проявлятися. Наприклад, хімічна дія струму відсутня у разі проходження струму крізь метали, а теплова — у разі проходження струму крізь надпровідники. Тому магнітну дію струму використовують для *вимірювання* сили струму й для визначення одиниці сили струму (див. § 24. *Взаємодія магнітів і струмів*). Спочатку силу струму визначали за

кутом відхилилу магнітної стрілки (саме так було відкрито один з основних законів електричного струму — закон Ома), а потім, виходячи з цього самого явища, створили точні електровимірвальні прилади.

Відкриття магнітної дії струму мало ще один дуже важливий наслідок. Воно навело англійського ученого Майкла Фарадея на думку про тісний зв'язок між електричними й магнітними явищами, і він поставив перед собою завдання «перетворити магнетизм на електрику». Щоб розв'язати це завдання, йому знадобилося 10 років натхненної праці. Вони привели його до одного з найчудовіших відкриттів у всій історії фізики — відкриття явища *електромагнітної індукції*, яке лягло в основу створення принципово нових джерел струму — генераторів. І сьогодні саме генератори на електростанціях всіх типів забезпечують електроенергією всю планету.

Магнітній дії струму ми присвятимо окремий розділ (див. *Розділ 5. Магнітні взаємодії*). Про явище електромагнітної індукції ми розповімо в курсі фізики 11-го класу.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Хто й коли винайшов джерело постійного струму?
2. Що таке сила струму? Яка одиниця сили струму? Якої сили струм становить небезпеку для людини?
3. Якою є швидкість спрямованого руху електронів у металах при проходженні струму? Як рухаються електрони?
4. Наведіть приклади хімічної дії струму.
5. Наведіть приклади теплової дії струму.
6. Наведіть приклади магнітної дії струму.
7. Чи рухаються заряджені частинки в провіднику, по якому не тече струм?
8. Чому спалах блискавки супроводжується громом? Яка дія електричного струму при цьому виявляється?
9. Які дії струму можна спостерігати, пропускаючи струм крізь морську воду?
10. Зображення на екрані створюють за допомогою електронного променя. Яким є напрям електричного струму в кінескопі телевізора: до екрана або від екрана?

## § 21. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ДІЛЯНКИ КОЛА

1. Опір і закон Ома для ділянки кола
2. Послідовне й паралельне з'єднання провідників

*Ми розповімо в цьому параграфі про основний закон постійного струму — закон Ома, який пов'язує силу струму в провіднику з напругою на кінцях цього провідника.*

*Ми розглянемо також паралельне й послідовне з'єднання провідників і розповімо, як треба вмикати вимірвальні прилади для вимірювання сили струму й напруги.*

### 1. ОПІР І ЗАКОН ОМА ДЛЯ ДІЛЯНКИ КОЛА

Досвід свідчить: щоб у провіднику йшов постійний струм, необхідно, щоб між кінцями провідника існувала різниця потенціалів (напруга). Співвідношення між напругою  $U$  на кінцях металевих провідників й силою струму  $I$  в ньому вперше встановив на досліді на початку 19-го століття німецький фізик Георг Ом, який працював тоді вчителем фізики.



*Георг Ом (1787—1854)*

Щоб визначити, як пов'язані між собою напруга  $U$  на кінцях провідника й сила струму  $I$  в цьому провіднику, проведемо дослід, у яких вимірюватимемо обидві ці величини. На рис. 21.1 наведено знайдені з дослідів графіки залежності  $U(I)$  для двох різних металевих провідників за незмінної температури. Про що розповідають ці графіки?

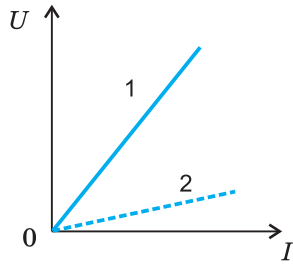


Рис. 21.1. Залежність напруги на кінцях металевого провідника від сили струму в цьому провіднику для двох різних провідників.

По-перше, ми бачимо, що для металевих провідників **напруга  $U$  на кінцях провідника прямо пропорційна до сили струму  $I$  в провіднику**. Отже, **відношення  $U/I$  є характеристикою самого провідника**, оскільки воно не залежить ні від напруги, ні від сили струму (якщо температура провідника залишається незмінною). Це відношення називають **опором** провідника й позначають  $R$ . Що більший опір провідника, то більша напруга на кінцях провідника за тієї самої сили струму.

По-друге, ми бачимо, що опори двох провідників у нашому досліді різні: з наведених на рис. 21.1 графіків випливає, що  $R_1 > R_2$ .

Співвідношення між силою струму в провіднику, напругою на його кінцях й опором провідника формулюють як

**закон Ома для ділянки кола:** сила струму  $I$  в провіднику прямо пропорційна до напруги  $U$  на його кінцях й обернено пропорційна до опору  $R$  провідника:  $I = \frac{U}{R}$ .

Надалі було встановлено, що закон Ома з хорошою точністю справедливий не тільки для металевих провідників, а й для електродів.

### ОДИНИЦЯ ОПОРУ

Одиницю опору в системі СІ визначають на підставі закону Ома й тому називають ом (позначають Ом). Якщо опір провідника дорівнює 1 Ом, то за напруги на його кінцях, яка дорівнює 1 В, по ньому тече струм силою 1 А.

#### Чи великим є опір 1 Ом?

Опір, який приблизно дорівнює 1 Ом, має мідний дріт довжиною 15 м з поперечним перерізом  $0,25 \text{ мм}^2$ . Опір у всіх побутових електроприладів набагато більший: наприклад, опір нитки розжарення настільної лампи — близько 1000 Ом, а одного з найпотужніших електроприладів — електрочайника — близько 30 Ом.

### ПИТОМИЙ ОПІР

Опір провідника (наприклад, мідного) залежить від його геометричних розмірів. Виміри свідчать, що опір  $R$  провідника циліндричної форми прямо пропорційний до довжини провідника  $l$  й обернено пропорційний до площі його поперечного перерізу  $S$ . Тому можна записати  $R = \rho \frac{l}{S}$ , де величина  $\rho$  характеризує вже не провідник, а **речовину**, з якої його виготовлено. Цю величину називають **питомим опором** даної речовини.

Оскільки  $\rho = R \frac{S}{l}$ , питомий опір у системі СІ вимірюють в

Ом·м.

Питомі опори різних речовин значно відрізняються. Для прикладу нижче в таблиці наведено питомі опори деяких металів і графіту, який також є провідником.

Речовина	Питомий опір, Ом·м	Речовина	Питомий опір, Ом·м
Срібло	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Залізо	$10 \cdot 10^{-8}$
Мідь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Свинець	$21 \cdot 10^{-8}$
Золото	$2,4 \cdot 10^{-8}$	Ртуть	$96 \cdot 10^{-8}$
Алюміній	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Графіт	$1300 \cdot 10^{-8}$

## 2. ПОСЛІДОВНЕ Й ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

### ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ

У разі послідовного з'єднання провідники з'єднують так, як показано на рис. 21.2.

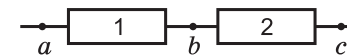


Рис. 21.2. Схема послідовного з'єднання провідників.

У разі послідовного з'єднання двох або декількох провідників їхній загальний опір дорівнює сумі опорів цих провідників:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

Справді, загальним опором розглянутої ділянки кола, за визначенням, є відношення  $R = \frac{U}{I}$ , де  $U$  — напруга між кінцями ділянки, тобто між точками  $a$  й  $c$  на рис. 21.2, а  $I$  — сила струму на цій ділянці.

Позначимо силу струму в першому провіднику  $I_1$ , а в другому провіднику —  $I_2$ . Із закону збереження електричного заряду випливає, що через будь-який поперечний переріз як першого, так і другого провідника щомиті протікає однаковий заряд. Звідси виходить, що  $I_1 = I_2 = I$ .

Напряг ж на кінцях ділянки дорівнює сумі напруг на кожному з провідників, тобто  $U = U_1 + U_2$ . Це випливає з того, що робота, виконувана електричним полем під час переміщення заряду з точки  $a$  в точку  $c$ , дорівнює сумі робіт під час переміщення заряду з  $a$  в  $b$  і з  $b$  в  $c$  (див. рис. 21.2).

Відповідно до закону Ома щодо кожного із провідників  $U_1 = IR_1$ ,  $U_2 = IR_2$  (ми використали тут рівність  $I_1 = I_2 = I$ ).

$$\text{Тому } R = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2.$$

Наведений висновок легко узагальнити для знаходження загального опору будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників. Ми дістанемо  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

Із цієї формули випливає, що **в разі послідовного з'єднання провідників загальний опір кола більший за опір кожного із провідників**. Зазначимо також, що додання нового провідника, приєднаного послідовно до наявних, завжди **збільшує** опір кола.

### ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ

У разі паралельного з'єднання провідники з'єднують так, як показано на рис. 21.3.

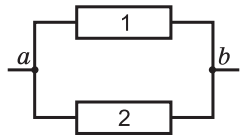


Рис. 21.3. Схема паралельного з'єднання провідників.

У разі паралельного з'єднання провідників величина, обернена до опору кола, дорівнює сумі величин, обернених до опорів провідників:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

І в цьому випадку загальним опором розглянутої ділянки кола, за визначенням, є відношення  $R = U/I$ , де  $U$  — напруга між кінцями ділянки, тобто між точками  $a$  й  $b$  на рис. 21.3, а  $I$  — сила струму на цій ділянці.

Позначимо сили струму в провідниках  $I_1$  і  $I_2$ . Із закону збереження електричного заряду випливає, що в цьому випадку  $I = I_1 + I_2$ . Справді, якби це співвідношення не виконувалося, електричний заряд мав би нагромаджуватися в точці розгалуження провідників — вузлі  $a$ .

Зате напруга на обох провідниках у цьому випадку та сама: це різниця потенціалів між вузлами  $a$  й  $b$ . Отже, у цьому випадку  $U_1 = U_2 = U$ .

Відповідно до закону Ома щодо кожного із провідників  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ,  $I_2 = \frac{U}{R_2}$  (ми використали тут рівність  $U_1 = U_2 = U$ ). Для знаходження загального опору в цьому випадку зручніше «перевернути» співвідношення  $R = \frac{U}{I}$ , записавши його як  $\frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ .

$$\text{Одержуємо } \frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Наведений висновок легко узагальнити для знаходження загального опору будь-якої кількості паралельно з'єднаних провідників. Ми дістанемо

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

$$\text{У випадку двох провідників } R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Із співвідношення  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$  випливає, що **в разі**

**паралельного з'єднання провідників загальний опір кола менший за опір кожного з провідників**. Зазначимо також, що додання нового провідника, приєднаного паралельно до наявних, завжди **зменшує** опір кола.

### ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ Й НАПРУГИ

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що силу струму вимірюють амперметром, а напругу — вольтметром.

Розглянемо, як правильно приєднувати ці прилади для вимірювання сили струму в даному провіднику та напруги на кінцях провідника.

#### Вимірювання сили струму

Оскільки амперметр вимірює силу струму в провіднику, цей прилад треба приєднувати так, щоб сила струму, яка проходить через амперметр, була така сама, як і сила струму, що проходить

крізь даний провідник. Ми вже знаємо, що сила струму в провідниках однакова в разі **послідовного** з'єднання. Тому

для вимірювання сили струму в провіднику амперметр треба вмикати послідовно з цим провідником.

На рис. 21.4 зображено схему правильного приєднання амперметра.

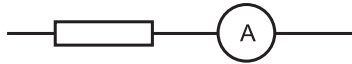


Рис. 21.4. Схема приєднання амперметра до провідника для вимірювання сили струму в провіднику.

### Яким має бути опір амперметра?

Якщо амперметр приєднують послідовно з провідником, опір якого  $R$ , то опір цієї ділянки кола стає рівним  $R + R_a$ , де  $R_a$  — опір амперметра. Якщо опір амперметра набагато менший від опору даного провідника, тобто виконано умову  $R_a \ll R$ , то приєднання амперметра не змінить силу струму в провіднику, оскільки загальний опір кола зміниться мало. Якщо ж опір амперметра порівнянний або, гірше того, суттєво більший за опір даного провідника, то приєднання амперметра суттєво «викривить картину», тому що загальний опір кола значно зміниться. Отже, **опір амперметра має бути набагато меншим від опору провідника, у якому вимірюють силу струму.**

### Вимірювання напруги

Оскільки вольтметр вимірює напругу на кінцях даного провідника, цей прилад треба вмикати так, щоб напруга на вольтметрі дорівнювала напрузі на кінцях провідника. Ми вже знаємо, що напруга на кінцях провідників однакова в разі **паралельного** з'єднання. Отже,

для вимірювання напруги на кінцях провідника вольтметр приєднують паралельно до цього провідника.

На рис. 21.5 зображено схему правильного приєднання вольтметра.

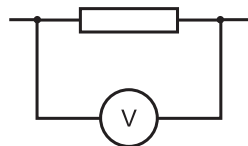


Рис. 21.5. Схема приєднання вольтметра до провідника для вимірювання напруги на кінцях провідника.

### Яким має бути опір вольтметра?

Пошук відповіді на це питання багато в чому аналогічний до пошуку відповіді на питання про опір амперметра — треба тільки врахувати, що вольтметр приєднують паралельно до провідника. Звідси випливає, що **опір вольтметра має бути набагато більшим від опору того провідника, на якому вимірюють напругу.**

## ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Як пов'язана напруга із силою струму для металевого провідника?
2. Що таке опір провідника? Є він характеристикою провідника або речовини, з якої його виготовлено?
3. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
4. Для яких речовин справедливий закон Ома?
5. Яка одиниця опору в системі СІ?
6. Що таке питомий опір? Чи є він характеристикою провідника або речовини, з якого його виготовлено?
7. Накресліть схему послідовного з'єднання провідників. Чому дорівнює загальний опір провідників у разі їхнього послідовного з'єднання?
8. Накресліть схему паралельного з'єднання провідників. Чому дорівнює загальний опір провідників у разі їхнього паралельного з'єднання?
9. Як треба вмикати амперметр для вимірювання сили струму? Яким має бути опір амперметра?
10. Як треба вмикати вольтметр для вимірювання напруги? Яким має бути опір вольтметра?



## § 22. РОБОТА Й ПОТУЖНІСТЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Робота струму і закон Джоуля—Ленца
2. Потужність струму

Ми введемо співвідношення, що пов'язує кількість теплоти, яка виділилася в провіднику, із силою струму в цьому провіднику та опором провідника (це співвідношення називають законом Джоуля—Ленца).

Наприкінці параграфа ми розглянемо потужність струму.

### 1. РОБОТА СТРУМУ І ЗАКОН ДЖОУЛЯ—ЛЕНЦА

#### РОБОТА СТРУМУ

Роботу, яку електричне поле виконує над вільними зарядами в провіднику, часто для стислості називають *роботою струму*. Відповідно до визначення різниці потенціалів (див. § 18. *Потенціальна енергія заряду. Потенціал і різниця потенціалів*) під час переміщення заряду  $q$  вздовж провідника поле виконує роботу  $A = qU$ , де  $U$  — різниця потенціалів на кінцях провідника. Оскільки  $q = It$ , то  $A = UIt$ .

#### ЗАКОН ДЖОУЛЯ—ЛЕНЦА

Якщо єдиною дією струму є теплова, то відповідно до закону збереження енергії кількість теплоти, яка виділилася в провіднику, чисельно дорівнює роботі струму:  $Q = A$ . Звідси випливає, що  $Q = IUt$ .

Використовуючи закон Ома для ділянки кола, можна записати три еквівалентні формули, які визначають

кількість теплоти, що виділилася в провіднику зі струмом:

$$Q = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t.$$

Ми вивели ці формули теоретично, виходячи із закону збереження енергії. Історично ж співвідношення  $Q = I^2Rt$  уперше

було встановлено на досліді за кілька років до відкриття закону збереження енергії англійським ученим Джеймсом Джоулем і російським ученим Емілієм Ленцем. Тому його називають *законом Джоуля—Ленца*.

### ПОРІВНЯННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ В РАЗІ ПОСЛІДОВНОГО І ПАРАЛЕЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

Формули  $Q = I^2Rt$  і  $Q = \frac{U^2}{R}t$  для кількості теплоти, яка ви-

ділилась у провіднику, можуть здатися суперечними одна до одної: згідно з першою кількість теплоти *прямо* пропорційна до опору провідника, а згідно з другою — *обернено* пропорційна. Яка ж із цих формул є «правильною»?

Правильними є *обидві* формули, а ось якою з них треба користуватися, залежить від того, як з'єднано провідники — послідовно чи паралельно.

#### Послідовне з'єднання

Якщо провідники з'єднано послідовно, *сила струму в них однакова*:  $I_1 = I_2 = I$ . Тому для порівняння кількості теплоти, яка виділяється в провідниках, треба користуватися формулою

$$Q = I^2Rt. \text{ Дістаємо: } \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{I^2R_1t}{I^2R_2t} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Отже, у *разі послідовного з'єднання провідників більша кількість теплоти виділяється в провіднику, який має більший опір*.

#### Приклади

Опір нитки лампи розжарення в сотні або навіть тисячу разів перевищує опір з'єднувальних дротів. Тому й кількість теплоти, яка виділяється в лампі, у сотні або тисячі разів більша від кількості теплоти, що виділяється в дротах: нитка розпечена до білого жару, а драти залишаються холодними.

З тієї самої причини нагрівається місце поганого контакту в освітлювальній мережі. Тому, якщо ви виявили, що вимикач або розетка з увімкнутим у неї штепселем електроприладу «підозріло» теплі, контакти у вимикачі або розетці треба зачистити. Але для цього *обов'язково треба знеструмити квартиру!*

#### Паралельне з'єднання

Якщо провідники з'єднано паралельно, *напруга на їхніх кінцях однакова*:  $U_1 = U_2 = U$ . Тому для порівняння кількості тепло-

ти, яка виділяється в провідниках, треба користуватися формулою  $Q = \frac{U^2}{R}t$ . Дістаємо:  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U^2 R_2 t}{U^2 R_1 t} = \frac{R_2}{R_1}$ .

Отже, у разі паралельного з'єднання провідників більша кількість теплоти виділяється в провіднику, який має менший опір.

### Приклади

Усі електролампи в квартирі ввімкнено паралельно. Тому більша кількість теплоти виділяється в лампах, які мають менший опір. У цьому легко переконатися: розгляньте дві лампи розжарення, і ви помітите, що в тій лампі, яка горить яскравіше, товщина нитки розжарювання більша, а отже, її опір менший.

Неважко переконатися й у тому, що в разі заміни паралельного з'єднання на послідовне яскравіше почне світитися та лампа, яка за паралельного з'єднання світилася тьмяніше (тобто яка має більший опір). Коли демонструють цей дослід, він завжди викликає подив — настільки дивною здається різка «зміна ролей» ламп «усього лише» із зміною характеру їх з'єднання.

## 2. ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ

Потужністю струму  $P$  називають відношення роботи струму  $A$  до проміжку часу  $t$ , протягом якого цю роботу

$$\text{було виконано: } P = \frac{A}{t}.$$

Оскільки  $A = IUt$ , дістаємо  $P = IU$ . Використовуючи закон Ома для ділянки кола, можна записати

три еквівалентні формули для потужності струму:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Потужність струму, як і будь-яку потужність, вимірюють в системі СІ у ватах (Вт). Потужність дорівнює 1 Вт, якщо за 1 с виконується робота 1 Дж.

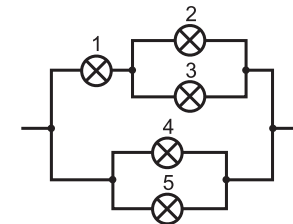
Будь-який електричний прилад характеризують потужністю, яку він споживає. Її часто називають потужністю цього приладу (зазвичай її вказують на приладі). Нижче в таблиці наведено приблизні значення потужності деяких приладів (для порівняння: потужність, що розвиває людина під час ходьби, — близько 100 Вт).

Прилад	Потужність, Вт
Лампа кишенькового ліхтарика	близько 1
Лампи розжарення освітлювальні	25–150
Пилосмок	до 1300–1500
Електрочайник	близько 2000

## ? ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які ви знаєте формули для кількості теплоти, що виділилась у провіднику зі струмом?
2. Сформулюйте закон Джоуля—Ленца.
3. Як залежить кількість теплоти, що виділилась в провіднику, від опору провідника в разі послідовного з'єднання провідників?
4. Як залежить кількість теплоти, що виділилась в провіднику, від опору провідника в разі паралельного з'єднання провідників?
5. Що таке потужність струму? Наведіть приклади потужності деяких електроприладів.
6. На лампочці кишенькового ліхтарика написано «4 В; 1 Вт», а на лампі, що горить у прихожій, написано «220 В; 40 Вт». У якій лампі більша сила струму? Опір якої лампи більший та у скільки разів?
7. Сталевий і мідний дроти однакових розмірів приєднують до джерела струму один раз з'єднаними паралельно, а другий раз — послідовно. У якому з дротів виділиться в кожному з цих випадків більша кількість теплоти?

8. Яка (які) з однакових ламп у колі, схему якого зображено на рисунку, горить яскравіше від інших? Яка (які) — тьмяніше?



## § 23. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА

1. Джерело струму
2. Закон Ома для повного кола
3. Перетворення й передача енергії в електричному колі

У цьому параграфі ми розглянемо умови існування струму в замкненому колі й з'ясуємо роль джерела струму.

Ми розповімо про явища, які відбуваються всередині джерела струму, і визначимо, що таке електрорушійна сила джерела струму. Після цього ми виведемо закон Ома для повного кола, тобто кола, у якому є джерело струму.

Узагальнюючи зміст усього розділу, ми розглянемо перетворення й передавання енергії в електричному колі.

### 1. ДЖЕРЕЛО СТРУМУ

#### ЗА ЯКОЇ УМОВИ СТРУМ МОЖЕ ТЕКТИ В ЗАМКНеноМУ КОЛІ?

Як ми вже знаємо, умовою існування струму в провіднику є різниця потенціалів на його кінцях, тобто наявність електростатичного поля в провіднику. Коли по провіднику тече струм, провідник нагрівається, оскільки під час переміщення вільних зарядів електростатичне поле виконує роботу.

Однак у разі переміщення заряду по *замкнутій* траєкторії робота електростатичного поля дорівнює нулю (див. § 18. Потенціальна енергія заряду. Потенціал і різниця потенціалів). Звідки ж тоді надходить в електричне коло енергія?

Такою ділянкою кола є *джерело струму*. У наступному розділі ми побачимо, що всередині джерела струму *електричні заряди рухаються проти сил електростатичного поля*, і розглянемо, що «змушує» їх рухатися в такий спосіб.

#### СТОРОННІ СИЛИ

Усередині джерела струму відбувається *розподіл зарядів*, унаслідок чого на позитивному полюсі джерела нагромаджується позитивний заряд, а на негативному — негативний (рис. 23.1).

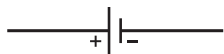


Рис. 23.1. Заряди на полюсах джерела, зумовлені розподілом зарядів усередині нього.

Унаслідок цього між полюсами виникає різниця потенціалів, і в *зовнішній частині кола* — у з'єднувальних дротах, лампах тощо — виникає електростатичне поле, під дією якого в зовнішньому колі тече струм.

Завдяки різниці потенціалів між полюсами джерела струму всередині джерела теж існує електростатичне поле. Однак *усередині* джерела вільні заряди рухаються *проти* сил електростатичного поля.

Наприклад, у хімічному джерелі струму позитивні іони рухаються до позитивного полюса, незважаючи на те, що електростатичне поле «тягне» їх до негативного полюса (рис. 23.2).

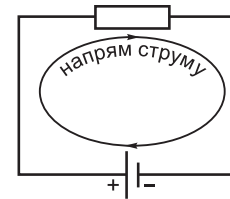


Рис. 23.2. Поза джерелом струму вільні заряди рухаються під дією сил електростатичного поля, але всередині джерела вони рухаються проти сил цього поля.

Отже, для того, щоб у джерелі струму відбувався розподіл зарядів,

усередині джерела струму на вільні заряди мають діяти сили неелектростатичного походження. Їх називають *сторонніми силами*.

#### Природа сторонніх сил

У *хімічних елементах струму* сторонні сили мають хімічну природу.

Вони можуть бути зумовлені, наприклад, різницею у швидкості переходу позитивних іонів різних металів із провідників до електроліту.

Наприклад, у разі занурення цинкового й мідного електродів у сірчану кислоту позитивні іони цинку набагато швидше залишають свій електрод, ніж іони міді. У результаті цинковий електрод заряджається негативно відносно до мідного, тобто цинковий електрод стає негативним полюсом джерела струму, а мідний — позитивним.

У *генераторах електростанцій* сторонні сили — це зазвичай сили, що діють на вільні електрони провідника з боку *вихрового* електричного поля, про яке ми згадували вище (див. § 18. Потенціальна енергія заряду. Потенціал і різниця потенціалів). Докладніше ми розглянемо це в курсі фізики 11-го класу.

## ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Усередині джерела струму сторонні сили виконують роботу  $A_{\text{стор}}$ , переміщуючи вільні заряди проти дії сил електростатичного поля. Ця робота пропорційна до заряду, тому

відношення роботи сторонніх сил із переміщення заряду всередині джерела до заряду є характеристикою джерела струму. Її називають **електрорушійною силою джерела**<sup>1</sup> (ЕРС):  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$ .

Отже, ЕРС джерела чисельно дорівнює роботі з переміщення одиничного позитивного заряду всередині джерела від його негативного полюса до позитивного (тобто проти дії електричної сили).

Через розподіл зарядів, зумовлений дією сторонніх сил, на полюсах джерела нагромаджуються заряди протилежних знаків, унаслідок чого між полюсами й виникає різниця потенціалів.

## 2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА

У разі переміщення заряду  $q$  усередині джерела струму сторонні сили виконують роботу  $A_{\text{стор}} = q\mathcal{E}$ , де  $\mathcal{E}$  — ЕРС джерела.

У разі протікання струму в зовнішньому колі в ньому виділяється кількість теплоти  $Q_{\text{зовн}} = I^2 R t = qIR$ , де  $R$  — опір зовнішнього кола. Джерело струму також має деякий опір, який позначають зазвичай  $r$  називають **внутрішнім опором джерела**. Тому в разі проходження струму всередині джерела в ньому виділяється кількість теплоти  $Q_{\text{внутр}} = I^2 r t = qIr$ .

Із закону збереження енергії випливає:  $A_{\text{стор}} = Q_{\text{зовн}} + Q_{\text{внутр}}$ , звідки дістаємо  $q\mathcal{E} = qIR + qIr$ , або  $\mathcal{E} = IR + Ir$ .

Суму опорів  $R + r$  називають **повним опором кола**, і знайдене співвідношення формулюють як

**закон Ома для повного кола:** сила струму в замкненому колі, що містить одне джерело, дорівнює відношенню ЕРС джерела до повного опору кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ .

<sup>1</sup> Ця назва не зовсім вдала, тому що це не «сила» у механічному розумінні, а енергетична характеристика джерела.

## СИЛА СТРУМУ В КОЛІ Й НАПРУГА НА ПОЛЮСАХ ДЖЕРЕЛА

Розглянемо, як змінюються сила струму в колі й напруга на полюсах джерела залежно від зовнішнього опору кола  $R$ .

Як випливає із закону Ома для повного кола, сила струму  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$  спадає зі збільшенням  $R$ . Найбільша сила струму відповідає  $R = 0$ , тобто **короткому замиканню**. У разі короткого замикання сила струму  $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ . Із цієї формули видно, що коли внутрішній опір джерела дуже малий, струм короткого замикання буде дуже великим, що може вивести джерело з ладу. Це має місце, наприклад, для автомобільних акумуляторів.

**Розімкненому колу** відповідає **нескінченно великий зовнішній опір**  $R$ . При цьому, як випливає з формули закону Ома для повного кола, сила струму  $I = 0$ . Графік залежності сили струму від зовнішнього опору зображено на рис. 23.3.

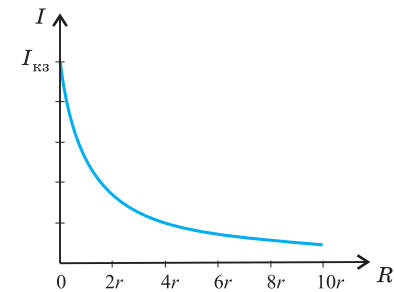


Рис. 23.3. Графік залежності сили струму від зовнішнього опору.

### Напруга на полюсах джерела

Відповідно до закону Ома для ділянки кола напруга між кінцями провідника  $U = IR$ . Із закону Ома для повного кола, записаного у вигляді  $\mathcal{E} = IR + Ir$ , дістаємо  $U = \mathcal{E} - Ir$ . Звідси випливає: **що більша сила струму, то менша напруга між полюсами джерела струму**. Найбільше значення напруги між полюсами джерела дорівнює  $\mathcal{E}$  при  $I = 0$  (розімкнені полюси), тобто

напруга між розімкненими полюсами джерела дорівнює ЕРС цього джерела.

Найменша ж напруга між полюсами дорівнює нулю — їй відповідає коротке замикання, за якого сила струму  $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$  (струм короткого зами-

кання). На рис. 23.4 зображено графік залежності напруги на полюсах джерела від зовнішнього опору.

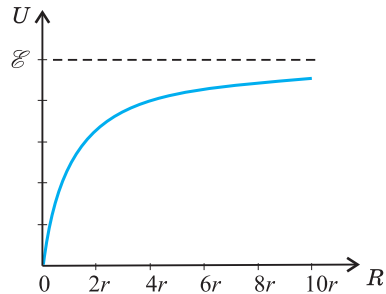


Рис. 23.4. Графік залежності напруги на полюсах джерела від зовнішнього опору.

### 3. ПЕРЕТВОРЮВАННЯ Й ПЕРЕДАВАННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ

Тепер ми готові розглянути електричне коло з погляду головного його призначення — **перетворення й передавання енергії**. В основу нашого розгляду покладемо закон збереження енергії.

Енергія надходить в коло з **джерела струму**, де хімічна, внутрішня або механічна енергія перетворюється на енергію електричного струму.

У **споживачі електроенергії**, навпаки, енергія електричного струму перетворюється в інші види енергії: у внутрішню (наприклад, у нагрівальних приладах і лампах розжарення), механічну (наприклад, в електродвигунах) або в хімічну (наприклад, у процесі електролізу).

Однак є ще один дуже важливий елемент кола, роль якого іноді недооцінюють, — це **з'єднувальні дроти**. Але ж широке використання електрики стало можливим завдяки тому, що з її допомогою можна передавати енергію на великі відстані (сотні й тисячі кілометрів).

Усім відомо, що електроенергію передають «дротами». Багато хто навіть упевнений, що вона тече «усередині» дротів, тобто що її несуть електрони, спрямований рух яких і являє собою електричний струм у металі. Але чи так це насправді? Розглянемо конкретний приклад.

По мідному дроту довжиною кілька метрів і перерізом  $1\text{ мм}^2$  можна передавати щосекунди енергію, яка дорівнює тисячі джоулів (цього досить, щоб за 5 хвилин підняти слона на третій поверх). Проте кінетична енергія спрямованого руху електронів у дроті в багато разів менша від цієї енергії.

Річ у тому, що, як ми вже знаємо, середня швидкість спрямованого руху електронів менша від швидкості равлика, а маса

електронів дуже мала: так, сумарна маса вільних електронів у метровому шматку мідного дроту перерізом  $1\text{ мм}^2$  становить близько однієї десятитисячної частки грама. Тож електрони, які рухаються у дроті, аж ніяк не можуть нести таку велику енергію.

Але тоді виникає запитання: що ж «несе» цю енергію й де вона «мчить», якщо не всередині дроту?

Виявляється, цю енергію несе **електромагнітне поле**, і несе її в **просторі**, що **оточує** дрід, а не **у** дроті. Як ми побачимо нижче (див. § 13. *Магнітне поле*), провідник зі струмом завжди оточений магнітним полем, створеним цим струмом. Крім того, дроти, приєднані до полюсів джерела струму, електрично заряджені, а отже, створюють навколо себе і електричне поле. Саме комбінація цих **двох** полів, які оточують провідник зі струмом, — **магнітного й електричного**, — і переносить енергію від джерела струму до споживача вздовж дротів. Причому переносить з найбільш можливою швидкістю — зі швидкістю світла.

Але тоді знову виникає запитання: навіщо ж потрібні дроти і електрони, що «повзуть» по них?

Дроти потрібні для того, щоб **напрямати** потік енергії електромагнітного поля. Річ у тім, що цей потік енергії існує тільки там, де є **обидва** поля — магнітне й електричне (напрявлені під кутом одне до одного). Отже, дроти зі струмом — це не «труби», усередині яких тече енергія, а «рейки», що відіграють роль напрямників для потоку енергії електромагнітного поля.

### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. За якої умови струм може текти в замкненому колі?
2. На яких ділянках кола вільні заряди рухаються проти сил електростатичного поля?
3. Що таке сторонні сили? Яка їхня природа?
4. Що таке електрорушійна сила джерела струму?
5. Сформулюйте закон Ома для повного кола.
6. Чому дорівнює струм короткого замикання? Якому опору зовнішнього кола він відповідає?
7. Який зовнішній опір відповідає розімкнутому колу?
8. Як пов'язана напруга на розімкнутих полюсах джерела струму з його ЕРС?
9. Як перетворюється й передається енергія в замкненому колі?
10. ЕРС батарейки кишенькового ліхтарика 4,5 В. Чи буде від цієї батарейки горіти повним розжаренням лампочка, розрахована теж на 4,5 В? Обґрунтуйте свою відповідь.

## ГОЛОВНЕ У ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- **Сила струму**  $I$  — фізична величина, яка дорівнює відношенню заряду  $q$ , перенесеного через поперечний переріз провідника за проміжок часу  $t$ , до цього проміжку часу:  
$$I = \frac{q}{t}.$$
 У системі СІ силу струму вимірюють в амперах (А).
- Основні дії струму: *хімічна*, *магнітна* й *теплова*.
- **Закон Ома для ділянки кола:** сила струму в провіднику прямо пропорційна до напруги на його кінцях й обернено пропорційна до опору провідника:  $I = \frac{U}{R}$ .
- Опір провідника прямо пропорційний до довжини провідника й обернено пропорційний до площі його поперечного перерізу:  $R = \rho \frac{l}{S}$ , де величина  $\rho$  — *питомий опір* речовини, з якої зроблено провідник.
- У разі *послідовного* з'єднання двох або декількох провідників їхній загальний опір дорівнює сумі опорів цих провідників:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ . Для послідовного з'єднання провідників загальний опір кола більший від опору кожного з провідників.
- У разі *паралельного* з'єднання провідників величина, обернена до опору кола, дорівнює сумі величин, обернених до опорів провідників:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ . Для паралельного з'єднання провідників загальний опір кола менший від опору кожного з провідників. У випадку двох провідників  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ .
- Для вимірювання сили струму в провіднику *амперметр* треба вмикати послідовно з цим провідником. Опір амперметра має бути набагато меншим від опору провідника, у якому вимірюють силу струму.
- Для вимірювання напруги на кінцях провідника *вольтметр* треба вмикати паралельно до цього провідника. Опір вольтметра має бути набагато більшим від опору того провідника, на якому вимірюють напругу.

- **Закон Джоуля—Ленца:** кількість теплоти, що виділилася в провіднику зі струмом, дорівнює  $Q = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$ .
- У разі *послідовного* з'єднання провідників більша кількість теплоти виділяється в провіднику, який має більший опір.
- У разі *паралельного* з'єднання провідників більша кількість теплоти виділяється в провіднику, який має менший опір.
- **Потужністю струму**  $P$  називають відношення роботи струму  $A$  до проміжку часу  $t$ , протягом якого цю роботу було виконано:  $P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ .
- **Умова існування струму в замкненому колі:** у ньому має бути хоча б одна ділянка, де вільні заряди рухаються проти сил електростатичного поля. Цією ділянкою є *джерело струму*.
- У середині джерела струму на вільні заряди діють *сторонні сили* — сили неелектростатичного походження.
- **Електрорушійною силою джерела** (ЕРС) називають відношення роботи сторонніх сил з переміщення заряду всередині джерела до заряду:  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор.}}}{q}$ .
- **Закон Ома для повного кола:** сила струму в замкненому колі, яке містить одне джерело струму, дорівнює відношенню ЕРС джерела до повного опору кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ , де  $R$  — зовнішній опір кола, а  $r$  — внутрішній опір джерела струму.
- **Струм короткого замикання**  $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ , де  $r$  — внутрішній опір джерела струму.
- **Напруга між розімкнутими полюсами джерела струму** дорівнює ЕРС цього джерела.

## Розділ 5. МАГНІТНЕ ПОЛЕ



*Між електричними зарядами, які рухаються, існує не тільки електрична, а й магнітна взаємодія. Вона виявляється, наприклад, у взаємодії провідників зі струмами.*

*Магнітна взаємодія здійснюється за допомогою магнітного поля. У цьому розділі ми розповімо про основні властивості магнітного поля й про наочне зображення його за допомогою ліній магнітної індукції.*

*Наприкінці розділу буде розказано про магнітні властивості речовини й про використання їх для записування й зберігання інформації.*

## § 24. ВЗАЄМОДІЯ МАГНІТІВ І СТРУМІВ

1. Взаємодія магнітів
2. Взаємодія провідників зі струмами і магнітів
3. Взаємодія провідників зі струмами

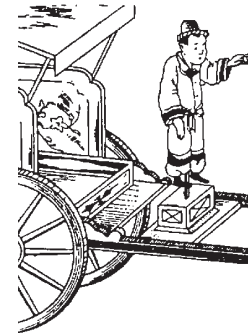
*У цьому параграфі ми розповімо про взаємодію постійних магнітів, про взаємодію магнітів і провідників зі струмами, а також про взаємодію провідників зі струмами.*

### 1. ВЗАЄМОДІЯ МАГНІТІВ

#### ВІД «ГЕРКУЛЕСОВОГО КАМЕНЯ» ДО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Дивні «притягальні» властивості магнітів були знайомі людям ще з давніх часів. Свою назву магніти дістали, мабуть, від назви провінції Магнесія в Греції, де і сьогодні часто трапляються природні магніти. У Давній Греції їх називали «геркулесовим камінням»: згідно з легендою, деякі з них навіть виривали залізні цвяхи із взуття мандрівників. Це, звичайно, була лише легенда: природні магніти такої сили не мають. Проте сучасні електромагніти, створені людиною, здатні не тільки «виривати цвяхи», але й піднімати величезні сталеві блоки.

Першим застосуванням магнітів став компас, що винайшли в Давньому Китаї понад 4 тисячі років тому (рис. 24.1).



*Рис. 24.1. Компас давніх китайців — фігурка, яка завжди вказувала на південь.*

На військових візках установлювали фігурки з витягнутою рукою, яка завжди показувала на південь (цікаво, що для дав-

ніх китайців цей напрям був чомусь важливішим, ніж напрям на північ, прийнятий згодом за «основний» у європейських компасах).

Довгий час уважалося, що притягання тіл магнітами й наелектризованими тілами (наприклад, натертим бурштином) має ту саму природу. Відокремити магнітні властивості тіл від електричних удалося англійському вченому Вільяму (Уільяму) Гілберту, який 1600 року опублікував книгу «Про магніт, магнітні тіла і великий магніт — Землю». Відтоді впродовж близько 200 років електричні й магнітні властивості тіл вивчалися окремо.

«Бар'єр» між електрикою і магнетизмом почав руйнуватися на початку 19-го століття, коли данський учений Ганс Крістіан Ерстед помітив, що поблизу провідника зі струмом магнітна стрілка повертається. Після цього почалося «об'єднання електрики й магнетизму» — переважно завдяки дослідженням французького фізика Андре Марі Ампера й англійського вченого Майкла Фарадея.

Завершив це об'єднання англійський фізик Джеймс Клерк Максвелл, побудувавши теорію електромагнітного поля. Докладніше ми розповімо про це в наступному розділі.

## ПОСТІЙНІ МАГНІТИ

Як ви знаєте з курсу фізики 8-го класу, у будь-якого магніту є «північний» та «південний» полюси (полюсами магніту називають ті його частини, поблизу яких найбільш проявляється дія магніту). Північний полюс магніту позначають<sup>1</sup> літерою *N*, а південний — літерою *S*.

Взаємодію полюсів магнітів вивчав той самий Шарль Кулон, який установив на досліді закон взаємодії електричних зарядів. Виявилось, що взаємодія полюсів магнітів схожа на взаємодію електричних зарядів: **однойменні полюси магнітів відштовхуються, а різнойменні — притягуються** (рис. 24.2).

У зв'язку з цим природно виникало запитання: а чи можна роз'єднати полюси магніту так, щоб здобути «поодинокі» магнітні полюси (лише північний і лише південний), подібні до позитивного та негативного електричних зарядів?

Однак це виявилось неможливим: наприклад, якщо розпиляти магніт, то виходять два менших магніти, у кожного з яких є знову **два** полюси — північний і південний. Нижче ми дамо цьому пояснення.

<sup>1</sup> Такі позначення полюсів магніту пов'язані з тим, що в багатьох європейських мовах (наприклад, англійській), «північ» починається з букви *N* (north), а «південь» — з букви *S* (south).

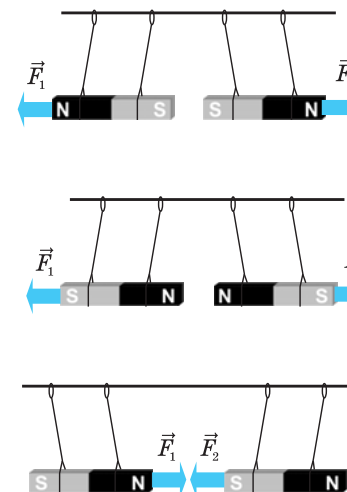


Рис. 24.2. Взаємодія постійних магнітів: однойменні полюси відштовхуються, а різнойменні — притягуються.

У 20-му столітті було встановлено, що навіть елементарні частинки, такі як протон і електрон, є крихітними магнітами, які мають по **два** полюси.

Зазвичай постійний магніт має форму подовженого бруска або підковоподібну форму. А чи може магніт мати іншу форму, скажімо, форму кулі? Так, може: на такому великому магніті ми всі живемо.

## ДЕ РОЗТАШОВАНІ МАГНІТНІ ПОЛЮСИ ЗЕМЛІ?

Ви, звичайно, знаєте, що Земля є величезним магнітом. Стрілка компаса тому й указує завжди на північ, що її північний полюс притягується до **південного** магнітного полюса Землі, розташованого поблизу її **Північного** географічного полюса. А **північний** магнітний полюс Землі розташований поблизу її **Південного** географічного полюса.

Проте, як свідчать геологічні дослідження, так було не завжди: магнітні полюси Землі повільно рухаються, причому був навіть такий час, коли Земля була намагнічена протилежно до її теперішнього стану.

Оскільки магнітні полюси Землі не збігаються точно з її географічними полюсами, стрілки компаса вказують не зовсім точно на північ і на південь. Особливо ця розбіжність проявляється поблизу географічних полюсів, і тому полярники завжди її враховують.

Про походження магнітного поля Землі в учених дотепер немає єдиної думки. Так, дехто вважає, що воно зумовлено електричними струмами, які циркулюють усередині земної кулі.



Магнітне поле Землі простягається на величезну відстань — приблизно в 10 разів більшу від радіуса Землі.

## 2. ВЗАЄМОДІЯ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМАМИ І МАГНІТІВ

### ДОСЛІД ЕРСТЕДА

Як ми вже зазначали, довгий час електричні й магнітні явища вивчалися окремо. Але якось — це було 1820 року — данський фізик Ганс Крістіан Ерстед вирішив продемонструвати студентам нагрівання дроту електричним струмом. На щастя, від попередньої лекції на демонстраційному столі залишилася неприбрана магнітна стрілка (попередня лекція була присвячена магнітним властивостям речовини). І один зі студентів звернув увагу лектора на те, що *після ввімкнення струму в провіднику магнітна стрілка повернулася*.

Ерстед був настільки вражений цим, що перервав лекцію. Того ж дня він почав дослідження, які довели, що на магнітну стрілку, розташовану поблизу провідника зі струмом, діє дивна сила, подібної до якої ніхто раніше не спостерігав. На відміну від усіх відомих до цього сил, «нова» сила не притягувала й не відштовхувала, а «повертала»: магнітна стрілка прагнула розташуватися перпендикулярно до провідника зі струмом (рис. 24.3). Коли напрям струму змінювався, магнітна стрілка змінювала свій напрям на протилежний.

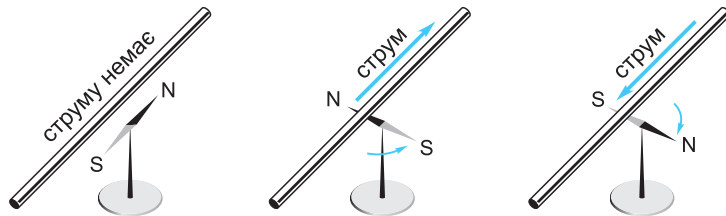


Рис. 24.3. Магнітна стрілка прагне розташуватися перпендикулярно до провідника зі струмом. Коли напрям струму змінюється, магнітна стрілка змінює свій напрям на протилежний.

Так було відкрито *орієнтувальну дію провідника зі струмом на постійний* магніт.

І сам Ерстед, і його дослід відразу стали знаменитими. Але ніхто тоді ще не міг передбачати, що ледь помітний рух маленької магнітної стрілки поблизу провідника зі струмом стане провісником переходу від «віку пари» до «віку електрики». Але ж

в основі дії електродвигунів лежить саме взаємодія провідників зі струмом і магнітів. Про принцип дії електродвигунів ми розповімо нижче.

## 3. ВЗАЄМОДІЯ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМАМИ

### ВЗАЄМОДІЯ ПРЯМОЛІНІЙНИХ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМАМИ

Наступний крок у зближенні «електрики» й «магнетизму» зробив французький фізик Андре Марі Ампер. Коли він довідався про дослід Ерстеда, у нього народилася думка: якщо взаємодіють один з одним магніти, а також магніти й провідники зі струмами, то взаємодія тієї самої природи має існувати й між провідниками зі струмами.

І дослід підтвердив цей здогад. Виявилось, що *паралельні провідники зі струмом взаємодіють один з одним*: якщо струми течуть в одному напрямі, то провідники притягуються, а якщо в протилежних напрямках — то відштовхуються (рис. 24.4).



Андре Марі Ампер (1775—1836)

Відзначимо, що ця взаємодія провідників зі струмами не зумовлена електричною взаємодією, оскільки провідники електрично нейтральні.

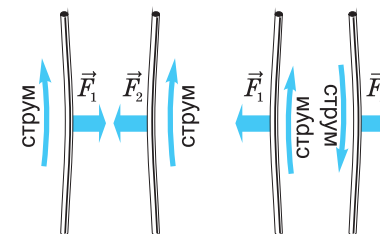


Рис. 24.4. Взаємодія паралельних провідників зі струмами: якщо струми течуть в одному напрямі, провідники притягуються, а якщо в протилежних — то відштовхуються.

Зверніть увагу: на відміну від електричної взаємодії, «одно-йменні», тобто *однаково напрямлені*, струми притягуються, а «різноїменні», тобто *протилежно напрямлені*, — відштовхуються.

### Одиниця сили струму

Взаємодію провідників зі струмами використовують для визначення одиниці сили струму, названої на честь французького фізика Андре-Марі Ампера *ампером*. Один ампер — це сила такого постійного струму, який у разі проходження по двох паралельних прямолінійних нескінченно довгих провідниках дуже малого перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричиняє між провідниками силу взаємодії, що дорівнює  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на кожен метр довжини.

### ВЗАЄМОДІЯ ВИТКІВ І КОТУШОК ЗІ СТРУМАМИ

Продовжуючи свої дослідження, Ампер вивчив взаємодію витків зі струмами і визначив, що, коли струми у витках течуть в одному напрямі, витки притягуються, а якщо в протилежних — відштовхуються (тобто все відбувається так само, як і у випадку паралельних провідників).

Взаємодія витків зі струмами нагадувала взаємодію маленьких магнітів, а коли Ампер перейшов від витків до котушок зі струмами, ця схожість посилилася.

Взаємодія котушок зі струмами виявилася дуже схожою на взаємодію магнітів: торці котушок відігравали роль полюсів магніту — притягувалися або відштовхувалися залежно від того, як були напрямлені струми в котушках (рис. 24.5).

Досліджуючи взаємодію між котушками зі струмом і постійними магнітами, Ампер установив відповідність між торцями котушки зі струмом і полюсами магніту (рис. 24.6).

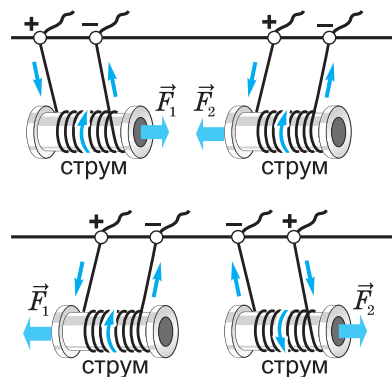


Рис. 24.5. Взаємодія котушок зі струмами дуже нагадує взаємодію постійних магнітів (порівняйте з рис. 24.2).

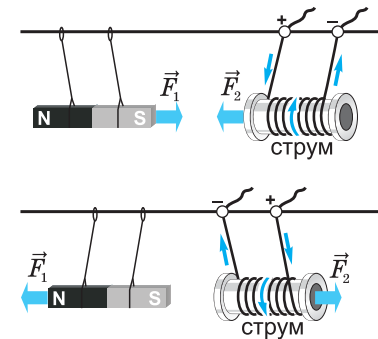


Рис. 24.6. Взаємодія між постійними магнітами і котушками зі струмом. На верхньому рисунку лівому торцю котушки відповідає північний полюс магніту, а на нижньому — південний.

Те, що котушки зі струмом і магніти взаємодіють так схоже, навело Ампера на думку, що

*всі* магнітні взаємодії зумовлено взаємодією електричних струмів.

Це припущення дістало назву *гіпотези Ампера*.

У § 27. *Магнітні властивості речовини* буде розказано, як за допомогою гіпотези Ампера можна пояснити властивості постійних магнітів.

Відповідно до сучасних уявлень,

*магнітною взаємодією* називають взаємодію між електричними зарядами, які рухаються (або провідниками зі струмом).

Додамо, що між провідниками зі струмом існує лише магнітна взаємодія, а між електричними зарядами, які рухаються, — і електрична, і магнітна.

### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які основні властивості постійних магнітів?
2. Чи можна одержати «поодинокі» магнітні полюси — лише північний або лише південний?
3. Де міститься північний магнітний полюс Землі?
4. У чому полягав дослід Ерстеда? Яке невідоме до цього явище виявилось в цьому досліді?
5. Яку дію спричиняє провідник зі струмом на магнітну стрілку?
6. Як взаємодіють паралельні провідники зі струмами?

7. Як взаємодіють котушки зі струмами?
8. Є два однакові на вигляд залізні бруски, але один із них намагнічений, а другий — ні. Як визначити, який брусок намагнічений?
9. Є шматок сталевого дроту. Як визначити, чи намагнічений дріт, якщо ніяких інших металевих предметів під рукою немає?
10. Як краще розмістити дріт, демонструючи досвід Ерстеда: у напрямі північ–південь або схід–захід?
11. У який бік показуватиме північний полюс магнітної стрілки точно на Північному географічному полюсі Землі?

## § 25. МАГНІТНЕ ПОЛЕ

1. Вектор магнітної індукції
2. Лінії магнітної індукції

*Магнітна взаємодія здійснюється завдяки магнітному полю, характеристикою якого є вектор магнітної індукції.*

*Наприкінці параграфа ми розповімо про графічне зображення магнітного поля за допомогою ліній магнітної індукції й наведемо приклади магнітних полів, створених постійними магнітами і провідниками зі струмом.*

### 1. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

#### МАГНІТНЕ ПОЛЕ

Відповідно до концепції близькодії **магнітна взаємодія здійснюється завдяки магнітному полю**: провідник зі струмом створює навколо себе магнітне поле, яке діє на інші провідники зі струмами. Отже,

*магнітне поле* — це вид матерії, яка оточує заряди, що рухаються (провідники зі струмами), і виявляється в дії теж на заряди, що рухаються (провідники зі струмами).

З курсу фізики 11-го класу ви дізнаєтесь, що заряди, які рухаються, — не єдине «джерело» магнітного поля: його створює також електричне поле, яке змінюється з часом.

#### МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Для магнітного поля, як і для електричного, можна ввести векторну величину, яка характеризує це поле в кожній точці. Цю величину називають **магнітною індукцією** й позначають  $\vec{B}$ .

#### Напрямок магнітної індукції

Напрямок магнітної індукції визначають, використовуючи орієнтувальну дію магнітного поля на магнітну стрілку або на рамку зі струмом.

За **напрямок магнітної індукції** беруть напрям, на який вказує північний полюс магнітної стрілки, що може вільно обертатися (рис. 25.1).

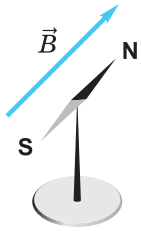


Рис. 25.1. Визначення напрямку магнітної індукції за допомогою магнітної стрілки.

Орієнтувальна дія магнітного поля на рамку зі струмом зумовлена тим, що сили, які діють на протилежні сторони рамки, напрямлені протилежно. Тому вільно підвішена рамка зі струмом повертається в магнітному полі так, аби її площа стала перпендикулярною до магнітної індукції. Для вибору одного із двох можливих напрямів перпендикуляра до площини рамки використовують

**«правило правого гвинта (свердлика)»:** рамка зі струмом устанавлюється в магнітному полі так, що в разі обертання ручки свердлика за напрямом струму в рамці сам свердлик переміщатиметься в напрямі магнітної індукції (рис. 25.2).

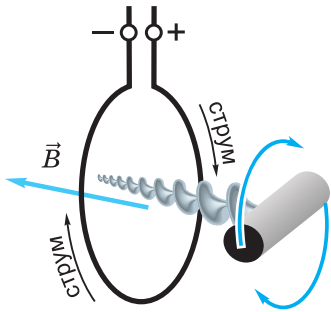


Рис. 25.2. Визначення напрямку магнітної індукції за допомогою рамки зі струмом.

### Модуль магнітної індукції

Силовою характеристикою магнітного поля може бути сила, яка діє в цьому полі на провідник зі струмом.

Але дослід свідчить, що ця сила залежить не тільки від поля, але й від сили струму  $I$  в провіднику, а також від довжини провідника  $l$  та кута  $\alpha$  між провідником і магнітною індукцією  $\vec{B}$ .

Виникає запитання: як визначити величину, що характеризує саме магнітне поле?

Для цього можна скористатися тим, що, по-перше, за заданих сили струму й довжині провідника сила, яка діє з боку

магнітного поля на провідник зі струмом, **максимальна**, коли провідник розташований **перпендикулярно** до магнітної індукції. Отже, саме таке розташування провідника зі струмом зручно вибрати для визначення модуля магнітної індукції.

По-друге, згідно з дослідом сила  $F$ , яка діє з боку магнітного поля на провідник, прямо пропорційна до добутку  $Il$ . Отже, **відношення**  $\frac{F}{Il}$  не залежить ні від сили струму в провіднику, ні від довжини цього провідника і тому характеризує саме магнітне поле.

**Модуль магнітної індукції** дорівнює відношенню сили, яка діє на провідник зі струмом, розташований **перпендикулярно** до магнітної індукції, до добутку сили струму в провіднику та довжини провідника:  $B = \frac{F}{Il}$ .

### Одиниця магнітної індукції

За одиницю магнітної індукції в системі СІ беруть магнітну індукцію поля, яке діє із силою 1 Н на провідник довжиною 1 м, по якому тече струм силою 1 А, якщо провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції даного поля.

Цю одиницю магнітної індукції називають тесла (1 Тл) на честь сербо-американського вченого Ніколи Тесла. Згідно з визначенням  $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}$ .

## 2. ЛІНІЇ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Для графічного зображення магнітного поля використовують

**лінії магнітної індукції** — уявні лінії, дотичні до яких показують напрям вектора магнітної індукції в кожній точці.

Лінії магнітної індукції проводять так, що їх щільність пропорційна до модуля магнітної індукції.

### ПРИКЛАДИ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

Ниже зображено лінії магнітної індукції для деяких характерних випадків. Для наочності вздовж деяких ліній розташовано магнітні стрілки (на рисунках північний полюс магнітної стрілки темніший).

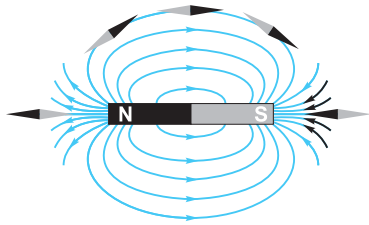


Рис. 25.3. Лінії магнітної індукції постійного магніту. Магнітна індукція особливо велика поблизу полюсів магніту, де лінії магнітної індукції розташовані найгустіше.

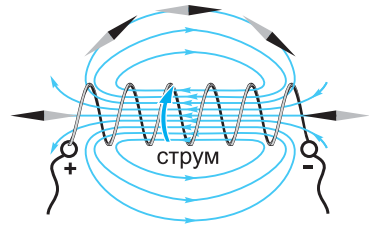


Рис. 25.4. Лінії магнітної індукції котушки зі струмом. Як видно, поза котушкою її магнітне поле дуже схоже на поле постійного смугового магніту. У середині котушки магнітне поле практично однорідне: лінії магнітної індукції паралельні й розташовані на рівних відстанях одна від одної.

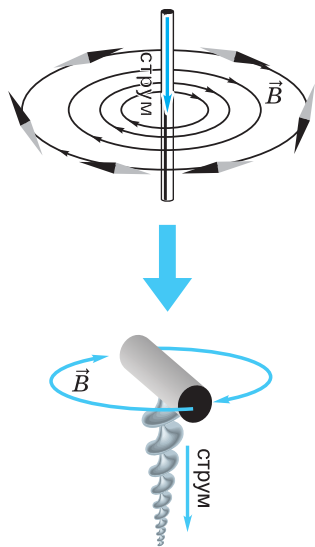


Рис. 25.5. Лінії магнітної індукції прямолінійного провідника зі струмом. Вони мають вигляд концентричних кіл. Що далі від провідника, то магнітна індукція менше. Напрямок ліній магнітної індукції можна визначити за правилом свердлика: якщо обернути свердлик так, щоб напрям його поступального руху збігся з напрямом струму, то напрям обертання ручки свердлика покаже напрям ліній магнітної індукції поля, створеного цим струмом.

Оскільки магнітних зарядів не існує, **лінії магнітної індукції завжди замкнуті**.

На рисунку 25.3 зображено лінії магнітної індукції постійного магніту. Можна подумати, що вони починаються й закінчуються на поверхні магніту, але насправді частина цих ліній просто проходить **усередині** магніту (порівняйте їх із замкнутими лініями магнітної індукції котушки зі струмом на рис. 25.4).

## ЧИ МОЖНА «ПОБАЧИТИ» ЛІНІЇ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ?

Невеликі довгасті залізні предмети, наприклад ошурки, у магнітному полі намагнічуються, перетворюючись на маленькі магнітні стрілки. Якщо вони можуть при цьому повертатися, то вони орієнтуються вздовж ліній магнітної індукції, що дає змогу «побачити» лінії магнітної індукції подібно до того, як нам удалося «побачити» лінії напруженості електричного поля (див. § 16. *Напруженість і лінії напруженості електричного поля*). Якщо насипати на папір або скло металеві ошурки й помістити їх поблизу постійного магніту, витка, котушки або прямолінійного провідника зі струмом, ми наочно побачимо картину ліній магнітної індукції відповідних магнітних полів. На рис. 25.6 зображено «картини» магнітного поля смугового магніту й прямолінійного провідника зі струмом. Порівняйте ці фотографії зі схематичними зображеннями полів, наведеними вище.

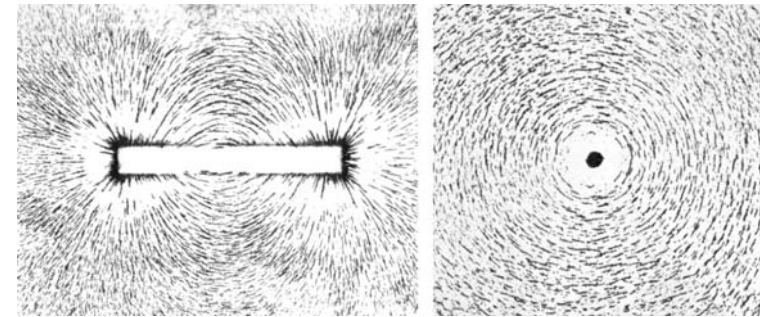


Рис. 25.6. «Візуалізація» ліній магнітної індукції для поля, створеного смуговим магнітом і прямолінійним провідником зі струмом (провідник розташовано перпендикулярно до площини, на якій лежать ошурки; праворуч униз йде тінь від провідника).

## ПОРІВНЯННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ І МАГНІТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Як ви вже знаєте, магнітна взаємодія відрізняється від електричної тим, що **магнітних зарядів не існує**. Тому магнітна дія є зазвичай **орієнтувальна**, тобто виявляється в повороті магнітної стрілки або котушки (витка) зі струмом<sup>1</sup>.

Обидва види взаємодій — це **взаємодії електричних зарядів**. Але електрична взаємодія існує як між зарядами, які перебува-

<sup>1</sup> Йдеться про **однорідне** магнітне поле. У неоднорідному полі магнітна стрілка або рамка зі струмом не тільки повертається, а й втягується в область сильнішого поля (подібно до того, як поводяться незаряджені тіла в неоднорідному електричному полі — див. § 17. *Провідники й діелектрики в електростатичному полі*).

ють у спокої, так і між зарядами, які рухаються, а магнітна взаємодія — лише *між* тими, що рухаються.

Проте ви вже знаєте, що спокій і рух є *відносними*: в одній системі відліку тіло може перебувати у спокої, а в іншій — рухатися. Чи значить це, що вид взаємодії між тілами залежить від вибору системи відліку?

Це так і є насправді. Наприклад, якщо дві заряджені кулі перебувають у спокої одна відносно другої, то в тій системі відліку, відносно якої ці кулі перебувають у спокої, між ними є лише електрична взаємодія. Але з точки зору спостерігача, який рухається відносно цих куль, між ними існує як електрична, так і магнітна взаємодії. Це вказує на глибокий зв'язок між електричною і магнітною взаємодіями. З курсу фізики 11-го класу ви дізнаєтесь, що обидві ці взаємодії є проявами *єдиної електромагнітної взаємодії*.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке магнітне поле? Які його основні властивості?
2. Що таке магнітна індукція?
3. Як визначають напрям магнітної індукції за допомогою магнітної стрілки?
4. Як визначають напрям магнітної індукції за допомогою витка зі струмом?
5. Як визначають модуль магнітної індукції?
6. Яка одиниця магнітної індукції в системі СІ?
7. Що таке лінії магнітної індукції?
8. Чи можуть лінії магнітної індукції перетинатися? Обґрунтуйте вашу відповідь.
9. Накресліть в зошиті лінії магнітної індукції постійного смугового магніту, котушки зі струмом, прямолінійного провідника зі струмом.
10. Порівняйте електричну і магнітну взаємодії. Що в них є спільного та чим вони відрізняються?

## § 26. СИЛА АМПЕРА І СИЛА ЛОРЕНЦА

1. Сила Ампера
2. Сила Лоренца

*У цьому параграфі ми розглянемо сили, які діють з боку магнітного поля на провідник зі струмом, і розповімо про застосування цих сил.*

*Ми розглянемо також сили, що діють з боку магнітного поля на заряджену частинку, яка рухається.*

### 1. СИЛА АМПЕРА

#### СИЛА АМПЕРА І ЗАКОН АМПЕРА

Силу, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі, називають *силою Ампера*. Будемо позначати її  $F_A$ .

З визначення модуля магнітної індукції випливає, що

коли провідник розташований у магнітному полі перпендикулярно до магнітної індукції, *сила Ампера*  $F_A = IlB$ , де  $I$  — сила струму в провіднику,  $l$  — довжина провідника,  $B$  — модуль магнітної індукції.

Напрямок сили Ампера визначають за

*правилом лівої руки*: якщо розкрити долоню лівої руки розташувати так, щоб вектор магнітної індукції входив у долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрям струму в провіднику, то відігнутий на  $90^\circ$  у площині долоні великий палець покаже напрям сили, яка діє на провідник з боку магнітного поля (рис. 26.1).

Як ми вже казали, сила Ампера максимальна, коли провідник розташований перпендикулярно до вектора магнітної індукції. Дослід свідчить, що в загальному випадку

якщо провідник зі струмом розташований під кутом  $\alpha$  до магнітної індукції  $\vec{B}$ , модуль сили Ампера  $F_A = IlB \sin \alpha$ .

Це твердження називають *законом Ампера*.

Один із наслідків закону Ампера полягає в тому, що коли  $\alpha = 0^\circ$  або  $\alpha = 180^\circ$ , то  $F_A = 0$ , тобто *магнітне поле не діє на провідник зі струмом, розташований паралельно до вектора магнітної індукції*.

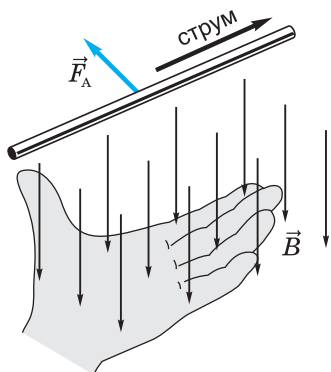


Рис. 26.1. Правило лівої руки, яке встановлює напрям сили, що діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля.

### Як магнітне поле діє на рамку зі струмом?

Ми вже казали, що магнітне поле спричиняє орієнтувальну дію на рамку зі струмом. Тепер ми можемо переконаватися в цьому, використовуючи правило лівої руки. На рис. 26.2 зображено сили, які діють на протилежні сторони рамки. Ми бачимо, що вони насправді прагнуть повернути рамку так, щоб її площина була перпендикулярною до ліній магнітної індукції.

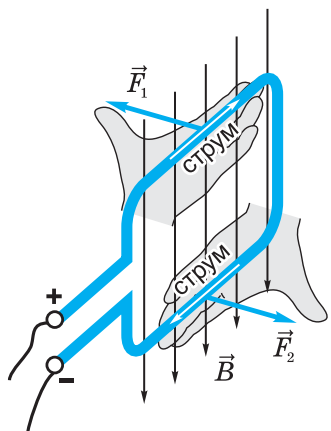


Рис. 26.2. Пояснення орієнтувальної дії магнітного поля на рамку зі струмом за допомогою правила лівої руки.

## ЗАСТОСУВАННЯ СИЛИ АМПЕРА

### Електровимірювальні прилади

Орієнтувальну («повертальну») дію магнітного поля на рамку зі струмом використовують в електровимірювальних приладах (при цьому рамка складається звичайно з кількох витків).

На рис. 26.3 схематично зображено принцип дії такого приладу. Між полюсами магніту розміщено провідну рамку, до якої прикріплено стрілку (площина рамки перпендикулярна до площини рисунка). Рамка втримується в горизонтальному положенні пружинкою: у разі відхилення рамки від цього положення в той чи інший бік пружинка деформується.

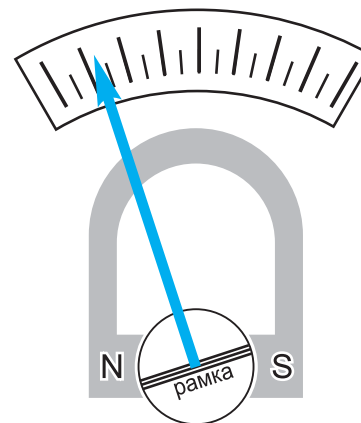


Рис. 26.3. Схема дії електровимірювального приладу: кут повороту рамки зі струмом залежить від сили струму в рамці.

Якщо по рамці пропускати струм, то під дією сили Ампера рамка почне повертатися, прагнучи розташуватися так, щоб її площина стала вертикальною (перпендикулярною до ліній магнітної індукції). Проте на рамку діє ще й сила пружності з боку пружинки, тому рамка буде повертатися тільки доти, поки сила Ампера, що діє на неї, не зрівноважиться силою пружності, яка діє з боку пружинки. Що більша сила струму в рамці, то більша сила Ампера, яка діє на рамку, і, отже, то на більший кут вона повернеться.

### Електродвигун

Орієнтувальну дію магнітного поля на рамку зі струмом використовують також в електродвигунах. При цьому для посилення обертового ефекту в електродвигунах поміщають звичайно багато рамок.

## Гучномовець

Звукові хвилі в повітрі — це хвилі згущень і розріджень.

Такі хвилі створює будь-яке тіло, що коливається. У гучномовцях як таке тіло використовують зазвичай конус із цупкого паперу (його називають діафрагмою або дифузором). Конус прикріплюють до котушки, по якій протікає змінний струм, а саму цю котушку (її називають звуковою котушкою) поміщають у змінне магнітне поле. Під дією змінної сили Ампера котушка коливається, і ці коливання передаються паперовому конусу.

На рис. 26.4 схематично зображено будову такого гучномовця в розрізі.

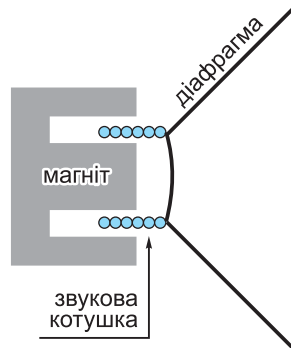


Рис. 26.4. Схематичне зображення гучномовця: діафрагма, що випромінює звукові хвилі, прикріплена до котушки, по якій протікає змінний струм.

Для поліпшення якості звучання часто використовують не один гучномовець, а систему з кількох гучномовців, кожний з яких розраховано на певний діапазон частот.

## 2. СИЛА ЛОРЕНЦА

Дія магнітного поля на провідник зі струмом є результатом того, що **магнітне поле діє на заряджені частинки**, які рухаються, а електричний струм являє собою спрямований рух таких частинок.

Силу, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, називають **силою Лоренца**<sup>1</sup>. Напрямок і модуль сили Лоренца можна знайти, знаючи напрямок і модуль сили Ампера.

Розрахунок свідчить, що

**напрямок сили Лоренца**, яка діє на позитивно заряджену частинку, визначають за допомогою правила лівої руки: якщо розкрити долоню лівої руки розташувати так, щоб вектор

<sup>1</sup> На честь голландського фізика Гендріка Антона Лоренца, який вивчав рух заряджених частинок в електричному й магнітному полях.

магнітної індукції входив у долоню, а чотири витягнутих пальці вказували напрям швидкості позитивно зарядженої частинки, то відігнутий у площині долоні великий палець покаже напрям сили, що діє на частинку (рис. 26.5).

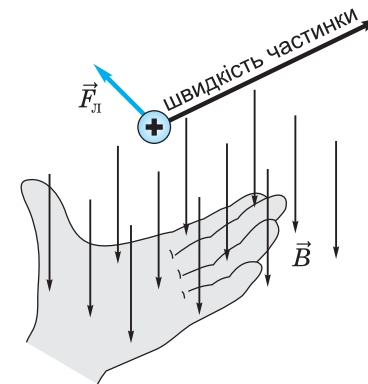


Рис. 26.5. Визначення напрямку сили Лоренца, яка діє з боку магнітного поля на заряджену частинку, що рухається, за допомогою правила лівої руки.

На **негативно** заряджену частинку (наприклад, електрон) сила Лоренца діє в напрямі, протилежному до напрямку дії цієї сили на позитивно заряджену частинку. Тому під дією сили Лоренца позитивно й негативно заряджені частинки повертають у **різні** боки. Це використовують, наприклад, коли досліджують частинки, які вилітають унаслідок розпаду атомних ядер.

Розрахунки доводять, що **модуль сили Лоренца**  $F_L = qvB \sin \alpha$ , де  $q$  — модуль заряду частинки,  $v$  — модуль її швидкості,  $B$  — модуль магнітної індукції,  $\alpha$  — кут між швидкістю частинки й вектором магнітної індукції.

Сила Лоренца напрямлена перпендикулярно до швидкості частинки і вектора магнітної індукції. Тому якщо частинка влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до його лінії магнітної індукції, то під дією сили Лоренца вона рухатиметься **по колу** в площині, перпендикулярній до вектора  $\vec{B}$ .

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке сила Ампера?
2. Чому дорівнює сила Ампера, коли провідник розміщено в магнітному полі перпендикулярно до вектора магнітної індукції? Під кутом  $\alpha$  до вектора магнітної індукції?



3. Як визначити напрям сили Ампера?
4. Сформулюйте закон Ампера.
5. Як магнітне поле діє на рамку зі струмом?
6. Поясніть принцип дії електровимірювальних приладів, електродвигунів і гучномовця.
7. Що таке сила Лоренца?
8. Як визначити напрям і модуль сили Лоренца?
9. Провідник зі струмом перебуває в магнітному полі, напрям якого збігається з напрямом магнітного поля Землі. Струм по провіднику тече в напрямі із заходу на схід. Зробіть відповідний рисунок та за його допомогою визначте, як напрямлена сила Ампера, що діє на провідник зі струмом.
10. Позитивно заряджена частинка влітає горизонтально в магнітне поле, вектор магнітної індукції якого напрямлений вертикально вниз. Під дією магнітного поля частинка починає рухатися по колу. Зробіть відповідний рисунок та з його допомогою визначте, у якому напрямі (якщо дивитися згори) рухатиметься частинка — за годинниковою стрілкою чи проти.

## § 27. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ

1. Гіпотеза Ампера
2. Магнітна проникність
3. Феромагнетики

*Французький фізик Андре Марі Ампер припустив, що магнітні властивості речовини зумовлені існуванням усередині їх незгасних «молекулярних струмів». Ми розповімо про те, якою мірою ця гіпотеза підтвердилася подальшими дослідженнями.*

*У цьому параграфі визначено фізичну величину, що характеризує магнітні властивості речовини, і розказано, як розподіляють речовини за їхніми магнітними властивостями. Розказано також про магнітне записування інформації.*

### 1. ГІПОТЕЗА АМПЕРА

Як ми вже казали (див. § 24. *Взаємодія магнітів і струмів*), Ампер припустив, що магнітні властивості речовини зумовлені незгасними «молекулярними» струмами, які циркулюють у ній.

Якщо напрями цих струмів орієнтовані хаотично, речовина не виявляє магнітних властивостей. Але якщо напрями «молекулярних» струмів упорядковані (хоча б частково), зразок речовини виявлятиме магнітні властивості. На рис. 27.1 схематично зображено випадок, коли всі «молекулярні» струми зорієнтовано однаково. При цьому у внутрішніх частинах зразка «сусідні» молекулярні струми напрямлені протилежно й тому компенсують один одного. А поблизу поверхні ці струми течуть в одному напрямі, утворюючи ніби струм, який обтікає поверхню зразка, у результаті чого зразок стає подібним до котушки зі струмом, тобто стає магнітом.

Гіпотеза Ампера пояснює, чому взаємодія магнітів один з одним так схожа на взаємодію котушок зі струмами. Вона також дає пояснення й тому, чому не вдається роз'єднати полюси магніту, отримавши «поодинокі» полюси: адже кожна половина магніту знову схожа на котушку зі струмом.

Подальше вивчення будови речовини підтвердило гіпотезу Ампера про «молекулярні струми», але тільки для так званих діаманетиків і парамагнетиків — речовин, що мають порівняно слабо виражені магнітні властивості і лише за наявності зовнішнього магнітного поля. Магнітні ж властивості феромагнетиків, з

яких виготовляють, наприклад, постійні магніти, мають, як з'ясувалося, іншу природу. Нижче ми розповімо про це докладніше.

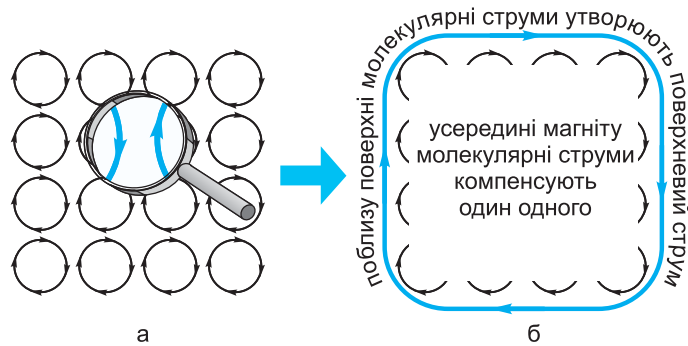


Рис. 27.1. Гіпотеза Ампера пояснює подібність між постійними магнітами й котушками зі струмом: молекулярні струми компенсують один одного у внутрішніх частинах магніту, а поблизу його поверхні утворюють струм, що обтікає магніт подібно до струму в котушці.

## 2. МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ

Як ви вже знаєте, напруженість електричного поля всередині речовини менша від напруженості електричного поля у вакуумі (див. § 17. *Провідники та діелектрики в електростатичному полі*). Нагадаємо, що величину, яка показує, у скільки разів зменшується напруженість електричного поля, називають діелектричною проникністю.

Щодо впливу речовини на магнітне поле, то, як свідчать досліди, магнітна індукція всередині речовини може як зменшуватися, так і зростати. Магнітні властивості речовини характеризують її **магнітною проникністю**.

Магнітна проникність речовини  $\mu$  дорівнює відношенню модуля магнітної індукції  $B$  в даній речовині до магнітної індукції  $B_0$  зовнішнього магнітного поля, тобто  $\mu = B/B_0$ .

Залежно від значення магнітної проникності всі речовини можна поділити на три групи: діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики.

### ДІАМАГНЕТИКИ

Так називають речовини, для яких магнітна проникність  $\mu < 1$ , тобто в діамагнетиках магнітна індукція **зменшується** порівняно з вакуумом. Тіла, які складаються з діамагнетиків, мають цікаву властивість, уперше виявлену на досліді Фарадеєм: діамагнетики **виштовхуються** з області магнітного поля. Діамагнетиками є, наприклад, багато газів й органічних речовин, а

також мідь, вісмут, сірка. І хоча відмінність діамагнітної проникності всіх діамагнетиків від одиниці дуже мала:  $1 - \mu \approx 10^{-6}$ , магнітні властивості діамагнетиків легко спостерігати на досліді.

### Проведемо дослід

Якщо помістити полум'я в область сильного магнітного поля, воно виштовхується з поля (рис. 27.2). Річ у тім, що полум'я містить значну кількість вуглекислого газу, який є діамагнетиком.

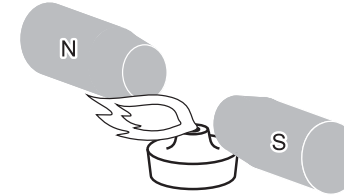


Рис. 27.2. Полум'я виштовхується з області магнітного поля, тому що полум'я є діамагнетиком.

### ПАРАМАГНЕТИКИ

Так називають речовини, для яких магнітна проникність  $\mu > 1$ , але відмінність  $\mu$  від одиниці приблизно так само мала, як і для діамагнетиків:  $\mu - 1 \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ . У парамагнетиках магнітна індукція **збільшується** порівняно з вакуумом. Парамагнетиками є, наприклад, алюміній, натрій, платина, а також розчини багатьох солей.

Тіла, які складаються з парамагнетиків, **втягуються** в область магнітного поля.

### Проведемо дослід

Візьмемо відкриту з обох кінців U-подібну трубку, наповнену сольовим розчином, що є парамагнетиком.

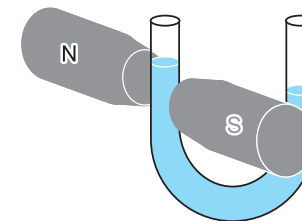


Рис. 27.3. Парамагнітна рідина втягується в область магнітного поля.

Якщо одне коліно трубки помістити в область сильного магнітного поля, рівень рідини в цьому коліні стане вище, ніж у другому (рис. 27.3). Отже, ця рідина втягується в область магнітного поля.

### 3. ФЕРОМАГНЕТИКИ

Найцікавішими та важливими для практичних застосувань є феромагнетики. Так називають речовини, **магнітна проникність яких дуже велика** — від декількох сотень до майже мільйона. Найпоширенішим (та найважливішим для використання в техніці) феромагнетиком є **залізо**. Феромагнетиками є також нікель, кобальт, гадоліній і деякі сплави.

Оскільки магнітна індукція в разі застосування феромагнетиків у багато разів збільшується, феромагнітні осердя використовують, наприклад, для створення потужних електромагнітів для піднімальних кранів.

Важливою особливістю феромагнетиків є **залишковий магнетизм**, який виявляється в тому, що феромагнетики зберігають магнітні властивості й після вимкнення зовнішнього магнітного поля. Саме завдяки цьому й існують **постійні магніти**.

Магнітні властивості феромагнетиків зумовлені не рухом електронів, а властивостями самих електронів. Річ у тім, що кожен електрон ніби обертається навколо своєї осі, утворюючи мікроскопічний «виток зі струмом». І в деяких речовинах (вони і є феромагнетиками) атоми орієнтуються так, що осі «обертання» великої кількості електронів виявляються напрямленими однаково, у результаті чого цей зразок речовини й стає постійним магнітом.

#### Точка Кюрі

Наприкінці 19-го століття французький фізик П'єр Кюрі виявив, що феромагнітні властивості зникають у разі нагрівання феромагнетика до певної температури, характерної для даної речовини. Цю температуру назвали **точкою Кюрі**. Так, якщо розжарити постійний магніт до білого, він втратить свої магнітні властивості (але здобуде їх знову, якщо його спочатку охолодити, а потім намагнітити ще раз, помістивши в область сильного магнітного поля).

Точка Кюрі для заліза дорівнює 753 °С, але існують феромагнітні сплави, для яких точка Кюрі нижче 100 °С, тобто вони втрачають феромагнітні властивості вже внаслідок занурення в окріп. Через наявність точки Кюрі магнітні властивості Землі не можна пояснити тим, що ядро Землі, яке складається значною мірою із заліза, «намагнічене»: адже температура ядра Землі становить кілька тисяч градусів. Природа земного магнетизму до сьогоднішнього дня залишається нерозгаданою загадкою (хоча в учених і є щодо цього деякі припущення).

### МАГНІТНИЙ ЗАПИС ІНФОРМАЦІЇ

Завдяки залишковому магнетизму феромагнетики мають «пам'ять», унаслідок чого їх широко використовують для записування й зберігання інформації. Так, усім добре знайомі магнітофони й відеомагнітофони, за допомогою яких інформацію записують на магнітну стрічку і зчитують з магнітної стрічки. На таку стрічку нанесено дуже тонкий шар «магнітного лаку», який містить мікроскопічні голчасті частинки заліза або іншого феромагнетика.

Записувальна (вона ж зазвичай і відтворювальна) головка магнітофона або відеомагнітофона являє собою мініатюрний електромагніт, повз який рухається магнітна стрічка (рис. 27.4).



Рис. 27.4. Схематичне зображення записувальної та відтворювальної головки магнітофона поблизу магнітної стрічки.

Коли записують інформацію, на котушку електромагніта подають змінний струм, який створює змінне магнітне поле й тому по-різному намагнічує різні ділянки магнітної стрічки, яка рухається поблизу записувальної головки. У результаті на стрічці залишається записана інформація.

У разі зчитування ж інформації з магнітної стрічки відбувається зворотний процес: унаслідок руху неоднорідно намагніченої стрічки магнітне поле, що змінюється, збуджує змінний струм у котушці (це зумовлено явищем електромагнітної індукції, яке ви будете вивчати в 11-му класі). Змінний струм з котушки подають в підсилювач для відтворення звуку (або зображення).

Такий самий принцип записування й зчитування інформації і на гнучких дисках у комп'ютерах. Сьогодні їм на заміну приходять лазерні компакт-диски, проте можливості й магнітного записування інформації ще далеко не вичерпані.

#### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. У чому полягає гіпотеза Ампера?
2. Що таке магнітна проникність речовини?

3. Які речовини називають діамагнетиками? Які основні властивості діамагнетиків?
4. Які речовини називають парамагнетиками? Які основні властивості парамагнетиків?
5. Які речовини називають феромагнетиками? Які основні властивості феромагнетиків?
6. Завдяки якій властивості феромагнетиків з них можна виготовляти постійні магніти?
7. Що таке точка Кюрі?
8. У чому полягає принцип магнітного записування інформації?

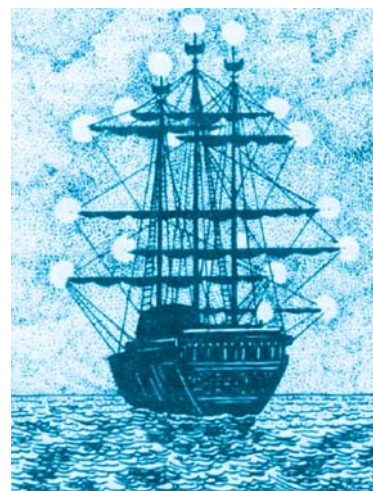
## ГОЛОВНЕ У ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- **Магнітною взаємодією** називають взаємодію між електричними зарядами, які рухаються (або провідниками зі струмом).
- **Взаємодія паралельних провідників зі струмами:** якщо по провідниках течуть струми в одному напрямі, ці провідники притягуються, а якщо в протилежних — то відштовхуються.
- **Гіпотеза Ампера:** усі магнітні взаємодії зумовлені взаємодією електричних струмів.
- Магнітна взаємодія здійснюється за **допомогою магнітного поля:** провідник зі струмом створює навколо себе магнітне поле, яке діє на інші провідники зі струмами. Магнітне поле являє собою вид матерії, яка оточує заряди, що рухаються (провідники зі струмами), і виявляється в дії на заряди, які рухаються (провідники зі струмами).
- Основна характеристика магнітного поля — **магнітна індукція**, яка є векторною величиною.
- За **напрямом магнітної індукції** беруть напрям, на який вказує північний полюс магнітної стрілки, що вільно обертається. Напрямом магнітної індукції можна визначити також за допомогою «**правила правого гвинта (свердлика)**»: рамка зі струмом устаноується в магнітному полі так, що в разі обертання ручки свердлика за напрямом струму в рамці сам свердлик переміщатиметься в напрямі вектора магнітної індукції цього поля.
- **Модуль магнітної індукції** дорівнює відношенню сили, яка діє на провідник зі струмом, розташований перпендикулярно до вектора магнітної індукції, до добутку сили струму в провіднику й довжини провідника:  $B = F/Il$ .
- **Лінії магнітної індукції** — це уявні лінії, дотичні до яких показують напрям магнітної індукції в кожній точці. Щільність ліній магнітної індукції пропорційна до модуля магнітної індукції.
- Силу, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, називають **силою Ампера**.
- **Напрямом сили Ампера** визначає **правило лівої руки:** якщо розкрити долоню лівої руки розташувати так, щоб вектор магнітної індукції входив у долоню, а чотири витягнутих пальці вказували напрям струму в провіднику, то відігнутий у площину

щині долоні великий палець покаже напрям сили, яка діє на провідник з боку магнітного поля.

- **Модуль сили Ампера**  $F_A = IlB\sin\alpha$ , де  $I$  — сила струму в провіднику,  $l$  — довжина провідника,  $B$  — модуль магнітної індукції,  $\alpha$  — кут між провідником і вектором магнітної індукції.
- Силу, що діє на заряджену частинку, яка рухається в магнітному полі, називають **силою Лоренца**.
- **Напрямок сили Лоренца**, яка діє на позитивно заряджену частинку, визначають за допомогою правила лівої руки: якщо розкрити долоню лівої руки розташувати так, щоб вектор магнітної індукції входив у долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрям швидкості позитивно зарядженої частинки, то відігнутий у площині долоні великий палець покаже напрям сили, що діє на частинку. Напрямок сили Лоренца, що діє на негативно заряджену частинку, протилежний до напрямку сили, яка діє на позитивно заряджену частинку.
- **Модуль сили Лоренца**  $F_L = qvB\sin\alpha$ , де  $q$  — модуль заряду частинки,  $v$  — модуль її швидкості,  $B$  — модуль магнітної індукції,  $\alpha$  — кут між швидкістю частинки й вектором магнітної індукції.
- **Магнітна проникність** речовини  $\mu$  дорівнює відношенню модуля магнітної індукції  $B$  в даній речовині до магнітної індукції  $B_0$  зовнішнього магнітного поля, тобто  $\mu = B/B_0$ .
- **Діамагнетиками** називають речовини, для яких магнітна проникність  $\mu < 1$ . Діамагнетиками **виштовхуються** з області магнітного поля.
- **Парамагнетиками** називають речовини, для яких магнітна проникність  $\mu > 1$ , але мало відрізняється від одиниці. Парамагнетиками **втягуються** в область магнітного поля.
- **Феромагнетиками** називають речовини, **магнітна проникність яких дуже велика** — від кількох сотень до майже мільйона. Найважливішим у практичному відношенні феромагнетиком є **залізо**. Важливою особливістю феромагнетиків є **залишковий магнетизм**, завдяки якому з них виготовляють **постійні магніти**.

## Розділ 6. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ



У цьому розділі розглянуто природу електричного струму в різних середовищах — металах, електролітах, газах, вакуумі й напівпровідниках.

Ми побачимо, що в кожному із цих середовищ електричний струм зумовлений рухом різних носіїв заряду. Унаслідок цього, коли струм проходить крізь ці середовища, спостерігають різні, іноді дивні явища.

Ми розповімо також про численні застосування електричного струму в різних середовищах — від реклами до виплавки металів.

## § 28. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ

1. Вільні електрони
2. Надпровідність

Ми розглянемо тут природу електричного струму та електричного опору в крапцях провідників — металах. Ви дізнаєтесь про незвичайні властивості вільних електронів, які виявилися набагато «вільнішими», ніж передбачала класична фізика.

Ми розповімо також про чудове явище надпровідності, яке полягає в тому, що за досить низьких температур опір деяких металів і сплавів стає таким, що точно дорівнює нулю.

### 1. ВІЛЬНІ ЕЛЕКТРОНИ

#### ЯК ДОВЕЛИ НА ДОСЛІДІ, ЩО НОСІЯМИ ЗАРЯДУ В МЕТАЛАХ Є ЕЛЕКТРОНИ?

Як ви вже знаєте (див. § 21. Закон Ома для ділянки кола), найкращими провідниками, тобто речовинами, що мають найменший питомий опір, є **метали**. Зумовлено це наявністю в металах **вільних електронів**. Вони утворюють так званий електронний газ, який оточує кристалічну ґратку з позитивних іонів металу.

Під впливом зовнішнього електричного поля вільні електрони починають рухатися, тобто виникає електричний струм.

У тому, що носіями електричного заряду в металах є саме електрони, учені переконалися за допомогою дослідів, поставлених на початку 20-го століття.

Ідея цих дослідів дуже проста.

Якщо різко загальмувати металевий брусок, який швидко рухається, то вільні заряди, що перебувають у ньому, будуть ще якийсь короткий час рухатися за інерцією. Унаслідок цього вони нагромаджуються біля переднього (за напрямом руху) кінця бруска. І якщо вільні заряди — це негативно заряджені частинки, то їхній надлишок на передньому кінці бруска надасть йому негативного заряду, а їх нестача на задньому кінці надасть йому позитивного заряду, тобто відбудеться розподіл зарядів (див. рис. 28.1). Отже, між кінцями бруска виникне різниця потенціалів певного знака.

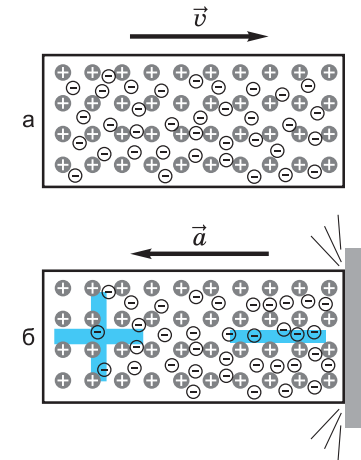


Рис. 28.1. Виникнення зарядів на кінцях металевго бруска внаслідок різкого гальмування. Темними кружками схематично позначено іони кристалічної ґратки, а білими — вільні електрони: а) брусок, що швидко рухається з постійною швидкістю; б) унаслідок різкого гальмування бруска вільні заряди (електрони) нагромаджуються біля переднього кінця бруска.

Саме це й показав дослід, у якому котушку з металевим дротом приводили до швидкого обертання, а потім різко гальмували. Між кінцями котушки виникла різниця потенціалів, яку можна було виміряти. У цьому досліді вдалося не тільки встановити, що вільні заряди в металі — це негативно заряджені частинки, але й виміряти відношення електричного заряду цих частинок до їхньої маси. І виявилось, що воно саме дорівнює вже виміряному на той час відношенню заряду електрона до його маси.

#### ПРИРОДА ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ МЕТАЛІВ

Для з'ясування природи електричного опору металів учені припустили, що причиною опору є зіткнення вільних електронів з позитивно зарядженими іонами кристалічної ґратки. Унаслідок цих зіткнень вільні електрони відхиляються від напрямку свого руху, що й спричинює появу «гальмівної» сили.

Однак обчислений на підставі такого припущення опір металів виявився в тисячі разів більшим від виміряного. Дослід свідчив, що вільні електрони рухаються крізь метал майже без зіткнень, ніби «не помічаючи» іонів кристалічної ґратки. Інакше кажучи, вільні електрони виявилися набагато «вільнішими», ніж передбачалося.

Така поведінка електронів більше нагадувала рух *хвиль*, ніж рух частинок: вільні електрони не зіштовхувалися з іонами кристалічної ґратки, а ніби плавно «обтікали» їх. Подальше вивчення довело, що така «хвильова» поведінка електронів у кристалі не є випадковою. З курсу фізики 11-го класу ви дізнаєтесь, що згідно з **квантовою механікою** — наукою про рух і взаємодію найдрібні-

ших частинок речовини, до яких належать електрони, — усі частинки (у тому числі й електрони) мають властивості не тільки частинок, а й хвиль.

Як на «здоровий глузд», квантова механіка виявилася дуже незвичайною: наприклад, згідно з квантовою механікою всі частинки, у тому числі електрони, мають властивості не тільки частинок, а й *хвиль*. І, коли електрони рухаються в металі, «електронна хвиля» насправді «обтікає» іони кристалічної ґратки — цим і зумовлений настільки малий електричний опір металів. Навіть більше: розрахунки довели, що якби кристалічна ґратка металу була *ідеально періодичною*, електронна хвиля проходила б крізь кристал, *узагалі* не відхиляючись від свого напрямку — як крізь порожнечу. У такому випадку електричний опір металу дорівнював би *нулю*.

Проте в реальному кристалі ґратка не є ідеально періодичною: періодичність порушують домішки, дефекти ґратки, а також відхили іонів від своїх рівноважних положень унаслідок теплових коливань. На цих «нерегулярностях» ґратки електронна хвиля розсіюється. Розрахунки, виконані в припущенні, що це і є причиною електричного опору металів, дістали підтвердження в досліді.

Отже, «дивна» квантова механіка потрібна не тільки для пояснення мікросвіту (наприклад, будови атома), а й для розуміння отакої цілком «макроскопічної» властивості речовини, як її питомий опір.

## ЯК ЗАЛЕЖИТЬ ОПІР МЕТАЛІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ?

Дослід свідчить, що *опір металів у разі підвищення температури збільшується* приблизно прямо пропорційно до абсолютної температури. Графік залежності питомого опору від абсолютної температури за не дуже низьких температур схематично зображено на рис. 28.2. Область низьких температур розглянуто нижче, у розділі «Надпровідність».

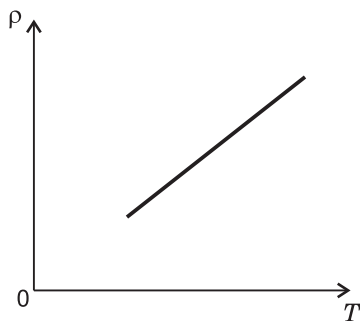


Рис. 28.2. Графік залежності питомого опору металів від абсолютної температури.

Зростання опору металів з температурою зумовлено тим, що нагрівання посилює теплові коливання іонів, тобто збільшує відхил кристалічної ґратки від ідеальної періодичності. Унаслідок цього збільшується розсіювання електронних хвиль на нерегулярностях ґратки. Це й спричинює зростання електричного опору, причому досить значне: наприклад, опір нитки розжарення електричної лампи в «робочому стані» може більш ніж у 10 разів перевищувати її опір за кімнатної температури. Оскільки опір «холодної» лампи набагато менший за її «робочий» опір, сила струму в момент увімкнення лампи набагато перевищує силу струму в «робочому стані». Саме з цієї причини лампи зазвичай перегорять у момент увімкнення.

## 2. НАДПРОВІДНІСТЬ

На початку 20-го століття голландський фізик Гейке Камерлінг-Оннес зробив дивне відкриття: він виявив, що за температури нижче ніж 4,15 К опір ртуті стає таким, що дорівнює *нулю*. За відсутності джерела струму сила струму в ртутному кільці (за такої низької температури ртуть є твердим тілом) залишалася зовсім незмінною доти, поки підтримувалася низька температура. Це явище було названо *надпровідністю*. На рис. 28.3 зображено графік залежності питомого опору ртуті від абсолютної температури.

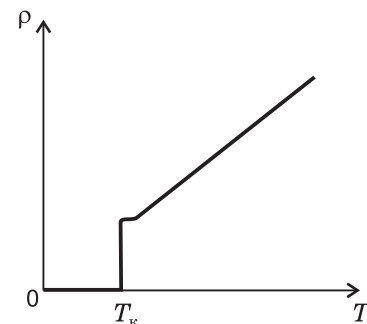


Рис. 28.3. Графік залежності питомого опору ртуті від абсолютної температури. За температури нижчої, ніж критична температура  $T_k$ , опір стає таким, що дорівнює нулю.

Надалі було виявлено, що ртуть — не виняток: багато металів і сплавів переходять за досить низьких температур у надпровідний стан. Виняток, як не дивно, становлять кращі з провідників, наприклад срібло й мідь: їх не вдалося перевести до надпровідного стану навіть за температури, дуже близької до абсолютного нуля.

Пояснити надпровідність удалося за допомогою квантової механіки в середині 20-го століття. Виявилось, що та сама кристалічна ґратка, нерегулярності якої зазвичай є перешкодою для руху електронів, цього разу «простягає їм руку допомоги». Річ у тім, що завдяки взаємодії електронів з іонами ґратки між електронами виникає *притягання*: один електрон трохи деформує ґратку, унаслідок чого інший електрон втягується в область цієї деформації. У результаті електрони поєднуються в пари, названі куперівськими на честь американського фізика

Леона Купера, який запропонував таке пояснення надпровідності. Коли один електрон з куперівської пари потрапляє на нерегулярність ґратки, другий електрон — його партнер — «утримує» його від зіткнення, не даючи йому змінити свій імпульс. Завдяки цій «взаємодопомозі» електрони куперівських пар, нібито «взявшись за руки», зовсім вільно проходять крізь ґратку з досить малими нерегулярностями (для того щоб нерегулярності, зумовлені тепловими коливаннями, були малими, і потрібне охолодження до низьких температур).

Таке пояснення робить зрозумілим і те, чому кращі провідники не стають надпровідниками: у них занадто слабка взаємодія між вільними електронами та іонною ґраткою. Це робить їх кращими провідниками, але «позбавляє надії» стати надпровідниками, тому що через слабку взаємодію вільних електронів з ґраткою вони не можуть утворювати куперівські пари. І тому не випадково надпровідність було відкрито вперше в «найгіршому» з металевих провідників — ртуті.

Наприкінці 20-го століття вдалося створити надпровідні сплави з температурою надпровідного переходу більше 100 К. Завдяки цьому з'явилася можливість використовувати для охолодження замість дорогого рідинного гелію дешевий рідинний азот. А це різко розширило можливості застосування надпровідників, зокрема, для створення дуже сильних магнітних полів і надпотужних комп'ютерів. Учені сподіваються, що їм вдасться створити речовини, що є надпровідниками за кімнатної температури. У цьому випадку можна було б у багато разів зменшити втрати електроенергії в процесі її передавання на великі відстані.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Як було доведено на досліді, що носіями заряду в металах є електрони?
2. Яка природа електричного опору металів?
3. Чи можна переконливо пояснити електричний опір металів у рамках класичної фізики?
4. Як залежить електричний опір металів від температури? Чим зумовлена така залежність?
5. У чому полягає явище надпровідності? Чи всі метали стають надпровідними у разі охолодження до досить низьких температур?
6. Яким є механізм надпровідності?

## § 29. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ЕЛЕКТРОЛІТАХ

1. Носії заряду в електролітах
2. Закон електролізу
3. Застосування електролізу

*Ми розглянемо тут природу електричного струму у водних розчинах солей, кислот і лугів. Носіями заряду в цих речовинах є позитивні й негативні іони. Ми розповімо про механізм утворення іонів.*

*Під час проходження струму через електроліти на електродах виділяються різні речовини. Цей процес називають електролізом. Ми виведемо закон електролізу й розповімо про практичне застосування електролізу.*

### 1. НОСІЇ ЗАРЯДУ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ

#### ПОСТАВИМО ДОСЛІД

Опустимо в посудину з дистильованою водою (така вода не містить домішок і розчинених речовин) два електроди — провідники, з'єднані з джерелом струму через лампу (див. рис. 29.1а). Лампа не світиться. Відсутність струму означає, що вода є діелектриком, тобто в ній немає носіїв заряду.

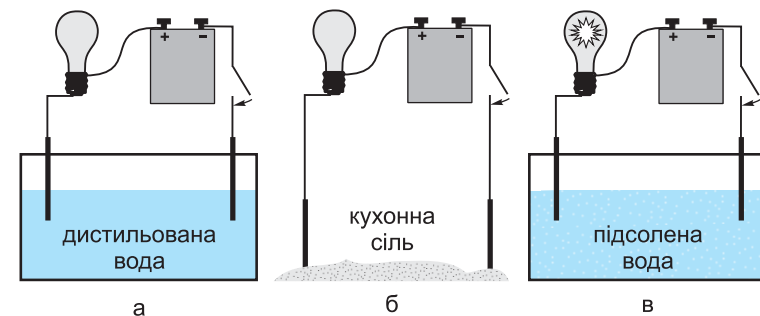


Рис. 29.1. Вода й суха кухонна сіль — діелектрики, але підсолена вода є провідником.



У такий самий спосіб можна переконалися, що суха кухонна сіль також є діелектриком (див. рис. 29.1б), тобто і в ній немає носіїв заряду.

А тепер «об'єднаємо» ці два діелектрики: насиплемо в посудину з водою дві-три ложки кухонної солі.

Ми побачимо, що в разі занурення в посудину електродів лампа починає світитися, причому в міру розчинення солі розжарення лампи збільшується (див. рис. 29.1в).

Отже, підсолена вода є **провідником**, тобто в ній є носії заряду. Причому носії заряду **з'являються** саме внаслідок **розчинення** солі у воді. Яка ж їхня природа?

## ЕЛЕКТРОЛІТИЧНА ДИСОЦІАЦІЯ

За допомогою дослідів, подібних до описаного вище, неважко переконалися в тому, що кухонна сіль не є винятком, а ілюструє загальне правило: практично всі водні розчини солей, лугів і кислот є провідниками<sup>1</sup>. Такі провідники називають **електролітами**<sup>2</sup>. Носіями заряду в електролітах є **іони**, тобто **електроліти мають іонну провідність**. Яка ж причина утворення іонів в електролітах?

Річ у тім, що в молекулах солей, кислот і лугів зв'язок між атомами «первинно» є **іонним**, тобто кожна молекула утворена позитивними й негативними іонами, що їх утримують разом сили електростатичного притягання. Наприклад, у молекулі кухонної солі NaCl позитивно заряджений іон Натрію  $\text{Na}^+$  притягується до негативно зарядженого іона Хлору  $\text{Cl}^-$ . У водному розчині полярні молекули води «розтягують» молекулу з іонним зв'язком, послабляючи зв'язок між іонами (див. рис. 29.2).

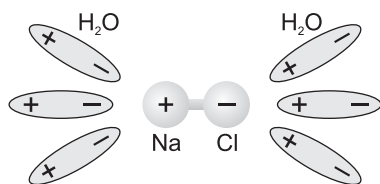


Рис. 29.2. Полярні молекули «розтягують» молекулу з іонним зв'язком, послабляючи зв'язок між іонами.

Унаслідок цього під час зіткнень, спричинених тепловим рухом, молекула легко розпадається на позитивні й негативні іони. Саме вони й стають носіями заряду у водному розчині (наприклад, у підсоленій воді).

<sup>1</sup> Але дуже багато з водних розчинів не є провідниками: наприклад, розчин цукру (підсолонена вода) — не провідник.

<sup>2</sup> Від «електро» і грецького *lytos* — що розкладається, розчинний.

Розпад молекули на іони називають **електролітичною дисоціацією**<sup>1</sup>, а зворотний до нього процес утворення нейтральної молекули з іонів — **рекомбінацією**.

За заданих умов (температури розчину та його концентрації) між процесами дисоціації й рекомбінації встановлюється **динамічна рівновага**. Її характеризує певне відношення кількості молекул, що розпалися, до загальної кількості молекул розглядуваної речовини. Це відношення називають **ступенем дисоціації**.

## Як рухаються позитивні й негативні іони?

Коли струм проходить через електроліт, позитивні іони рухаються до електрода, з'єданого з негативним полюсом джерела струму. Цей електрод називають **катодом**<sup>2</sup> і відповідно позитивні іони — **катіонами**.

Негативні ж іони рухаються до **анода**<sup>3</sup> — електрода, з'єданого з позитивним полюсом джерела струму. Тому негативні іони називають **аніонами**.

Отже, катіони й аніони рухаються в протилежних напрямках, але їхній рух **відповідає тому самому напрямку струму**, тобто вони переносять заряд **в одному напрямі**.

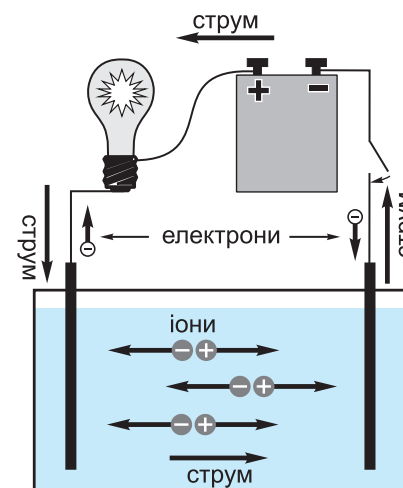


Рис. 29.3. Рух іонів в електроліті й електронів у дротах.

Заряджені негативно аніони, які прийшли до позитивного анода, віддають йому свої надлишкові електрони, а позитивно

<sup>1</sup> Від латинського *dissociatio* — роз'єднання.

<sup>2</sup> Від грецького «*kathodos*» — спуск.

<sup>3</sup> Від грецького «*anodos*» — підйом.

заряджені катіони, які прийшли до негативного катода, «забирають» у нього електрони, яких їм не вистачає. У результаті обидва типи іонів перетворюються на нейтральні атоми або молекули.

У металевих же дротах при цьому рухаються лише електрони.

Рух іонів в електроліті й електронів у дротах схематично зображено на рис. 29.3.

### Як залежить опір електролітів від температури?

Що більший ступінь дисоціації, то більше носіїв заряду в розчині, тобто тим кращим провідником є цей розчин (його питомий опір зменшується). Ступінь же дисоціації з нагріванням збільшується, оскільки тепловий рух стає інтенсивнішим. Тому питомий опір електролітів із нагріванням *зменшується* (на противагу металам, для яких, як ми вже знаємо, опір із нагріванням збільшується).

## 2. ЗАКОН ЕЛЕКТРОЛІЗУ

Процес виділення речовини на електродах, який протікає внаслідок проходження електричного струму через розчин електроліту, називають *електролізом*.

Кількісні закони електролізу було встановлено на досліді Майклом Фарадеєм у першій половині 19-го століття. Фарадей установив, що

маса речовини  $m$ , що виділяється на електроді, пропорційна до заряду  $q$ , який пройшов через електроліт:  
 $m = kq$ .

Сталу  $k$  називають *електрохімічним еквівалентом* речовини.

Фарадей установив, що електрохімічний еквівалент речовини прямо пропорційний до його молярної маси і обернено пропорційний до валентності речовини.

Коли Фарадей відкривав закон електролізу, ще не було побудовано молекулярно-кінетичну теорію й не було виміряно заряд електрона. Саме дослідження Фарадея зародили перші «підозри» про існування найменшого електричного заряду, який і було названо «електроном» — задовго до того, як було відкрито частинку-електрон.

Проте сьогодні, добре уявляючи собі механізм електролізу, ми можемо за допомогою нескладних розрахунків теоретично вивести закон електролізу й виразити електрохімічний еквівалент речовини через його молярну масу й валентність.

## ВИВЕДЕННЯ ЗАКОНУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

Масу  $m$  речовини, що виділилася на електроді, можна виразити через масу одного іона  $m_0$  і кількість іонів, які досягли електрода:

$m = Nm_0$ . Оскільки (див. § 2. *Кількість речовини. Стала Авогадро*)

$m_0 = \frac{M}{N_A}$ , де  $M$  — молярна маса речовини,  $N_A$  — число Авогадро,

отримуємо  $m = N \frac{M}{N_A}$ .

Заряд  $q$ , «перенесений» цими іонами<sup>1</sup>, можна виразити через кількість іонів  $N$  і заряд одного іона  $en$ , де  $e$  — елементарний заряд (модуль заряду електрона), а  $n$  — число недостатніх (або надлишкових) електронів у іона, тобто його валентність. Дістаємо  $Q = Nen$ . Використовуючи здобуту вище формулу для маси  $m$ , дістаємо, що електрохімічний

еквівалент  $k = \frac{m}{q} = \frac{NM}{N_A} \cdot \frac{1}{Nen} = \frac{M}{N_A en}$ .

Здобута формула має велику теоретичну й практичну цінність.

Теоретична цінність полягає в тому, що саме за допомогою цієї формули було виміряно значення елементарного електричного заряду  $e$ . Практична ж цінність цієї формули полягає в тому, що вона дає змогу визначити, який заряд має пройти через електроліт, щоб виділилася задана маса речовини. При цьому часто використовують формулу  $q = It$ , де  $I$  — сила струму,  $t$  — час проходження струму. Звідси дістаємо  $m = kIt$ .

## 3. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

### ПОКРИТТЯ ШАРОМ МЕТАЛУ

Щоб захистити металеві вироби від корозії або додати їм привабливішого вигляду, їх часто покривають тонким шаром іншого, дорожчого металу — нікелю, хрому, срібла, золота. Ці процеси називають відповідно нікелюванням, хромуванням тощо і виконують за допомогою електролізу.

<sup>1</sup> Для визначеності ми будемо говорити про заряд, перенесений позитивними іонами. Негативні іони переносять такий самий за модулем заряд. Щоб уникнути непорозумінь, зазначимо, що заряди, перенесені позитивними й негативними іонами, не можна складати для визначення заряду, який пройшов через електроліт: цей заряд дорівнює заряду, перенесеному іонами будь-якого *одного* типу, тому що різнойменні іони утворюються внаслідок дисоціації нейтральної молекули (див. рис. 29.3).

Металевий виріб при цьому служить катодом, а електролітом є сіль того металу, яким треба покрити цей виріб (нікелю, хрому тощо). Анодом служить пластинка також із цього металу. У результаті електролізу атоми цього металу осаджуються на катоді, покриваючи його рівномірним тонким шаром.

За допомогою того самого методу можна одержувати й точні копії рельєфу якого-небудь тіла, що складається з діелектрика (наприклад, гіпсової або воскової статуетки). Із цією метою тіло покривають графітом (який є провідником) і використовують як катод. Коли на поверхні тіла внаслідок електролізу «наросте» досить товстий шар металу (наприклад, міді), його обережно відшаровують від цієї поверхні. У результаті виходить точна металева копія поверхні.

### ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

Електроліз використовують також для очищення металів від домішок і навіть для одержання металів з руди.

Наприклад, здобуту з руди неочищену мідь використовують як анод, що поступово розчиняється в процесі електролізу. Електролітом є мідний купорос, а як катод використовують пластинку із чистої міді. На цю пластинку внаслідок електролізу й осаджуються атоми міді.

Найважливішим практичним застосуванням електролізу є одержання алюмінію. Його здобувають унаслідок електролізу розплаву бокситів — алюмінієвих руд. Саме цей спосіб промислового одержання алюмінію зробив його дешевим і тому найпоширенішим у техніці й у побуті: від літаків до каструль.



### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Якою є природа носіїв заряду в електролітах?
2. Що таке електролітична дисоціація?
3. Опишіть механізм утворення іонів в електролітах.
4. Що таке ступінь дисоціації?
5. Яким є знак заряду катіонів? До якого електрода вони рухаються?
6. Чи однаковому напрямку струму відповідає рух катіонів і аніонів?
7. Як залежить опір електролітів від температури?
8. Що таке електроліз? Сформулюйте закон електролізу.
9. Які вам відомі застосування електролізу?

## § 30. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ

1. Несамостійний розряд у газах
2. Самостійний розряд у газах
3. Плазма

*За певних умов гази можуть проводити електричний струм. Ми розповімо тут про різні види газових розрядів.*

### 1. НЕСАМОСТІЙНИЙ РОЗРЯД У ГАЗАХ

За звичайних умов (за не дуже високих температур та не дуже сильних електричних полях) гази не проводять електричний струм, тобто є діелектриками. Це означає, що в них відсутні носії заряду. Зокрема, хорошим діелектриком є навколишнє повітря.

Однак носії заряду можна **створити** в газі, і тоді він стане проводити електричний струм.

#### Проведемо дослід

З'єднаємо заряджений демонстраційний плоский конденсатор з електрометром (див. рис. 30.1а). Ми помітимо, що заряд конденсатора впродовж тривалого часу залишається практично незмінним. Це означає, що за кімнатної температури повітря є діелектриком.

Унесемо тепер у простір між пластинами конденсатора полум'я (див. рис. 30.1б). Конденсатор почне розряджатися. Виходить, нагріте повітря проводить електричний струм, тобто в ньому є носії заряду.

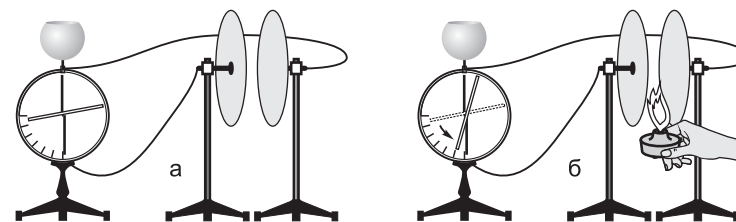


Рис. 30.1. а) Повітря за кімнатної температури є діелектриком; б) унаслідок досить сильного нагрівання повітря стає провідником.

## ІОНІЗАЦІЯ ГАЗІВ

В описаному вище досліді полум'я нагріває повітря, унаслідок чого молекули, які входять до його складу, починають рухатися настільки швидко, що під час зіткнень деякі з них «розбиваються», перетворюючись на **позитивно заряджені іони й електрони**. У разі зіткнень електронів з нейтральними атомами можуть утворюватися також і **негативні іони**.

Появу в газі іонів називають **іонізацією газу**.

Іонізований газ є провідником: носіями заряду в ньому є позитивні й негативні іони, а також електрони.

Іонізувати газ можна не тільки за допомогою нагрівання: нейтральні атоми й молекули газу можуть перетворюватися на іони також **під впливом ультрафіолетового, рентгенівського або радіоактивного проміння**.

Чинники, які викликають іонізацію газу, називають **іонізаторами**.

Якщо струм у газі йде тільки в присутності іонізатора, процес проходження струму крізь газ називають **несамостійним газовим розрядом**. Саме таким й є газовий розряд у розглянутому вище досліді: якщо усунути полум'я з ділянки між пластинами конденсатора, конденсатор перестане розряджатися.

## 2. САМОСТІЙНИЙ РОЗРЯД У ГАЗАХ

Виявляється, за певних умов струм у газах може текти й без зовнішнього іонізатора. У такому випадку процес проходження струму через газ називають **самостійним газовим розрядом**. Для «підпалювання» такого розряду спочатку може знадобитися зовнішній іонізатор, але потім його можна усунути, і газовий розряд не припиниться.

### Проведемо дослід

Для дослідження газових розрядів часто використовують скляну трубку з двома електродами. Газ у трубці та його тиск можна змінювати. Крім того, можна змінювати також напругу між електродами. Схему установки зображено на рис. 30.2.

Якщо газ у трубці зазнає впливу зовнішнього іонізатора, він проводить електричний струм, причому за невеликої напруги залежність сили струму від напруги є приблизно лінійною — як для металів та електролітів (рис. 30.3а). Спричинено це тим, що внаслідок збільшення напруги частка утворених іонізатором заряджених частинок, які досягли електродів, збільшується.

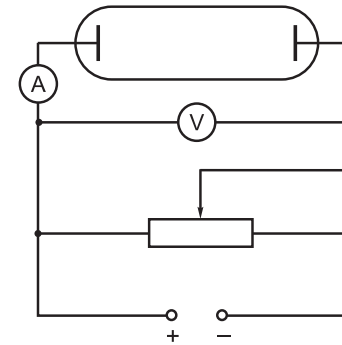


Рис. 30.2. Схема установки для вивчення газових розрядів.

Однак після досягнення певної напруги сила струму перестає зростати. Це зумовлено тим, що тепер **усі** утворені щомиті заряджені частинки досягають електродів. Сталу силу струму називають «струмом насичення».

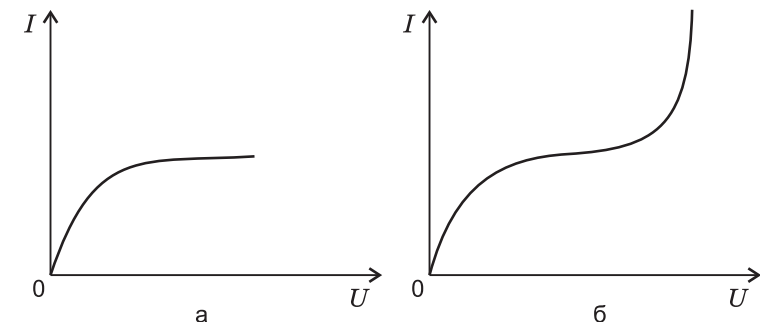


Рис. 30.3. Залежність струму від напруги: а) для несамостійного розряду; б) у разі виникнення самостійного розряду.

Якщо, проте, продовжувати збільшувати напругу, ми виявимо нове явище. За досить високої напруги сила струму починає різко зростати й може в тисячі разів перевищити струм насичення (рис. 30.3б). Зовнішній іонізатор тепер не потрібен: газовий розряд може тривати й без нього, тобто він став **самостійним газовим розрядом**. Яка ж причина появи носіїв заряду в цьому випадку?

## ІОНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ

Електричне поле діє на електрони та іони, розташовані в газі, і розганяє їх. Однак цьому розгону перешкоджають зіткнення заряджених частинок з нейтральними атомами або молекулами. Під час таких зіткнень заряджені частинки передають частину своєї кінетичної енергії атомам або молекулам.

Якщо напруженість поля достатньо велика, заряджена частинка може між зіткненнями розігнатися до такої енергії, що внаслідок її зіткнення з атомом або молекулою відбувається іонізація. Дослід і розрахунки свідчать, що головну роль у такій «ударній» іонізації відіграють електрони. Тому її називають **іонізацією електронним ударом**.

Унаслідок такої іонізації з'являються нові заряджені частинки — позитивні іони й електрони. Електрони, що з'явилися, також «включаються у гру», розганяючись та іонізуючи нові атоми або молекули, що, у свою чергу, знову спричинює збільшення кількості електронів у газі. У результаті кількість заряджених частинок різко зростає — настільки різко, що це явище дістало назву **електронної лавини**. Саме цим і зумовлено значне зростання сили струму.

## РІЗНІ ТИПИ САМОСТІЙНОГО РОЗРЯДУ

### Жеврійний розряд

Якщо зменшити тиск газу, відстань, яку пролітають електрони між послідовними зіткненнями, збільшується. Тому електрони встигають «набрати» енергію, достатню для іонізації, за значно меншої напруженості поля. Такий розряд, який відбувається за низького тиску (частки міліметра ртутного стовпчика, тобто в тисячі разів менше атмосферного тиску), називають **жеврійним розрядом**. Для його «запалювання» досить напруги в сотні вольтів.

Жеврійний розряд використовують у трубках для реклами. Наприклад, у заповненій неонам трубці виникає світіння червоного кольору, а у заповненій аргонном — синювато-зеленого.

### Коронний розряд

У грозову або передгрозову погоду поблизу загострених металевих предметів виникає своєрідне світіння, яке нагадує корону. Це вияв газового розряду, названого із зазначеної причини **коронним розрядом**. У давнину світіння, зумовлене коронним розрядом, називали «вогнями святого Ельма». Такі «вогні» на щоглі корабля зображено на заставці до цього розділу. Яка ж їхня природа?

Річ у тім, що коли напруженість поля досягає  $3 \cdot 10^6$  В/м, виникає «пробій повітря», тобто народжуються електронні лавини: за такої напруженості іонізація електронним ударом відбувається вже за атмосферного тиску. Саме така велика напруженість поля й виникає поблизу загострених металевих предметів у грозу або перед грозою. Однак у міру віддалення від вістря напруженість поля швидко спадає, тому вдалині від вістря електронної лавини не виникає.

Іскровий розряд використовують в **електрофільтрах** для очищення повітря. Під дією коронного розряду повітря іонізується. Іони, зіштовхуючись із частинками диму, заряджають їх, після чого заряджені частинки притягуються до електродів й осідають на них.

### Іскровий розряд

Якщо напруженість електричного поля досягає зазначеного вище значення ( $3 \cdot 10^6$  В/м) у великій ділянці простору, виникають яскраво світні зигзагоподібні нитки, які являють собою канали іонізованого повітря, нагрітого до дуже високої температури. У невеликих масштабах — це добре знайомі іскри (таку іскру можна помітити навіть, увімкнувши або вимкнувши звичайний вимикач), а в гігантських масштабах — блискавки.

Особливістю іскрового розряду є його переривчастість. Спричинена вона тим, що сила струму в такому розряді настільки велика, що внаслідок розряду різниця потенціалів між зарядженими тілами різко зменшується, що й зумовлює припинення розряду.

### Дуговий розряд

Якщо привести до зіткнення вугільні електроди, до яких прикладено напругу в кілька десятків вольтів, у колі виникне великий струм. При цьому в місці контакту електродів (де опір максимальний) електроди розжарюються настільки, що з катода (негативно зарядженого електрода) починають вилітати електрони. Це явище називають **термоелектронною емісією**<sup>1</sup>.

Унаслідок термоелектронної емісії струм не припиняється й після розсування електродів: виникає самостійний розряд, який називають **дуговим розрядом**. Така назва зумовлена тим, що за горизонтального розташування електродів між ними виникає дуже яскрава дуга, вигнута нагору (рис. 30.5). Температура в каналі дугового розряду сягає  $6000$  °С (це температура на поверхні Сонця).

На аноді (позитивному електроді) унаслідок бомбардування його швидкими електронами утворюється поглиблення — кратер.

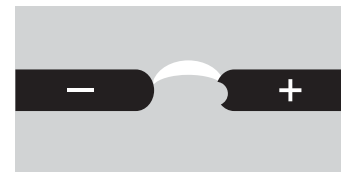


Рис. 30.5. Електрична дуга.

<sup>1</sup> Від латинського «emissio» — випущення, випромінювання.

Дуговий розряд використовують для електрозварювання металів. Великий внесок у розроблення методів електрозварювання зробили українські вчені під керівництвом академіка Євгена Оскаровича Патона — організатора і першого директора Інституту електрозварювання в Києві. Ім'ям Патона названо суцільнозварений міст через Дніпро в Києві.

Дуговий розряд використовують також у прожекторах, проєкційних апаратах і на маяках. У металургії широко застосовують дугові електропечі, джерелом теплоти в яких є дуговий розряд. У таких печах виплавляють сталь, чавун, бронзу та інші метали.

### 3. ПЛАЗМА

Частково або повністю іонізований газ називають *плазмою*.

Зокрема, таким стає будь-який газ за температури в кілька тисяч градусів: середня енергія атомів і молекул стає настільки великою, що внаслідок зіткнень у газі виникає велика кількість електронів та іонів. За температури ж у мільйони градусів газ стає повністю іонізованим — у такому стані перебуває речовина в Сонці й зірках. Таку плазму називають *високотемпературною* плазмою.

Однак існує й *низькотемпературна* плазма: наприклад, земна куля оточена провідним шаром розрідженого повітря завтовшки кілька десятків кілометрів, що містить багато іонів, тому цей шар називають іоносферою. Тільки завдяки іоносфері радіохвилі можуть обгинати Землю (докладніше про це буде розказано в курсі фізики 11-го класу). Заряджені частинки, що входять до складу космічних променів, які наближаються до Землі, відхиляються магнітним полем Землі до її полюсів і, потрапляючи в іоносферу, викликають полярні сяйва.

Унаслідок наявності великої кількості носіїв заряду *плазма є провідником*.

Властивості плазми настільки істотно відрізняються від уже знайомих вам газів, рідин і твердих тіл, що її називають *четвертим станом речовини*. На Землі цей стан є порівняно рідкісним: зазвичай ми можемо спостерігати плазму у вигляді блискавки та полум'я. Однак у масштабі Всесвіту й навіть Сонячної системи саме плазма є найпоширенішим станом речовини: наприклад, Сонце, маса якого становить більше ніж 99 % маси всієї Сонячної системи, складається цілком із плазми. Із плазми складаються й інші зірки, а також деякі міжзоряні хмари.

#### ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМИ

Як ми бачили, у всіх типах газових розрядів електричний струм зумовлений наявністю в газах носіїв заряду — іонів та електронів, тобто тим, що ці гази являють собою плазму.

Про деякі застосування плазми ми вже розповідали — наприклад, у *джерелах світла*, де відбувається жеврійний розряд, міститься іонізований газ, який являє собою низькотемпературну плазму. У лампах денного світла також міститься плазма. Але, дивлячись на таку лампу, ми спостерігаємо світіння не плазми, а спеціальної речовини — люмінофора, яким покриті стінки лампи і який світиться під дією проміння плазми. Склад люмінофора можна змінювати — при цьому змінюється колір лампи (від жовтуватого до блакитнуватого). Для ока найкомfortнішим є світіння, колір якого близький до білого сонячного світла. Головною перевагою ламп денного світла є їхня економічність: завдяки їм для одержання тієї ж освітленості потрібно в 3–4 рази менше електроенергії, ніж у разі використання ламп розжарення.

Плазму використовують також у дуже перспективних джерелах електроенергії — так званих *магнітогідродинамічних генераторах* (МГД-генератори). Струмів гарячої плазми пропускають крізь сильне магнітне поле, магнітна індукція якого перпендикулярна до швидкості плазмового струменя. Під дією сили Лоренца заряджені частинки плазми різних знаків відхиляються в протилежні боки й потрапляють на різні електроди, між якими таким чином виникає різниця потенціалів. У МГД-генераторах відбувається пряме перетворення механічної енергії на електричну: кінетична енергія плазмового струменя перетворюється на електроенергію. Тому ККД таких генераторів досить високий.

Високотемпературну плазму використовують в установках для *керуваного термоядерного синтезу*. Ці установки є поки експериментальними, але саме з ними вчені пов'язують головні сподівання на одержання практично невичерпного джерела енергії.



#### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке несамостійний газовий розряд? Чим він відрізняється від самостійного?
2. Які чинники можуть викликати іонізацію газу?
3. Що таке струм насичення? Чим зумовлене його існування?
4. Опишіть механізм іонізації електронним ударом.
5. Що таке електронна лавина? Яка причина її появи?
6. Які ви знаєте типи самостійних газових розрядів?
7. Опишіть відомі вам приклади застосування самостійних газових розрядів.
8. Що таке плазма? Наскільки вона поширена в природі?
9. Які вам відомі приклади застосування плазми?

## § 31. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ

1. Електронна емісія
2. Двоелектродна лампа
3. Електронно-променева трубка

Електричний струм у вакуумі являє собою потік електронів.

Ми розповімо про використання таких електронних пучків у діодах, що мають нову властивість — *однобічну провідність*, а також в електронно-променевій трубці — основному елементі телевізора й дисплея комп'ютера.

### 1. ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ

Вакуумом у техніці називають настільки розріджений газ, що молекули в ньому пролітають від однієї стінки посудини до іншої практично без зіткнень одна з одною. Сучасні технічні засоби надають змогу створювати такий вакуум.

Аби у вакуумі існував електричний струм, необхідно, щоб у ньому були носії заряду. Їхню роль виконують *електрони*, що їх випускають з поверхні електродів. Це явище називають *електронною емісією*.

Відомо кілька способів «змусити» електрони покинути провідник. Ми розглянемо тут електронну емісію, зумовлену нагріванням провідника.

#### Термоелектронна емісія

Якщо нагріти провідник до досить високої температури (тисячі кельвінів), електрони в провіднику набувають енергії, достатньої для того, щоб перебороти притягання позитивних іонів кристалічної ґратки і покинути провідник. Це явище називають *термоелектронною емісією*. Ми вже познайомилися з ним у попередньому параграфі, коли розглядали дуговий розряд.

### 2. ДВОХЕЛЕКТРОДНА ЛАМПА (ДІОД)

Вакуумну трубку з двома електродами називають *двоелектродною лампою*, або *діодом*.

Якщо нагріти *один* із двох електродів діода, навколо нагрітого електрода внаслідок термоелектронної емісії виникне електронна «хмарка». Навколо ж холодного електрода електронної хмарки не буде (рис. 31.1).

Як ми зараз побачимо, завдяки цьому електричний струм крізь діод може текти *тільки в одному напрямі* (зазначимо, що таку чудову властивість не має жоден з розглянутих вище провідників — ані метали, ані електроліти, ані гази в іонізованому стані).

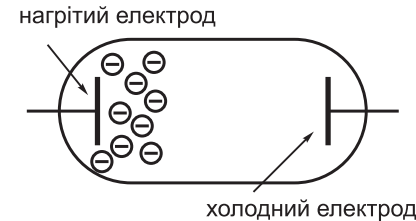


Рис. 31.1. Електронна хмарка навколо нагрітого електрода зумовлена термоелектронною емісією.

Приєднаємо нагрітий електрод до негативного полюса джерела струму, а холодний — до позитивного. Тоді нагрітий електрод відштовхуватиме електрони з електронної хмарки, що його оточує, а холодний — притягуватиме їх. Тому електрони рухатимуться від гарячого електрода до холодного. Проте хмарка, яка оточує гарячий електрод, не зникне: замість електронів, що полетять, з «негативного» гарячого електрода будуть вириватися дедалі нові й нові (рис. 31.2). У результаті крізь діод потече струм<sup>1</sup>.

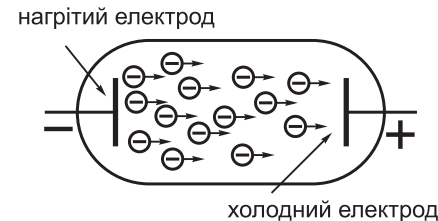


Рис. 31.2. У разі такого приєднання електродів струм крізь діод тече.

Перемкнемо тепер полюси джерела струму: приєднаємо нагрітий електрод до позитивного полюса, а холодний — до негативного. Тепер нагрітий електрод притягуватиме електрони з хмарки, що його оточує, не даючи їм змоги летіти до холодного електрода (рис. 31.3). Отже, струму в цьому випадку не буде.

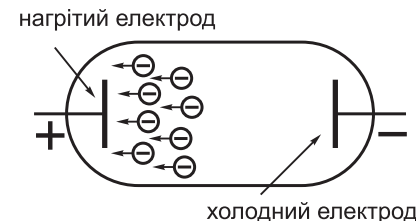


Рис. 31.3. У разі такого приєднання електродів струм крізь діод не тече.

<sup>1</sup> Нагадаємо, що напрям струму *протилежний до* напрям руху електронів, тому що за напрям струму умовно взято напрям руху позитивно заряджених частинок, а електрони заряджені негативно.

Отже, струм через діод може протікати тільки в одному напрямі: коли нагрітий електрод є негативним електродом, а холодний — позитивним.

Завдяки однобічній провідності діоди використовують для перетворення струму, напрям якого періодично змінюється<sup>1</sup>, на струм постійного напрямку. Це потрібно для живлення різних приладів, зарядних пристроїв тощо. Останнім часом, щоправда, для цього частіше застосовують напівпровідникові діоди, будову яких ми розглянемо в наступному параграфі.

Часто катод та анод діода мають форму порожніх циліндрів. На рис. 31.4а зображено будову одного з численних типів діодів, а на рис. 31.4б — позначення діода на електричних схемах.

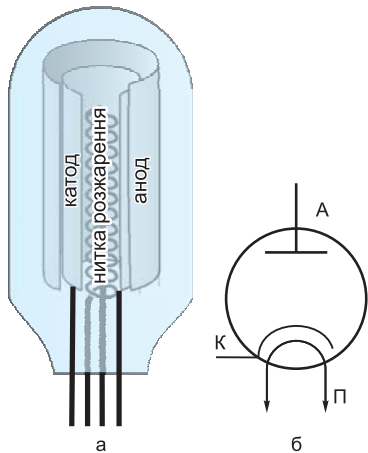


Рис. 31.4. Двохелектродна лампа (діод): А — анод, К — катод, П (від слова «підігрів») — нитка розжарення.

### 3. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ТРУБКА

У кожній квартирі сьогодні є телевизор. Ми настільки звикли до зображення, яке рухається на екрані, що навіть не замислюємось про те, як його створюють. Але ж це просто чудо техніки! «Рух» зображення виникає внаслідок швидкої зміни кадрів (кілька десятків кадрів за секунду), причому кожен кадр рядком за рядком старанно й безпомилково «малює» невтомний і спритний крихітний «трудівник» — **електронний промінь**, який являє собою дуже вузький пучок електронів.

За соті частки секунди електронний промінь устигає обігати весь екран, покриваючи його рядком за рядком світними точками.

<sup>1</sup> Саме такий «змінний струм» підводять у квартири й у виробничі приміщення; докладніше з його властивостями ви познайомитеся в курсі фізики 11-го класу.

На всьому екрані цих точок у сотні разів більше, ніж зірок на небі, які можна побачити неозброєним оком! Намалювавши черговий кадр, електронний промінь без перепочинку починає новий «біг», малюючи наступний кадр. І помітьте: це чудо техніки роками безперерійно «працює» не в якихось особливих лабораторних умовах, а в побутовій техніці, що стала вже звичною.

Залишимо поки осторонь якість того, що електронному променю часом доводиться малювати, і розглянемо, як побудовано **електронно-променевою трубкою**, яка дає змогу створювати електронний промінь і надзвичайно тонко й точно керувати його рухом.

Електронно-променева трубка (у телевизорі її називають **кінескопом**) являє собою вакуумний балон, одна стінка якого є екраном (рис. 31.5). У вузькій частині трубки міститься нагрітий катод, з якого внаслідок термоелектронної емісії вилітають електрони. Ці електрони розганяються завдяки притяганню до анода. Він має форму порожнього циліндра, тому більшість електронів за інерцією пролітають крізь анод і летять до екрана. Різниця потенціалів між анодом і катодом становить до тисячі вольтів (іноді навіть більше), у результаті чого електрони розганяються до швидкостей у десятки тисяч кілометрів за секунду. Форму й потенціал анода ретельно підбирають так, щоб пучок електронів, який пролетів крізь анод, мав малий поперечний переріз. Із цією метою часто використовують кілька анодів.

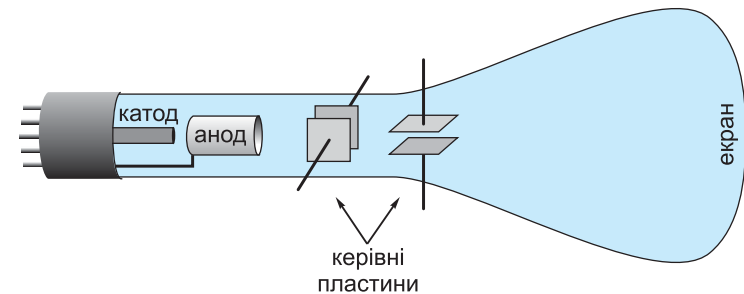


Рис. 31.5. Схематична будова електронно-променевої трубки.

Потрапивши на екран, електронний промінь залишає на ньому світну точку, оскільки екран зсередини покрито спеціальною речовиною, яка світиться внаслідок бомбардування електронами (такі речовини називають **люмінофорами**).



Щоб світна точка «рухалася» по екрану, рухом електронного променя треба керувати. Це керування можна здійснювати за допомогою двох пар пластин, на які подають змінну напругу. Пролітаючи між пластинами, електрони зазнають дії електричного поля й відхиляються від прямолінійного руху (рис 31.6а). Одна пара керівних пластин відхиляє промінь у горизонтальному напрямі, а друга — у вертикальному, завдяки чому можна направити промінь у довільну точку екрана.

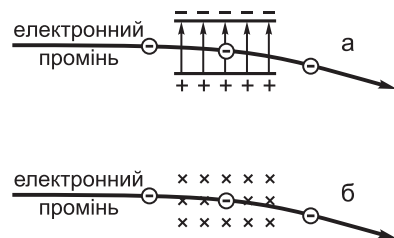


Рис. 31.6. Відхилення електронного променя: а) електричним полем; б) магнітним полем.

Керувати променем можна також за допомогою магнітного поля, наприклад, коли вектор магнітної індукції напрямлений перпендикулярно до швидкості електронів (рис. 31.6б). Керування електронним променем за допомогою магнітного поля дає змогу відхиляти промінь на більший кут, завдяки чому за тих самих розмірів екрана кінескоп стає коротшим.

На жаль, навіть великі винаходи вчених не завжди приносять людству лише користь. Перша радість від винаходу телевізора змінилася сьогодні тривогою, оскільки виявилось, що телевізор є не лише «вікном у світ». Телебачення часто паралізує життєву активність людей, особливо дітей. Пасивне сприйняття «миготливої» інформації з екрана телевізора призводить до того, що завзяті телеглядачі не стільки живуть самі, скільки стежать за уявним «життям» інших, яке часто має мало спільного зі справжнім, набагато цікавішим життям — цікавішим тому, що ти в ньому береш участь **сам**.

Електронно-променевою трубкою використовують також у дисплеях **комп'ютерів** і в **осцилографах** — приладах для досліджування швидкозмінних процесів у багатьох галузях науки. Наприклад, осцилограф може намалювати розгорнуту в часі «картину» серцевого ритму, що дає змогу досліджувати роботу серця, або «картину» звукових коливань у процесі співання, завдяки чому вдалося розгадати деякі секрети голосів видатних співаків.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що називають вакуумом у техніці?
2. Якою є природа електричного струму у вакуумі?
3. Що таке термоелектронна емісія?
4. Якою є основна властивість двохелектродної лампи (діода)? Чим вона зумовлена?
5. Опишіть будову електронно-променевої трубки.
6. Наведіть приклади застосування електронно-променевої трубки.
7. Як можна керувати електронним променем в електронно-променевої трубки?
8. Дайте чесну відповідь самі собі: допомагає або заважає вам телевізор у житті? Чи вмієте ви користуватися ним розумно?

## § 32. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

1. Значення напівпровідників
2. Будова напівпровідників
3. Домішкова провідність напівпровідників

*Вивчення електричного струму в напівпровідниках проторувало шлях до відкриттів, які дістали надзвичайно широке застосування в техніці й побуті.*

*У цьому параграфі ми розповімо про будову напівпровідників і про природу носіїв заряду в них.*

### 1. ЗНАЧЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Найцікавіші властивості електропровідності мають **напівпровідники**. Так називають речовини, які мають «проміжну» електропровідність: їхній питомий опір у багато разів менший, ніж у діелектриків, але в багато разів більший, ніж у металів.

Напівпровідники не є «екзотикою»: до них, наприклад, належать сполуки хімічного елемента **Силіцію**<sup>1</sup> (Si), на який припадає понад чверть маси земної кори. Також широко застосовують як напівпровідники сполуки хімічного елемента **Германію** (Ge), але він набагато менше поширений в природі.

Головна особливість напівпровідників — **висока чутливість до зовнішніх впливів** (зміни температури, освітленості, електричного поля) і **наявності домішок**. У середині 20-го століття вченим спало на думку, що завдяки цьому можна створювати мініатюрні **складні прилади з автоматизованим керуванням**. І тоді машини й прилади почали «розумнішати» буквально на очах. Наприклад, швидкодія комп'ютерів приблизно за піввіку їхнього існування збільшилася в **мільйони** разів. Якби за цей проміжок часу швидкість автомобілів збільшилася б також у мільйони разів, вони мчали б сьогодні зі швидкістю, що наближається до швидкості світла!

Якщо б однієї (далеко не прекрасної!) миті напівпровідники «відмовилися від роботи», відразу згасли б екрани комп'ютерів і телевізорів, замовкли б мобільні телефони, а штучні супутники втратили б керування. Зупинилися б тисячі вироб-

<sup>1</sup> Цей хімічний елемент раніше мав назву «кремній».

ництв, зазнали б аварії літаки й кораблі, а також мільйони автомобілів. Багато міст поринули б у темряву. Тобто настала б всесвітня катастрофа.

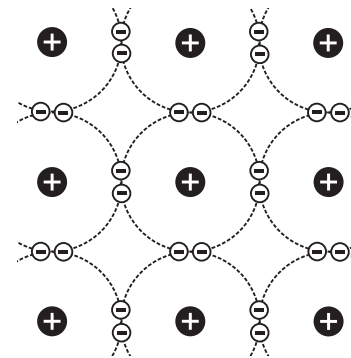
### 2. БУДОВА НАПІВПРОВІДНИКІВ

Які ж особливості будови напівпровідників наділяють їх тими чудовими властивостями, на яких «тримається» сучасна цивілізація?

#### ЕЛЕКТРОННА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

У напівпровідниках валентні електрони «належать» не одному атому (як у діелектрику), але й не всім атомам зразка (як у металі), а **двом** сусіднім атомам.

Наприклад, у кристалі силіцію кожен атом Силіцію має чотирьох сусідів, і в кожній парі атомів-сусідів є два «спільних» електрони. Схематично будову такого кристала зображено на рис. 32.1.



*Рис. 32.1. Схематичне зображення будови кристала силіцію. Кожен атом Силіцію має два спільних електрони з кожним із чотирьох сусідів. На рисунку зображено тільки валентні електрони.*

Зв'язок електронів з атомами в напівпровідниках набагато слабкіший, ніж у діелектриках. Тому вже за кімнатної температури «теплова» енергія деяких валентних електронів достатня для того, щоб вони залишили свою пару атомів, ставши **електронами провідності**. Так у напівпровіднику виникають **негативні носії заряду**. Провідність напівпровідника, зумовлену електронами провідності, називають **електронною**.

#### ДІРКОВА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Коли валентний електрон «виривається з обіймів» атомів-сусідів, стаючи електроном провідності, він не тільки сам здобуває волю, але ще й «звільняє місце» для своїх колишніх сусідів-електронів, надаючи їм деякої свободи пересування (рис. 32.2).

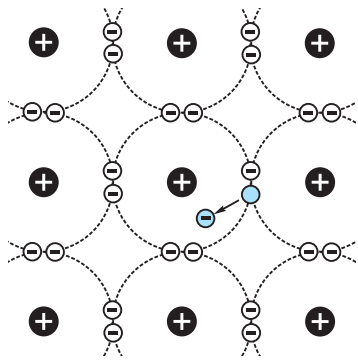


Рис. 32.2. Народження електрона провідності супроводжується появою дірки (електрон провідності й дірка виділені кольором).

Звільнене місце, яке назвали «*діркою*», може зайняти який-небудь із сусідніх валентних електронів. Дірка при цьому опиниться на новому місці, куди, у свою чергу, може перейти наступний валентний електрон. А дірка при цьому знову переміститься. Отже, «естафетне» переміщення валентних електронів є, власне кажучи, *переміщенням дірок*.

Переміщення ж дірок слід розглядати як рух *позитивних* носіїв заряду, тому що кожна дірка — це нестача негативного заряду або, що те саме, надлишок позитивного заряду. Провідність напівпровідника, зумовлену дірками, називають *дірковою*.

За відсутності зовнішнього електричного поля електрони провідності та дірки рухаються хаотично, і тому струму немає. Але під дією електричного поля електрони провідності почнуть переважно рухатися в один бік, а дірки — у протилежний. При цьому *напряж струму*, зумовлений протилежним рухом носіїв заряду різних знаків, буде *тим самим* (порівняйте з рухом іонів різних знаків в електроліті, див. § 30. *Електричний струм в електролітах*).

Електрон провідності може, віддавши частину своєї енергії кристалічній ґратці, зайняти якесь із вільних місць, знищивши при цьому «дірку». Таке «взаємознищення» електрона провідності та дірки називають *рекомбінацією* (нагадаємо, що так само називають об'єднання різнойменно заряджених іонів в електроліті, унаслідок якого утворюється нейтральна молекула).

Якщо розглядуваний напівпровідник не містить домішок, у ньому буде рівна кількість електронів провідності й дірок, оскільки поява кожного електрона провідності супроводжується появою дірки. «Зникають», тобто рекомбінують, електрон провідності та дірка теж разом. Провідність, зумовлену електронами провідності та дірками, називають *власною провідністю* напівпровідника.

## Аналогія

Струм у напівпровіднику, зумовлений рухом електронів провідності й дірок, можна наочно уявити собі за допомогою такої аналогії. Уявіть собі цілком заповнений зал очікування на вокзалі — вільних крісел немає. З вікна сильно дме (протяг відіграє роль зовнішнього поля). Поки всі крісла зайняті, пересісти подалі від вікна нікуди. Але невдовзі деякі пасажирів не витримають, залишать свої крісла й підуть проходами, *віддаляючись* від вікна. Це і є «електрони провідності». Звільнені крісла можна розглядати як «дірки». Ці крісла займають пасажирів-сусіди, пересаджуючись, по можливості, *далі* від вікна. Збоку цей «рух сидячих пасажирів» буде виглядати так, ніби вільні місця, тобто «дірки», переміщуються *ближче* до вікна, тобто в напрямі, протилежному напрямку руху пасажирів-«електронів».

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ОПОРУ НАПІВПРОВІДНИКІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ТА ОСВІТЛЕНОСТІ

Кількість електронів провідності та дірок значною мірою залежить від температури та освітленості напівпровідника.

За низької температури кількість валентних електронів, які мають енергію, достатню для того, щоб стати електронами провідності, дуже мало. Відповідно малою є й кількість дірок. Тому за досить низької температури напівпровідник практично не проводить електричний струм.

Однак із підвищенням температури кількість електронів, які мають енергію, достатню для того, щоб залишити свої атоми й стати електронами провідності, швидко збільшується. Збільшується відповідно і кількість дірок. Це збільшення кількості носіїв заряду призводить до того, що *з підвищенням температури опір напівпровідників швидко зменшується*.

На рис. 32.3 наведено як приклад графік залежності питомого опору напівпровідника від температури. Порівняйте його з рис. 28.2, на якому зображено графік залежності опору металу від температури.

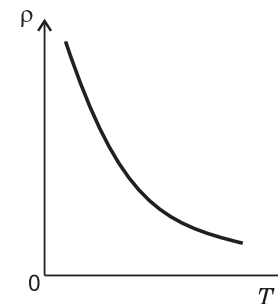


Рис. 32.3. Залежність питомого опору напівпровідника від температури. Питомий опір різко зменшується з підвищенням температури.

Валентні електрони в напівпровідниках можуть «здобути свободу», ставши електронами провідності, не тільки внаслідок підвищення температури, але й під дією світла. Тому збільшення освітленості зменшує опір напівпровідника.

### Терморезистори (термістори)

Сильну залежність опору напівпровідників від температури використовують для створення датчиків температури, які називають терморезисторами або, скорочено, **термісторами**. За їхньою допомогою температуру можна не тільки вимірювати, але й регулювати.

Термістори мають мініатюрні розміри: так, є термістори розміром у тисячні частки міліметра. Діапазон же «дії» термісторів — від одного кельвіна до майже двох тисяч кельвінів!

Термістори використовують для створення різних типів сигналізації (наприклад, протипожежної), вимірювання температури в медицині, дистанційного спостереження за різними технологічними процесами.

### Фоторезистори

Залежність опору напівпровідників від освітленості використовують для створення **фоторезисторів**.

Фоторезистори застосовують, наприклад, в автоматизованих системах охорони, у пристроях, які захищають від травм на виробництві (коли рука робітника опиняється в небезпечній зоні, автоматика вимикає верстат), у турнікетах метро.

## 3. ДОМІШКОВА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Співвідношення між кількістю електронів провідності та кількістю дірок можна **змінювати**, уводячи в напівпровідник невеликі кількості різних **домішок** (наприклад, у процесі вирощування кристала напівпровідника з розплаву).

### ДОНОРНІ ДОМІШКИ

Додамо в кристал, який складається з чотиривалентних атомів Силіцію (Si), деяку кількість п'ятивалентних атомів Арсену<sup>1</sup> (As). Зайнявши в кристалічній ґратці місце одного з атомів кремнію, атом Арсену «колективізує» чотири з п'яти своїх валентних електронів із чотирма сусідами-атомами Силіцію. Однак його п'ятий валентний електрон виявиться «зайвим» і не зможе взяти

<sup>1</sup> Цей хімічний елемент раніше мав назву «миш'як».

участь в утворенні міжатомних зв'язків. Тому він стане електронном провідності (рис. 32.4).

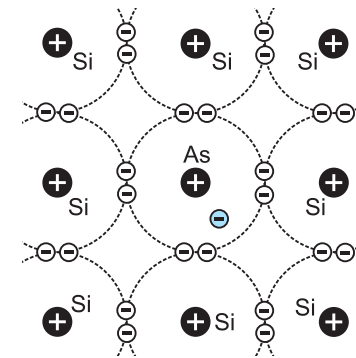


Рис. 32.4. Поява електрона провідності в разі додавання п'ятивалентного атома Арсену в кристал силіцію.

Отже, кожний упроваджений атом Арсену збільшить кількість електронів провідності на одиницю, і тому кількість електронів провідності стане більшою за кількість дірок. Зазвичай добирають таку концентрацію домішки, щоб концентрація електронів провідності була більша за концентрацію дірок у сотні й навіть тисячі разів.

Домішки, атоми яких легко віддають свої валентні електрони, називають **донорними**<sup>1</sup>. Як ми бачимо, додавання в напівпровідник донорної домішки робить його провідність переважно електронною. Напівпровідники, у яких основними носіями заряду є електрони провідності, називають напівпровідниками **n-типу**<sup>2</sup>.

### АКЦЕПТОРНІ ДОМІШКИ

Додамо тепер у кристал силіцію домішку, яка складається з атомів з **меншою**, ніж у Силіцію, валентністю — наприклад, із тривалентних атомів Алюмінію (Al). Коли атом Алюмінію посяде місце якогось із атомів Силіцію, чотири його сусіди «запропонують» йому чотири свої валентні електрони для «колективізації». Але в атома Алюмінію валентних електронів усього три. І для утворення стійких міжатомних зв'язків атом Алюмінію незабаром «позичить» один з валентних електронів в одного зі своїх сусідів, а той, у свою чергу, «перетягне» електрон з наступного атома і так далі. У результаті по всьому кристалу вже знайомим нам способом почне рухатися дірка (рис. 32.5).

<sup>1</sup> Від латинського «donor» — що дає.

<sup>2</sup> Від латинського «negativus» — негативний.

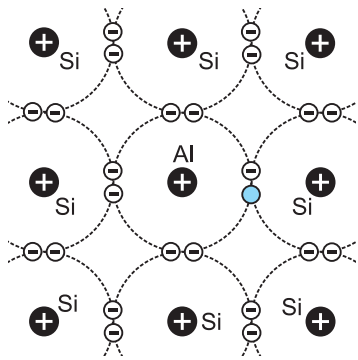


Рис. 32.5. Поява дірки в разі додавання тривалентного атома Алюмінію в кристал кремнію.

Отже, кожний атом Алюмінію збільшує кількість дірок на одиницю, і кількість дірок стає більшою за кількість електронів провідності. Концентрацію домішки добирають так, щоб основними носіями заряду стали дірки.

Домішки, які збільшують кількість дірок у напівпровіднику, називають **акцепторними**<sup>1</sup>. Додавання в напівпровідник акцепторної домішки робить його провідність переважно дірковою. Такі напівпровідники називають напівпровідниками *p-типу*<sup>2</sup>.

## ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. У чому полягає головна особливість напівпровідників, яка забезпечила їм таке широке застосування?
2. Як з'являються в напівпровіднику електрони провідності? За яких температур це відбувається?
3. Що таке діркова провідність напівпровідників? Якими носіями заряду є дірки - позитивними або негативними? Обґрунтуйте вашу відповідь.
4. Чи однакоому напрямку струму відповідає рух електронів провідності й дірок за наявності зовнішнього електричного поля? Обґрунтуйте вашу відповідь.
5. Що таке власна провідність напівпровідника?
6. Як залежить провідність напівпровідника від температури?
7. Що таке термістори й фоторезистори? Як їх використовують?
8. Що таке домішкова провідність напівпровідників? Чим відрізняється донорна домішка від акцепторної?

<sup>1</sup> Від латинського «acceptor» — що одержує.

<sup>2</sup> Від латинського «positivus» — позитивний.

## § 33. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

1. Напівпровідниковий діод
2. Транзистор
3. Інтегровані схеми

*Ми розповімо тут про напівпровідниковий діод і транзистор — найпростіші напівпровідникові прилади, які є елементами всіх складних напівпровідникових пристроїв.*

*Наприкінці параграфа буде розказано про інтегровані схеми — мініатюрні пластинки, на яких сьогодні вміщують до мільйона різних елементів — таких, як діоди і транзистори.*

### 1. НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДІОД

Як ви вже знаєте, існують напівпровідники з різними основними носіями заряду: у напівпровідниках *n-типу* основні носії заряду негативні (електрони провідності), а в напівпровідниках *p-типу* — позитивні (дірки).

Саме завдяки наявності цих двох типів напівпровідників й удалося створити за їх допомогою складні системи керування.

#### ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД

Щоб зрозуміти принцип роботи систем керування на основі напівпровідників, розглянемо спочатку, що відбувається на межі поділу напівпровідників *n*-типу й *p*-типу. Таку межу називають електронно-дірковим переходом (*n-p*-переходом)<sup>1</sup>.

Як ми доведемо нижче, провідність *n-p*-переходу є **однобічною**: через такий перехід електричний струм може текти тільки в **одному** напрямі — від напівпровідника *p*-типу до напівпровідника *n*-типу. На однобічній провідності *n-p*-переходу засновано роботу **напівпровідникового діода**. На відміну від вакуумного діода (див. § 29. *Електричний струм у вакуумі*), напівпровідниковий діод не потребує нагрівання катода, тобто є набагато економічнішим. Крім того, він є незрівнянно надійнішим і мініатюрнішим. Напівпровідникові діоди використо-

<sup>1</sup> Таку межу створюють звичайно, вирощуючи напівпровідникові кристали: одна його частина має донорну домішку, а друга — акцепторну.

вують для створення різних пристроїв випростовування струму змінного напругу.

### ЧОМУ ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД МАЄ ОДНОБІЧНУ ПРОВІДНІСТЬ?

Припустимо, що ліворуч від межі поділу міститься напівпровідник  $p$ -типу, а праворуч — напівпровідник  $n$ -типу, як зображено на рис. 33.1.

Унаслідок дифузії позитивно заряджені дірки частково проникають у напівпровідник  $n$ -типу, а негативно заряджені електрони — у напівпровідник  $p$ -типу. При цьому напівпровідник  $n$ -типу заряджається позитивно, а напівпровідник  $p$ -типу — негативно.

У результаті поблизу межі поділу напівпровідників виникає **електричне поле**  $\vec{E}_{\text{внутр}}$ , напруженість якого напрямлена від напівпровідника  $n$ -типу до напівпровідника  $p$ -типу (рис. 33.1). Це поле **перешкоджає** подальшій дифузії, оскільки сили, які діють з боку цього поля на дірки й електрони, напрямлені протилежно до напрямку руху цих носіїв заряду внаслідок дифузії.

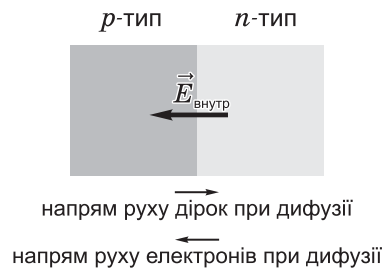


Рис. 33.1. Виникнення електричного поля на межі поділу напівпровідників  $n$ -типу й  $p$ -типу.

Проте дифузію можна «підштовхнути», якщо приєднати напівпровідник  $p$ -типу до позитивного полюса джерела струму, а напівпровідник  $n$ -типу — до негативного. При цьому сили, які діють на дірки та електрони з боку зовнішнього поля (зумовленого приєднанням до джерела струму), «допомагатимуть» їхньому проходженню через  $n$ - $p$ -перехід (рис. 33.2). Отже, у такий спосіб приєднання джерела струму **крізь  $n$ - $p$ -перехід потече електричний струм**. Цей спосіб приєднання називають **прямим**.

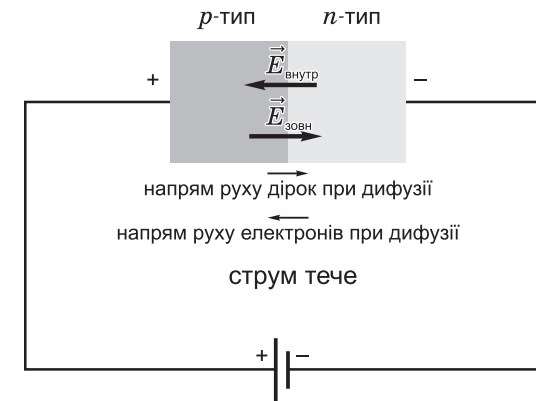


Рис. 33.2. За прямого приєднання  $n$ - $p$ -переходу крізь нього тече електричний струм, зумовлений дифузією електронів і дірок.

Змінимо тепер спосіб приєднання: приєднаємо  $p$ -напівпровідник до негативного полюса джерела струму, а  $n$ -напівпровідник — до позитивного полюса. Тепер зовнішнє поле посилюватиме внутрішнє поле, яке перешкоджає дифузії (рис. 33.3). Отже, **струм крізь  $n$ - $p$ -перехід не потече**. Такий спосіб приєднання називають **зворотним**.

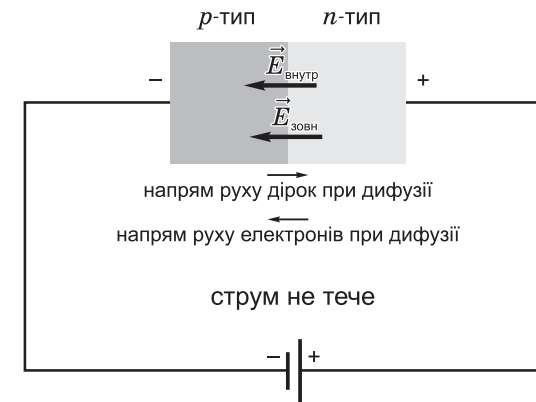


Рис. 33.3. За зворотного приєднання  $n$ - $p$ -переходу крізь нього не тече електричний струм.

Отже, ми бачимо, що  **$n$ - $p$ -перехід має односторонню провідність: через  $n$ - $p$ -перехід електричний струм може текти лише в одну напрямі** — від напівпровідника  $p$ -типу до напівпровідника  $n$ -типу.

## 2. ТРАНЗИСТОР

Найважливішим застосуванням напівпровідників став **транзистор** — пристрій, за допомогою якого можна **підсилювати електричні сигнали**. Саме транзистор є основним елементом усіх напівпровідникових приладів.

Транзистор складається з трьох шарів напівпровідників: по краях містяться напівпровідники одного типу, а між ними — дуже тонкий прошарок напівпровідника іншого типу. Дві крайні області називають емітером<sup>1</sup> і колектором<sup>2</sup>, а середню область — базою.

Така структура транзистора дає змогу використовувати його для підсилення напруги. Між емітером і базою подають змінну напругу, і малі зміни напруги між емітером і базою спричиняють «синхронні», але **в багато разів більші** зміни напруги на навантазі (резисторі  $R$ ), увімкненому в коло колектора (див. рис. 33.4). Завдяки цьому можна, наприклад, багаторазово підсилювати звук або сигнали, що їх приймає антена.

Розглянемо для певності так званий  $p-n-p$ -транзистор, одну з можливих схем приєднання якого наведено на рис. 33.4.

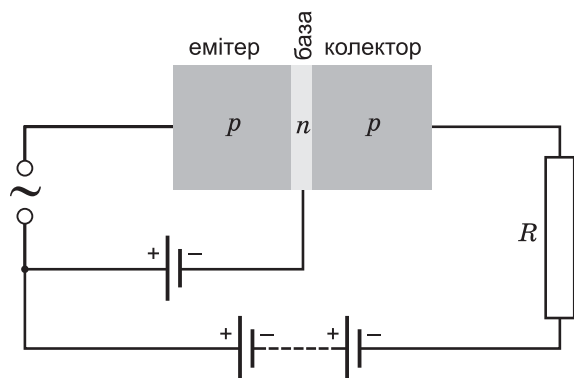


Рис. 33.4. Схема приєднання транзистора для підсилення змінного електричного сигналу.

У цьому випадку основними носіями заряду в емітері та колекторі є дірки. У базі ж основні носії заряду — електрони, але базу роблять настільки тонкою (кілька мікронів), а концентрацію електронів у ній настільки малою, що практично всі дірки проходять з емітера в колектор крізь базу, не рекомбінуючи з електронами провідності, які містяться в ній.

Призначення бази полягає в тому, щоб **керувати** струмом, який проходить через емітер і колектор. Перехід між емітером і базою роблять

<sup>1</sup> Від латинського *emittere* — випускати.

<sup>2</sup> Від латинського *colligere* — збирати.

**прямим**, і тому дірки з емітера дифундують у базу, а крізь неї, як ми вже казали, — у колектор. Однак **кількість** дірок, які пройшли крізь базу (отже, і **сила струму** через колектор), значною мірою залежить від напруги між емітером і базою: що сильніше база притягає дірки, то більша їх кількість пройде крізь неї.

Змінюючи напругу між базою й емітером на соті частки вольт, можна здобути зміни напруги між емітером і колектором у десятки вольтів. Це й дає змогу використовувати транзистор як підсилювач електричних сигналів.

## 3. ІНТЕГРОВАНІ СХЕМИ

Ми розглянули тут лише найпростіші напівпровідникові прилади — діод і транзистор. Вони є «цеглинками» дуже складних пристроїв, які називають **інтегрованими схемами**. Такі схеми «працюють» сьогодні в комп'ютерах і телевізорах, мобільних телефонах і штучних супутниках, автомобілях, літаках і навіть пральних машинах.

Зазвичай інтегровану схему формують на пластинці кристала силіцію, вирощеного в спеціальний спосіб. Розмір пластинки завтовшки з аркушу паперу — приблизно від міліметра до сантиметра, причому на одній такій пластинці може розміститися до мільйона компонентів — крихітних діодів, транзисторів, конденсаторів та резисторів. Таку пластинку з інтегрованою схемою називають часто «чипом»<sup>1</sup>.

Важливими перевагами інтегрованих схем є високі швидкодія й надійність, а також дешевизна. Саме завдяки цьому на основі інтегрованих схем і вдалося створити складні, але доступні прилади, комп'ютери та предмети сучасної побутової техніки.

### ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке електронно-дірковий перехід?
2. У чому полягає головна особливість електронно-діркового переходу?
3. Чому електронно-дірковий перехід має однобічну провідність?
4. За якого приєднання полюсів джерела струму електричний струм буде текти через електронно-дірковий перехід?
5. Опишіть будову транзистора.
6. З якою метою використовують транзистори?
7. Що таке інтегровані схеми? Де їх використовують?

<sup>1</sup> Від англійського *chip* — стружка, тонка скибочка.

## ГОЛОВНЕ В ЦЬОМУ РОЗДІЛІ

- Носіями заряду в металах є **вільні електрони** (електрони провідності).
- **Електричний опір металів** зумовлено нерегулярностями кристалічної ґратки (у тому числі тепловими коливаннями іонів ґратки).
- Унаслідок підвищення температури опір металів збільшується.
- За досить низької температури опір багатьох металів і сплавів стає таким, що дорівнює нулю. У цьому полягає явище **надпровідності**.
- Носіями заряду в електролітах є позитивні й негативні іони.
- Іони в електроліті з'являються внаслідок **електролітичної дисоціації**.
- Утворення нейтральної молекули з іонів називають **рекомбінацією**.
- Процес виділення речовини на електродах, що відбувається внаслідок проходження електричного струму, називають **електролізом**.
- Закон електролізу: маса речовини  $m$ , що виділяється на електроді, пропорційна до заряду  $q$ , який пройшов крізь електроліт:  $m = kq = kIt$ .
- Електроліз використовують для покривання зразка шаром металу (нікелювання, хромування, гальванопластика) і в електрометалургії (особливо для виплавляння алюмінію).
- Електричний струм у газах зумовлено рухом іонів різного знака та електронів.
- Якщо струм у газі протікає тільки в присутності іонізатора, процес проходження струму крізь газ називають **несамостійним газовим розрядом**.
- Якщо електричний розряд у газі може текти без зовнішнього іонізатора, розряд називають **самостійним газовим розрядом**.
- Типи самостійного розряду: жеврійний, коронний, іскровий, дуговий.
- Частково або повністю іонізований газ називають **плазмою**. Особливостями плазми є її електропровідність і чутливість до впливу електричних і магнітних полів.

- Електричний струм у вакуумі являє собою потік електронів (що виникають, наприклад, унаслідок термоелектронної емісії).
- Вакуумний діод має однобічну провідність. Це зумовлено тим, що тільки один з електродів є нагрітим.
- Найважливішим застосуванням термоелектронної емісії є електронно-променева трубка, яку використовують в телевізорах і дисплеях комп'ютерів. Електронним променем керують за допомогою електричного або магнітного поля.
- Головною особливістю **напівпровідників** є їхня **висока чутливість до зміни зовнішніх умов** (температури й освітленості). Завдяки цьому напівпровідники використовують для створення складних автоматизованих систем.
- Носіями заряду в напівпровідниках є **електрони провідності й дірки**.
- З підвищенням температури опір напівпровідників зменшується (на відміну від металів).
- Унаслідок додавання домішок провідність напівпровідника може стати переважно електронною або переважно дірковою.
- Основним елементом напівпровідникового діода є електронно-дірковий перехід — межа поділу між напівпровідниками  $n$ -типу та  $p$ -типу.
- Головною особливістю **напівпровідникового діода** є однобічна провідність.
- **Транзистор** — пристрій, призначений для підсилення електричних сигналів. Транзистор складається з емітера, колектора й бази. Змінюючи напругу між базою й емітером, можна здобувати набагато більші зміни напруги між емітером і колектором.
- Інтегровані схеми — мініатюрні пристрої, які містять велику кількість керівних елементів. Їх використовують в приладах та сучасній побутовій техніці.



# ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ<sup>1</sup>

Запропоновані лабораторні роботи за *розсудом учителя* можна виконувати: а) відразу після вивчення даної теми; б) наприкінці навчального семестру; в) наприкінці навчального року (у формі фізичного практикуму).

Які із запропонованих робіт виконувати (і коли), залежить, насамперед, від можливостей фізичного кабінету школи.

## 1. ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ БОЙЛЯ—МАРІОТТА

**Мета роботи:** експериментально перевірити закон Бойля—Маріотта.

**Обладнання:** скляний циліндр заввишки 50 см; скляна трубка довжиною 50–60 см, закрита з одного кінця; склянка; лінійка; барометр-анероїд (один на клас); штатив із лапкою; вода.

### Опис роботи

У циліндр із водою опускають відкритим кінцем униз трубку (див. рисунок). Якщо рівень води в трубці нижчий за рівень води в посудині на  $h$ , тиск повітря в трубці дорівнює сумі атмосферного й гідростатичного тиску стовпа води висотою  $h$ . Для спрощення розрахунків можна вимірювати тиск у міліметрах ртутного стовпчика. Тоді, оскільки густина води в 13,6 разів менша від густини ртуті, для повітря в трубці можна записати  $p = H + \frac{h}{13,6}$ , де  $H$  — атмо-

сферний тиск у міліметрах ртутного стовпчика,  $h$  — різниця рівнів води в циліндрі та трубці, виміряна в міліметрах. У трубці міститься стала маса повітря, яке можна вважати таким, що перебуває за сталої (кімнатної) температури. Об'єм і тиск повітря, що міститься в трубці, можна змінювати, змінюючи глибину занурення трубки. Об'єм повітря в трубці  $V = l \cdot S$ , де  $l$  — довжина стовпа повітря;  $S$  — площа перерізу трубки.

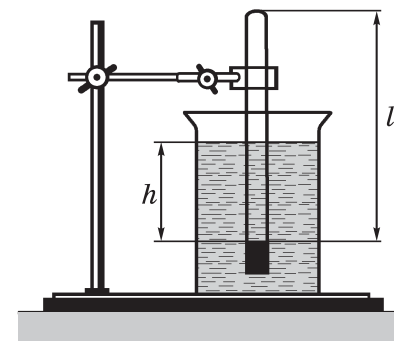
Оскільки площа поперечного перерізу трубки незмінна, довжина стовпа повітря в трубці пропорційна до об'єму повітря. Тому для

<sup>1</sup> До складу комплекту «Фізика-10» входить зошит для лабораторних робіт, за допомогою якого вам буде зручніше виконувати ці роботи. У цьому зошиті наведено також методи розрахування похибок. «Лабораторні роботи» написано разом з Л. А. Кириком.

перевірки закону Бойля—Маріотта досить перевірити справедливність рівності  $\left(H + \frac{h}{13,6}\right) \cdot l = \text{const.}$

### Хід роботи

1. Зберіть установку (див. рисунок).



2. Виміряйте барометром атмосферний тиск у мм рт. ст.

3. Занурюючи у воду трубку відкритим кінцем униз, виміряйте  $h$  (повторіть дослід три рази).

4. Занесіть виміряні та обчислені значення в таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

№ досліду	$H$ , мм рт. ст.	$h$ , мм	$l$ , см	$c = \left(H + \frac{h}{13,6}\right) \cdot l$
-----------	------------------	----------	----------	---

5. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: *що ви вимірювали та який одержано результат.*

## 2. ВИМІРЮВАННЯ ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

**Мета роботи:** навчитися вимірювати вологість повітря.

**Обладнання:** психрометр; склянка з водою; психрометрична таблиця.

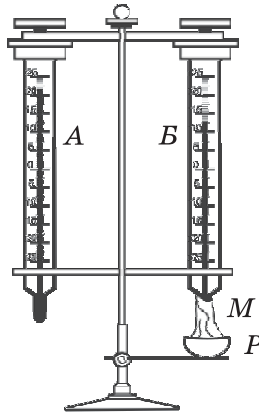
### Опис роботи

Психрометр складається з двох однакових термометрів, один з яких обмотаний вологою тканиною. Якщо водяна пара в повітрі не насичена, то вода із тканини буде випаровуватися і покази «вологого» термометра будуть меншими, ніж сухого.

Що інтенсивніше випаровується вода (тобто що менш насичене повітря водяною парою), то нижче покази «вологого термометра». За різницею показів двох термометрів можна вимірювати вологість повітря. З цією метою складають так звані психрометричні таблиці, за допомогою яких знаходять конкретні значення відносної вологості повітря.

### Хід роботи

1. На початку уроку наливають воду в резервуар термометра, обгорненого марлею (див. рисунок).



2. Почекавши хвилин 20–25 (поки покази вологого термометра перестануть змінюватися), записують покази сухого й вологого термометрів у таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{волог}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$
----------------------------------	------------------------------------	----------------------------	---------------

3. За допомогою психрометричної таблиці визначте відносну вологість повітря.

4. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: *що ви вимірювали та який одержано результат.*

### 3. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ

**Мета роботи:** експериментально визначити коефіцієнт поверхневого натягу методом відриву краплі.

**Обладнання:** ваги навчальні; важки (замість ваг та важків можна використати мензурку); клин вимірювальний; піпетка; штангенциркуль; склянка з водою; склянка хімічна.

### Опис роботи

Розрахунки показують, що крапля води відривається від піпетки у разі виконання рівності  $mg = \sigma\pi d$ , де  $m$  — маса краплі,  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягу води,  $d$  — внутрішній діаметр піпетки. Звідси  $\sigma = \frac{mg}{\pi d}$ . Для підвищення точності вимірюють масу  $M$  кількох крапель:  $M = m \cdot n$ , де  $n$  — кількість крапель. Тоді розрахункова формула набуває вигляду:  $\sigma = \frac{Mg}{n\pi d}$ .

### Хід роботи

1. За допомогою вимірювального клина та штангенциркуля виміряйте внутрішній діаметр піпетки  $d$ .

2. Накапайте в порожню склянку 100–200 крапель води й за допомогою ваг (або мензурки) визначте масу води  $M$ .

3. За наведеною в описі роботи формулою обчисліть  $\sigma$ .

4. Занесіть виміряні та обчислені значення в таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

$d, \text{ м}$	$n$	$M, \text{ кг}$	$\sigma, \text{ Н/м}$
----------------	-----	-----------------	-----------------------

5. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: *що ви вимірювали та який одержано результат.*

### 4. ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ГУМИ

**Мета роботи:** експериментально перевірити закон Гука та визначити модуль пружності (модуль Юнга) гуми.

**Обладнання:** динамометр; набір вантажів; гумовий шнур (або стрічка); лінійка; штангенциркуль; штатив із муфтою й лапкою.

### Опис роботи

Закон Гука встановлює співвідношення між модулем подовження  $|\Delta l|$  і силою пружності:  $F = k|\Delta l|$ .

Ми можемо подати жорсткість  $k$  у вигляді  $k = E \frac{S}{l_0}$ , де коефіцієнт

$E$  характеризує вже не зразок, а речовину, з якої його виготовлено. Цей коефіцієнт називають модулем пружності або модулем Юнга. Підставляючи в написане вище рівняння закону Гука

$$k = E \frac{S}{l_0}, \text{ дістанемо } F = E \frac{S}{l_0} |\Delta l|, \text{ або } \frac{F}{S} = E \frac{|\Delta l|}{l_0}.$$

$$\text{Звідси } E = \frac{F \cdot l_0}{S \cdot |\Delta l|}, \text{ або } E = \frac{F \cdot l_0}{S \cdot (l - l_0)}.$$

### Хід роботи

1. Нанесіть олівцем дві позначки на нерозтягнутому гумовому шнурі.
2. Виміряйте за допомогою лінійки відстань між позначками на нерозтягнутому шнурі  $l_0$ .
3. Закріпіть один кінець шнура в лапці штатива, а до другого кінця шнура підвісьте 2–3 вантажі.
4. Виміряйте відстань між позначками  $l$  і діаметр шнура  $d$ .
5. Обчисліть площу перерізу шнура  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ .
6. Визначте за допомогою динамометра загальну вагу вантажів  $F$ .
7. Обчисліть модуль Юнга:  $E = \frac{4F \cdot l_0}{\pi d^2 (l - l_0)}$ .
8. Занесіть виміряні та обчислені значення в таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

$l_0$	$l$	$d$	$S$	$F$	$E$
м	м	м	м <sup>2</sup>	Н	Па

9. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: *що ви вимірювали та який одержано результат*.

### 5. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА

**Мета роботи:** експериментально визначити питомий опір дроту.

**Обладнання:** натягнутий на дерев'яну планку дріт з матеріалу з великим питомим опором; амперметр; вольтметр; джерело постійного струму; реостат; ключ; з'єднувальні дроти; мікрометр.

#### Опис роботи

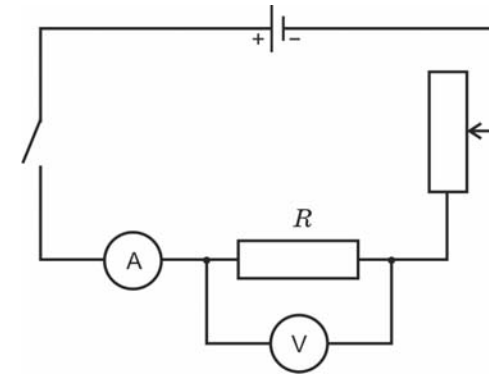
Опір залежить від матеріалу провідника і його геометричних розмірів. Виміри показують, що опір  $R$  провідника прямо пропорційний до довжини провідника  $l$  й обернено пропорційний до площі його поперечного перерізу  $S$ :  $R = \rho \frac{l}{S}$ , де  $\rho$  характеризує вже не провідник, а речовину, з якої його виготовлено.

Звідси  $\rho = \frac{R \cdot S}{l}$ . Опір провідника можна визначити, використовуючи закон Ома:  $R = U/I$ . Знаючи діаметр провідника  $d$ , можна обчислити площу його поперечного перерізу  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ .

$$\text{Остаточно дістаємо: } \rho = \frac{\pi d^2 \cdot U}{4l \cdot I}.$$

### Хід роботи

1. Виміряйте лінійкою довжину дроту й за допомогою мікрометра його діаметр.
2. Зберіть електричне коло за схемою, зображеною на рисунку. Змінюючи положення повзунка реостата, підберіть силу струму не більше ніж 0,5 А.



3. Виміряйте силу струму  $I$  й напругу на досліджуваному провіднику.
4. Обчисліть значення питомого опору дроту.
5. Занесіть виміряні та обчислені значення в таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

$l$	$d$	$I$	$U$	$\rho$
м	м	А	В	Ом м

6. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: *що ви вимірювали та який одержано результат*.

### 6. ПОСЛІДОВНЕ ТА ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

**Мета роботи:** експериментально перевірити закони послідовного та паралельного з'єднання провідників.

**Обладнання:** джерело постійного струму; амперметр; вольтметр; два резистори; реостат; ключ; з'єднувальні дроти.

#### Опис роботи

Для послідовного з'єднання двох провідників справедливі такі співвідношення:

$$I = \text{const}; U = U_1 + U_2; R = R_1 + R_2; \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Для паралельного з'єднання двох провідників справедливі такі співвідношення:

$$U = \text{const}; I = I_1 + I_2; \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}; \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

### Хід роботи

1. Зберіть електричне коло для вивчення послідовного з'єднання резисторів.

2. Виміряйте силу струму в різних точках кола та напругу на обох резисторах, увімкнувши вольтметр по черзі до потрібних точок схеми.

3. Перевірте виконання законів послідовного з'єднання резисторів, заповнивши таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

$I_1$	$I_2$	$I$	$U_1$	$U_2$	$U$	$R_1$	$R_2$	$R$
А	А	А	В	В	В	Ом	Ом	Ом

4. Зберіть електричне коло для вивчення паралельного з'єднання резисторів.

5. Виміряйте напругу й силу струму в окремих резисторах та в усій ділянці кола, умикаючи амперметр у відповідні гілки кола.

6. Перевірте виконання законів паралельного з'єднання резисторів, заповнивши таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

$I_1$	$I_2$	$I$	$U_1$	$U_2$	$U$	$R_1$	$R_2$	$R$
А	А	А	В	В	В	Ом	Ом	Ом

7. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: *що ви вимірювали та який одержано результат.*

### 7. ВИЗНАЧЕННЯ ЕРС І ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

**Мета роботи:** експериментально визначити основні характеристики джерела постійного струму: ЕРС  $\mathcal{E}$  і внутрішній опір  $r$ .

**Обладнання:** джерело постійного струму; амперметр; вольтметр; реостат; ключ замикання кола; з'єднувальні дроти.

#### Опис роботи

Збираємо коло, зображене на рис. 1, і вимірюємо силу струму та напругу на клеммах джерела для двох різних значень зовнішнього опору  $R$  (тобто для двох різних положень повзунка реостата).

Використовуючи закон Ома для повного кола, дістанемо:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}; I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}.$$

$$\text{Звідси } \mathcal{E} = I_1 R_1 + I_1 r, \mathcal{E} = I_2 R_2 + I_2 r.$$

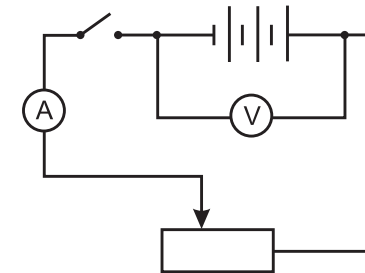
Оскільки  $I_1 R_1 = U_1$  й  $I_2 R_2 = U_2$ , то

$$U_1 + I_1 r = U_2 + I_2 r, \text{ або } I_1 r - I_2 r = U_2 - U_1.$$

Розв'язуючи ці рівняння, одержуємо, що внутрішній опір джерела струму  $r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$ , а його ЕРС —  $\mathcal{E} = U_1 + I_1 r$ .

### Хід роботи

1. Зберіть електричне коло за схемою:



2. Установіть повзунок реостата приблизно в середнє положення, виміряйте силу струму  $I_1$  й напругу  $U_1$ .

3. Пересуньте повзунок реостата, виміряйте силу струму  $I_2$  та напругу  $U_2$ .

4. Обчисліть внутрішній опір  $r$  й ЕРС  $\mathcal{E}$  джерела струму.

5. Занесіть виміряні та обчислені значення в таблицю, уміщену в зошиті для лабораторних робіт. Нижче наведено заголовок цієї таблиці.

$I_1, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$r, \text{ Ом}$	$\mathcal{E}, \text{ В}$
------------------	------------------	------------------	------------------	-----------------	--------------------------

6. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: *що ви вимірювали та який одержано результат.*

### 8. СПОСТЕРЕЖЕННЯ ДІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВІДНИК ЗІ СТРУМОМ

**Мета роботи:** дослідити дію магнітного поля на провідник зі струмом.

**Обладнання:** джерело постійного струму; дугоподібний магніт; штатив із лапкою; котушка-моток; смуговий магніт; реостат; ключ; з'єднувальні дроти; транспортир.

### Опис роботи

Досліджуючи взаємодію між котушками зі струмом і постійними магнітами, Ампер установив відповідність між торцями котушки зі струмом і полюсами магніту (див. рис. 1).

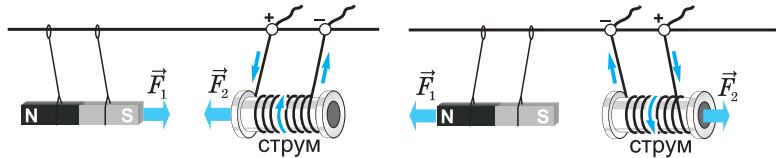


Рис. 1

На лівому рисунку лівому торцю котушки відповідає північний полюс магніту, а правому — південний.

Досліди свідчать, що модуль сили, яка діє на провідник зі струмом, пропорційний до модуля вектора магнітної індукції, до довжини провідника (для котушки зі струмом — кількості витків) і до сили струму.

### Хід роботи

1. Підвісьте дротяну котушку до лапки штатива так, щоб вона не торкалася вставленого в неї полюса дугоподібного магніту, розміщеного на столі. Кінці котушки ввімкніть через реостат і ключ до джерела постійного струму (див. рис. 2). Реостат установіть на максимальний опір.

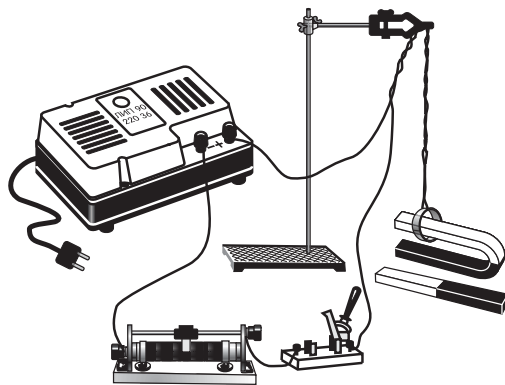


Рис. 2

2. Замкніть коло на кілька секунд і відзначте, на скільки відхилиться котушка від початкового положення.

3. Повторіть дослід 2–3 рази за різної сили струму в колі. З'ясуйте, чи залежить модуль вектора сили, що діє з боку магнітного поля магніту на котушку зі струмом, від сили струму в котушці.

4. Не міняючи сили струму, порівняйте кути відхилення котушки від початкового положення у разі одного, а потім у разі двох магнітів (дугоподібному й смуговому), складених разом однаковими полюсами, як показано на рис. 3. З'ясуйте, чи залежить модуль вектора сили, що діє на котушку зі струмом, від модуля вектора магнітної індукції поля, створеного магнітом.



Рис. 3

5. Піднесіть дугоподібний магніт до котушки зі струмом, а потім до гнучкого дроту, наприклад, який іде від котушки до ключа, і порівняйте їх відхил від початкових положень. З'ясуйте, чи залежить модуль вектора сили, що діє з боку магнітного поля магніту на провідник зі струмом, від довжини провідника, розташованого в магнітному полі.

6. Запишіть у зошиті для лабораторних робіт висновок: **що ви вимірювали та який одержано результат.**

## ПРЕДМЕТНО-ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

Абсолютна температура.....	20	Діелектрики неполярні.....	120
Абсолютний нуль.....	21	Діелектрики полярні.....	119
<i>Авогадро Амадео</i> .....	14, 28	Діелектрична проникність.....	121
Адіабатний процес.....	76	Діод.....	220
Акцепторні домішки.....	231	Дірка.....	228
Аморфні тіла.....	51	Діркова провідність	
Ампер — одиниця струму.....	148, 149, 178	напівпровідників.....	227
<i>Ампер Андре</i> .....	151, 177	Домішкова провідність	
Аніони.....	209	напівпровідників.....	230
Анод.....	209	Донорні домішки.....	230
Атомна одиниця маси.....	12	Дослід Штерна.....	34
Атомний номер.....	105	Другий закон термодинаміки.....	87
<b>Ближній порядок</b> .....	51	Дуговий розряд.....	217
<i>Бойль Роберт</i> .....	26	<i>Дюфе Шарль</i> .....	94
<i>Больцман Людвіг</i> .....	29	<i>Ейнштейн Альберт</i> .....	7
Броунівський рух.....	7, 8	Еквіпотенціальні поверхні.....	129
<b>Взаємодія молекул</b> .....	8	Екологічна криза.....	87
Вимірювання напруги.....	158	Електризація.....	96
Вимірювання сили струму.....	157	Електрична стала.....	103
Вимірювання температури.....	18	Електричне поле.....	106
Випаровування.....	37	Електричний заряд.....	94
Висота підняття рідини		Електричний струм.....	97
в капілярі.....	46	Електричний струм	
Вихрове електричне поле.....	125	в електролітах.....	207
Відносна молекулярна (атомна)		Електричний струм у вакуумі.....	220
маса.....	12	Електричний струм у газах.....	213
Відносна молекулярна маса 12, 13		Електричний струм у металах.....	202
Відносне подовження.....	59	Електричний струм	
Вільні електрони.....	116, 202	у напівпровідниках.....	226
Вільні заряди.....	116	Електроємність відокремленого	
Внутрішня енергія.....	66	провідника.....	135
Внутрішня енергія газу.....	73	Електроємність конденсатора.....	138
Вологість.....	40	Електроліз.....	210
<i>Вольтя Алессандро</i> .....	127, 147	Електроліти.....	208
<b>Газові закони</b> .....	23	Електролітична дисоціація.....	208
<i>Гей-Люссак Джозеф Луї</i> .....	23	Електрон.....	96
<i>Гельмгольц Герман</i> .....	69	Електрон-вольт.....	127
<i>Геріке Отто</i> .....	94	Електронна емісія.....	220
<i>Герц Генріх</i> .....	106	Електронна провідність	
<i>Гіберт Вільям</i> .....	93, 174	напівпровідників.....	227
Границя пружності.....	60	Електронно-дірковий перехід.....	233
Грози.....	132	Електронно-променева трубка.....	222
Далекий порядок.....	48	Електростатичне поле.....	107, 125
Двоелектродна лампа (діод).....	220	Електростатичний захист.....	118
<i>Демокрит</i> .....	5	Електрохімічний еквівалент.....	210
Деформації твердих тіл.....	56	Елементарний заряд.....	104
Джерело струму.....	164	Енергетична криза.....	87
Динамічна рівновага.....	38, 209	Енергія електричного поля.....	141
Дифузія.....	8	Енергія зарядженого	
Діелектрики.....	119	конденсатора.....	140
		ЕРС джерела струму.....	166
		<i>Ерстед Ганс</i> .....	151, 176

<b>Жеврійний розряд</b> .....	216	<i>Купер Леон</i> .....	206
Закон Авогадро.....	28	Куперівські пари.....	206
Закон Ампера.....	187	Лінії магнітної індукції.....	183
Закон Гей-Люссака.....	23	Лінії напруженості.....	111
Закон Гука.....	58	Люмінофори.....	223
Закон Джоуля—Ленца.....	160	Магнітна взаємодія.....	179
Закон електролізу.....	210	Магнітна дія струму.....	151
Закон збереження електричного		Магнітна індукція.....	181
заряду.....	98	Магнітне поле.....	181
Закон Кулона.....	102	Магнітні полюси Землі.....	175
Закон Ома для ділянки кола.....	154	<i>Майєр Роберт</i> .....	69
Закон Ома для повного кола.....	166	Макроскопічні	
Закон Шарля.....	25	та мікроскопічні параметри.....	10
Закон Бойля—Маріотта.....	26	<i>Максвелл Джеймс</i> .....	106
Заряд електрона.....	105	<i>Маріотт Едм</i> .....	26
Застосування електролізу.....	211	<i>Менделєєв Д. І.</i> .....	29
Застосування плазми.....	218	Метали.....	116
Змочування.....	45	Механічне напруження.....	59
Ідеальний газ.....	31	Механічні властивості	
Ізобарний процес.....	23, 77	твердих тіл.....	55
Ізопроцеси.....	23	<i>Мілікен Роберт</i> .....	104
Ізотермічний процес.....	25, 76	Модуль магнітної індукції.....	182
Ізохорний процес.....	24, 76	Модуль Юнга.....	58
Інтегровані схеми.....	237	Молярна маса.....	15
Іон.....	97	Моль.....	13
Іонізація газів.....	214	<b>Нагрівач</b> .....	80
Іоносфера.....	132	Надпровідність.....	205
Іскровий розряд.....	217	Напівпровідниковий діод.....	233
<i>Каммерлінг-Оннес Гейке</i> .....	205	Напівпровідникові прилади.....	233
Капілярні явища.....	45	Напруженість електричного	
Капілярність.....	46	поля.....	109
<i>Карно Саді</i> .....	69	Напруженість поля точкового	
Катіони.....	209	заряду.....	110
Катод.....	209	Напряма магнітної індукції.....	181
Кельвін.....	21	Насичена пара.....	38
<i>Кельвін Вільям</i> .....	20	Ненасичена пара.....	39
Кипіння.....	39	Необоротні процеси.....	85
Кількість речовини.....	13	Непружні деформації.....	58
Кількість теплоти.....	69	Несамостійний розряд у газах.....	213
Кінескоп.....	223	Носії електричного заряду.....	97
ККД теплового двигуна.....	81	Нульовий рівень потенціальної	
<i>Клапейрон Еміль</i> .....	27	енергії.....	125
<i>Клаузіус Рудольф</i> .....	32	<b>Оборотні процеси</b> .....	85
Колектор.....	236	Ом.....	154
Компас.....	173	<i>Ом Георг</i> .....	154
Конденсатор.....	137	Опір.....	154
Кондиціонер.....	83	Основне завдання молекулярно-	
Коронний розряд.....	216	кінетичної теорії.....	10
Кристалізація.....	50	Основне рівняння молекулярно-	
Кристалічна ґратка.....	48	кінетичної теорії ідеального	
Кристалічні тіла.....	48	газу.....	32
Крутіння.....	57	Основні елементи теплового	
Кулон.....	101	двигуна.....	79
<i>Кулон Шарль</i> .....	101	Осцилограф.....	224

## ЗМІСТ

ДО ВЧИТЕЛЯ ТА УЧНЯ ..... 3

## МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

### Розділ 1. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ..... 4

#### § 1. Молекулярно-кінетична теорія ..... 5

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії ..... 5
2. Основне завдання молекулярно-кінетичної теорії ..... 10

#### § 2. Кількість речовини. Стала Авогадро ..... 12

1. Відносна молекулярна (атомна) маса ..... 12
2. Кількість речовини ..... 13

#### § 3. Температура ..... 17

1. Температура та її вимірювання ..... 17
2. Абсолютна шкала температур ..... 19

#### § 4. Газові закони ..... 23

1. Ізопроекти ..... 23
2. Рівняння стану газу ..... 27

#### § 5. Температура та середня кінетична енергія молекул ..... 31

1. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ..... 31
2. Абсолютна температура та середня кінетична енергія молекул ..... 33
3. Швидкості молекул ..... 34

#### § 6. Взаємні перетворення рідин і газів ..... 37

1. Випаровування та конденсація ..... 37
2. Насичена та ненасичена пара ..... 38
3. Вологість ..... 40

#### § 7. Властивості рідини ..... 42

1. Поверхневий натяг ..... 42
2. Змочування. Капілярні явища ..... 45
3. Явища змочування та капілярності в побуті, природі й техніці ..... 46

#### § 8. Кристалічні й аморфні тіла ..... 48

1. Кристалічні тіла ..... 48
2. Аморфні тіла ..... 51
3. Інші стани речовини ..... 52

#### § 9. Механічні властивості твердих тіл ..... 55

1. Від рубила до мобільного телефону ..... 55
2. Деформації твердих тіл ..... 56
3. Закон Гука і модуль Юнга ..... 58

### Розділ 2. ТЕРМОДИНАМІКА ..... 65

#### § 10. Внутрішня енергія. Перший закон термодинаміки ..... 66

1. Внутрішня енергія ..... 66
2. Закон збереження енергії в теплових явищах ..... 68
3. Рівняння теплового балансу ..... 70

Паралельне з'єднання ..... 156	Робота газу за циклічного процесу ..... 75
Пароутворення ..... 37	Робота струму ..... 160
<i>Патон Є. О.</i> ..... 218	Робоче тіло ..... 80
Перетворювання й передавання енергії в електричному колі ..... 168	Розміри молекул ..... 5, 6
Перший закон термодинаміки ..... 69	Розтяг і стиск ..... 56
Питома теплоємність ..... 70	Роса ..... 41
Питома теплота пароутворення ..... 70	Самостійний розряд у газах ..... 214
Питома теплота плавлення ..... 71	Середня кінетична енергія молекул ..... 33
Питомий опір ..... 155	Сила Ампера ..... 187
Плавлення ..... 50	Сила Лоренца ..... 190
Плазма ..... 53, 218	Сила струму ..... 148
Поверхнева енергія ..... 44	<i>Смолуховський Маріан</i> ..... 7
Поверхневий натяг ..... 44	Способи змінювання внутрішньої енергії ..... 68
Поверхневий натяг ..... 42	Стала Авогадро ..... 14
Поле рівномірно зарядженої площини ..... 113	Стала Больцмана ..... 28, 33
Поле рівномірно зарядженої сфери ..... 112	Сторонні сили ..... 164
Поля точкових зарядів ..... 111	Ступінь дисоціації ..... 209
Поляризація діелектриків ..... 120	Температура ..... 17
Послідовне з'єднання ..... 155	Температура плавлення ..... 50
Постійні магніти ..... 174	Теплова дія струму ..... 150
Потенціал електростатичного поля ..... 126	Теплова рівновага ..... 17
Потенціальна енергія заряду ..... 124	Тепловий насос ..... 84
Потенціальна енергія заряду в електростатичному полі ..... 124	Теплові двигуни ..... 79
Потужність струму ..... 162	Теплопередача ..... 68
Правило лівої руки ..... 187	Термоелектронна емісія ..... 220
Правило правого гвинта (свердлика) ..... 182	Термометр ..... 18
Приклади магнітних полів ..... 183	Термометр газовий ..... 19
Принцип суперпозиції полів ..... 111	Терморезистори (термістори) ..... 230
Природа електричного опору металів ..... 203	Типи деформацій ..... 56
Провідники ..... 116	<i>Томсон Дж. Дж.</i> ..... 95
Провідники в електростатичному полі ..... 117	Транзистор ..... 236
Пружні деформації ..... 57	<b>Фарад</b> ..... 136
<i>Резерфорд Ернст</i> ..... 96	<i>Фарадей Майкл</i> ..... 106, 150, 210
Рекомбінація ..... 209	Фоторезистори ..... 230
Рівняння Клапейрона ..... 27	<i>Франклін Бенджамін</i> ..... 95, 137
Рівняння Менделєєва—Клапейрона ..... 29	Хімічна дія струму ..... 150
Рівняння стану ..... 10	Холодильник — елемент теплового двигуна ..... 80
Рівняння теплового балансу ..... 70	Холодильник — прилад для охолодження продуктів ..... 82
Рідинні кристали ..... 52	Циклічний процес ..... 75
Різниця потенціалів ..... 127	<i>Шарль Жак</i> ..... 25
Робота газу ..... 74	Швидкості молекул ..... 6, 34
Робота газу за ізобарного розширення ..... 74	Шкала Кельвіна ..... 21
	Шкала Цельсія ..... 18
	<i>Штерн Отто</i> ..... 34
	<i>Юнг Томас</i> ..... 58

<b>§ 11. Перший закон термодинаміки та газові процеси .....</b>	<b>73</b>
1. Внутрішня енергія газу .....	73
2. Робота газу .....	74
3. Застосування першого закону термодинаміки до газових процесів .....	76
<b>§ 12. Теплові двигуни, холодильники та кондиціонери.....</b>	<b>79</b>
1. Теплові двигуни .....	79
2. Холодильники та кондиціонери.....	82
<b>§ 13. Необоротність теплових процесів. Охорона довкілля .....</b>	<b>85</b>
1. Необоротність теплових процесів.....	85
2. Енергетична й екологічна кризи.....	87

## **ЕЛЕКТРОДИНАМІКА**

<b>Розділ 3. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ .....</b>	<b>92</b>
<b>§ 14. Природа електрики .....</b>	<b>93</b>
1. Від електрона-бурштину до електрона-частинки.....	93
2. Роль електричних взаємодій.....	98
<b>§ 15. Взаємодія електричних зарядів.....</b>	<b>101</b>
1. Закон Кулона .....	101
2. Електричне поле .....	106
<b>§ 16. Напруженість і лінії напруженості електричного поля.....</b>	<b>109</b>
1. Напруженість електричного поля .....	109
2. Лінії напруженості .....	111
<b>§ 17. Провідники й діелектрики в електростатичному полі .....</b>	<b>116</b>
1. Провідники.....	116
2. Діелектрики .....	119
<b>§ 18. Потенціальна енергія заряду.</b>	
<b>Потенціал і різниця потенціалів .....</b>	<b>124</b>
1. Потенціальна енергія заряду в електростатичному полі .....	124
2. Потенціал електростатичного поля та різниця потенціалів.....	126
3. Зв'язок між різницею потенціалів і напруженістю .....	128
4. Чому бувають грози? .....	132
<b>§ 19. Електроємність. Енергія електричного поля.....</b>	<b>135</b>
1. Електроємність .....	135
2. Енергія електричного поля.....	140
<b>Розділ 4. ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....</b>	<b>146</b>
<b>§ 20. Електричний струм .....</b>	<b>147</b>
1. Джерела постійного струму .....	147
2. Сила струму .....	148
3. Дії електричного струму.....	150
<b>§ 21. Закон Ома для ділянки кола.....</b>	<b>153</b>
1. Опір і закон Ома для ділянки кола .....	153
2. Послідовне й паралельне з'єднання провідників.....	155
<b>§ 22. Робота й потужність постійного струму .....</b>	<b>160</b>
1. Робота струму і закон Джоуля—Ленца.....	160
2. Потужність струму.....	162

<b>§ 23. Закон Ома для повного кола.....</b>	<b>164</b>
1. Джерело струму.....	164
2. Закон Ома для повного кола.....	166
3. Перетворювання й передавання енергії в електричному колі.....	168

## **Розділ 5. МАГНІТНЕ ПОЛЕ .....**

<b>§ 24. Взаємодія магнітів і струмів.....</b>	<b>173</b>
1. Взаємодія магнітів .....	173
2. Взаємодія провідників зі струмами і магнітів .....	176
3. Взаємодія провідників зі струмами .....	177
<b>§ 25. Магнітне поле .....</b>	<b>181</b>
1. Магнітна індукція .....	181
2. Лінії магнітної індукції .....	183
<b>§ 26. Сила Ампера і сила Лоренца.....</b>	<b>187</b>
1. Сила Ампера .....	187
2. Сила Лоренца.....	190
<b>§ 27. Магнітні властивості речовини.....</b>	<b>193</b>
1. Гіпотеза Ампера .....	193
2. Магнітна проникність .....	194
3. Феромагнетика .....	196

## **Розділ 6. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ**

<b>У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....</b>	<b>201</b>
<b>§ 28. Електричний струм у металах .....</b>	<b>202</b>
1. Вільні електрони.....	202
2. Надпровідність.....	205
<b>§ 29. Електричний струм у електролітах .....</b>	<b>207</b>
1. Носії заряду в електролітах.....	207
2. Закон електролізу .....	210
3. Застосування електролізу.....	211
<b>§ 30. Електричний струм у газах .....</b>	<b>213</b>
1. Несамостійний розряд у газах.....	213
2. Самостійний розряд у газах.....	214
3. Плазма .....	218
<b>§ 31. Електричний струм у вакуумі .....</b>	<b>220</b>
1. Електронна емісія.....	220
2. Двоелектродна лампа (діод).....	220
3. Електронно-променева трубка .....	222
<b>§ 32. Електричний струм у напівпровідниках .....</b>	<b>226</b>
1. Значення напівпровідників .....	226
2. Будова напівпровідників.....	227
3. Домішкова провідність напівпровідників .....	230
<b>§ 33. Напівпровідникові прилади .....</b>	<b>233</b>
1. Напівпровідниковий діод.....	233
2. Транзистор.....	236
3. Інтегровані схеми .....	237
<b>ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ.....</b>	<b>240</b>