

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

ВИДАВНИЦТВО  
**РАНОК**

$$P = UI$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$



# ФІЗИКА

11

КЛАС

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

ЗА НАВЧАЛЬНОЮ ПРОГРАМОЮ  
АВТОРСЬКОГО КОЛЕКТИВУ  
ПІД КЕРІВНИЦТВОМ ЛОКТЕВА В. М.

ЗА РЕДАКЦІЄЮ БАР'ЯХТАРА В. Г., ДОВГОГО С. О.

$$Q = I^2 R t$$

$$R = \rho \frac{l}{S}$$



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

$$\bar{v} = \frac{I}{n |e| S}$$

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

УДК 37.016:53(075.3)

Ф50

Авторський колектив:

Віктор Бар'яхтар, Станіслав Довгий, Фаїна Божинова, Олена Кірюхіна

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**  
(наказ Міністерства освіти і науки України від 12.04.2019 № 472)

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Р е ц е н з е н т и:

*I. M. Гельфгат*, учител фізики комунального закладу  
«Харківський фізико-математичний ліцей № 27», учител-методист,  
Заслужений учител України, кандидат фізико-математичних наук;

*A. B. Трофімчук*, завідувач кабінету природничих предметів  
Рівненського обласного інституту післядипломної педагогічної освіти

Автори й видавництво висловлюють щиру подяку:  
*M. M. Кірюхіну*, президенту Спілки наукових і інженерних об'єднань України,  
кандидату фізико-математичних наук,  
за слушні зауваження й конструктивні поради;

*I. C. Чернецькому*, завідувачу відділу створення навчально-тематичних систем знань  
Національного центру «Мала академія наук України», кандидату педагогічних наук,  
за створення відеороліків демонстраційних і фронтальних експериментів

*Методичний апарат підручника успішно пройшов експериментальну перевірку*  
*в Національному центрі «Мала академія наук України»*

Ілюстрації художника *Володимира Хорошенка*

**Ф50      Фізика** (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.): підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / [Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О.]; за ред. Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О. — Харків : Вид-во «Ранок», 2019. — 272 с. : іл., фот.

ISBN 978-617-09-5236-3

УДК 37.016:53(075.3)



Інтернет-підтримка

Електронні матеріали  
до підручника розміщено на сайті  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)

© Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я.,  
Кірюхіна О. О., 2019

© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2019

© ТОВ Видавництво «Ранок», 2019

ISBN 978-617-09-5236-3

## Дорогі друзі!

Цього року ви закінчуєте шкільний курс фізики. Сподіваємося, ви зуміли належно оцінити цю дивовижну науку про природу і намагаєтесь, використовуючи набуті знання, усвідомлювати й пояснювати явища та процеси, що відбуваються навколо. І знову з вами ваш помічник — підручник фізики. Нагадаємо його особливості.

Усі параграфи підручника завершуються рубриками: «Підбиваємо підсумки», «Контрольні запитання», «Вправа».



У рубриці «Підбиваємо підсумки» подано відомості про основні поняття та явища, з якими ви ознайомилися в параграфі. Отже, ви маєте змогу ще раз звернути увагу на головне.



«Контрольні запитання» допоможуть з'ясувати, чи зрозуміли ви вивчений матеріал. Якщо ви зможете відповісти на всі запитання, то все гаразд; якщо ж ні, знову зверніться до тексту параграфа.



Виявити свою компетентність і застосувати набуті знання на практиці допоможе матеріал рубрики «Вправа». Завдання цієї рубрики диференційовані за рівнями складності — від доволі простих, що потребують лише уважності, до творчих, розв'язуючи які, слід виявити кмітливість і наполегливість. Номер кожного завдання має свій колір (у порядку підвищення складності: синій, зелений, оранжевий, червоний, фіолетовий).



Серед завдань є такі, що слугують для *повторення матеріалу*, який ви вже вивчали в курсах природознавства, математики або на попередніх уроках фізики.



Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику наявні *експериментальні завдання*. Обов'язково виконуйте експериментальні завдання та *експериментальні роботи* — і ви будете краще розуміти фізику.



Чимало цікавого та корисного ви дізнаєтесь завдяки *інтернет-підтримці*. Це відеоролики, що показують у дії той чи інший фізичний дослід або процес; інформація, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою; приклади розв'язування задач.

Матеріали, запропоновані наприкінці кожного розділу в рубриках «Підбиваємо підсумки розділу» і «Завдання для самоперевірки», будуть корисними під час повторення вивченого та в ході підготовки до контрольних робіт.

Рубрика «*Фізика в цифрах*» слугує містком, що пов'язує досягнення техніки з навчальним матеріалом параграфів.

Для тих, хто хоче більше дізнатися про розвиток фізичної науки й техніки в Україні та світі, знайдеться чимало цікавого й корисного в рубриках «*Фізика і техніка в Україні*» та «*Енциклопедична сторінка*».

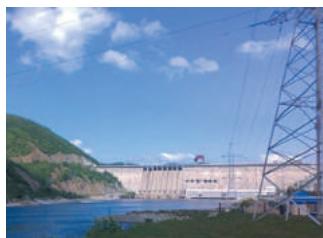
Для тих, хто замислюється над вибором майбутньої професії та прагне знати більше про перспективи розвитку ринку праці, призначена рубрика «*Професії майбутнього*».

*Цікавої подорожі світом фізики, нехай вам щастить!*

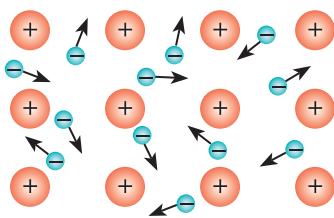
# РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

## ЧАСТИНА 1. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

### § 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ



«Рух нематеріальної рідини» — напевно, так назвав би електричний струм творець першої теорії про електрику американський фізик і політик Бенджамін Франклін (1706–1790). Зараз ви добре знаєте, що електричний струм являє собою рух саме матеріальних частинок, а от порівняння з рідиною залишається слушним. Про те, що таке електричний струм, за яких умов він виникає та які фізичні величини його характеризують, згадаємо в цьому параграфі.



**Рис. 1.1.** За відсутності електричного поля електрони в металевому провіднику рухаються хаотично

#### Нагадуємо

- Електричне поле — форма матерії, яка виявляється в дії на заряджені частинки та тіла, що перебувають у цьому полі.
- Силовою характеристикою електричного поля в даній точці є вектор напруженості:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ .
- Якщо  $q > 0$ , то  $\vec{F} \uparrow \uparrow \vec{E}$ ; якщо  $q < 0$ , то  $\vec{F} \downarrow \downarrow \vec{E}$  ( $\vec{F}$  — сила, з якою електричне поле діє на заряд  $q$ ;  $\vec{E}$  — вектор напруженості електричного поля).



#### 1 Умови існування електричного струму

Розглянемо металевий провідник. Метали — це полікристалічні речовини, у вузлах кристалічних ґраток яких розташовані позитивні іони; між іонами «мандрують» вільні електрони, здійснюючи рух, подібний до руху молекул газу (рис. 1.1). Якщо в металевому провіднику створити електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, починають зміщуватись у бік, протилежний вектору напруженості електричного поля, тобто рух електронів стає напрямленим — у провіднику виникає **електричний струм**.

**Електричний струм** — це напрямлений (упорядкований) рух частинок, які мають електричний заряд.

Зрозуміло, що створювати електричний струм можуть не тільки електрони. Так, в електролітах унаслідок дії електричного поля зміщуються позитивні й негативні іони, а в газах — електрони та позитивні й негативні іони.



Чому позитивні іони зміщуються в напрямку напруженості електричного поля, а негативні — в протилежному напрямку?

Для виникнення та існування електричного струму є необхідними дві умови:

- 1) наявність вільних заряджених частинок — носіїв струму;
- 2) наявність електричного поля, дія якого створює та підтримує напрямлений рух вільних заряджених частинок.

За створення електричного поля «відповідають» **джерела струму** — пристрой, які **перетворюють різні види енергії на електричну енергію**. У джерелах струму виконується робота з розділення різноменних електричних зарядів, у результаті чого один полюс джерела набуває позитивного заряду, а другий — негативного; у такий спосіб створюється електричне поле.

Найпоширенішими джерелами струму є електромеханічні генератори, в яких механічна енергія перетворюється на електричну. Останнім часом широко застосовують сонячні батареї — джерела струму, в яких на електричну енергію перетворюється енергія світла.



Які ще джерела електричного струму ви знаєте? Які перетворення енергії в них відбуваються?

## 2

### Що таке електричне коло

Найпростіше електричне коло являє собою **з'єднані провідниками в певному порядку джерело струму, споживач електричної енергії, замикальний (розмикальний) пристрій**.

Креслення, на якому умовними позначеннями (див. таблицю) показано, з яких елементів складається електричне коло та в якій послідовності вони з'єднані між собою, називають **електричною схемою**.

#### Зверніть увагу:

- за напрямок струму в електричному колі прийнято напрямок, у якому рухалися б по цьому колу позитивно заряджені частинки, тобто напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного;
- в умовному позначенні гальванічного елемента довга риска позначає позитивний полюс джерела, а коротка — негативний.

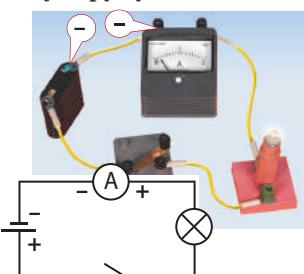
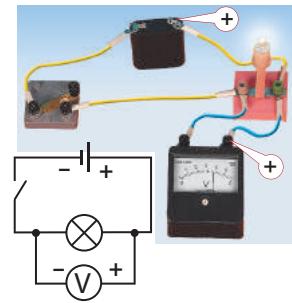
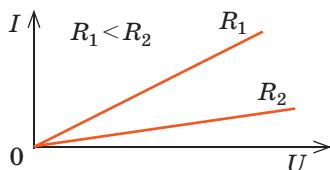
## 3

### Закон Ома для ділянки кола

Для кількісного опису струму в провіднику застосовують такі фізичні величини: *сила струму* (характеризує власне електричний струм), *напруга* (характеризує поле, яке створює струм), *опір* (характеризує провідник). Згадаємо їх.

**Умовні позначення деяких елементів електричного кола**

Елемент електричного кола	Умовне позначення
Гальванічний елемент або акумулятор	
Батарея гальванічних елементів або акумуляторів	
Резистор	
Реостат	
Штепсельне з'єднання	
З'єднання проводів	
Перетин проводів (без з'єднання)	
Затискачі для під'єднання ділянки кола	
Ключ	
Нагрівальний елемент	
Запобіжник	
Лампа розжарювання	
Світлодіод	
Напівпровідниковий діод	
Конденсатор	
Котушка індуктивності; соленоїд	
Електромагніт	
Гучномовець	
Амперметр	
Вольтметр	
Гальванометр	

Сила струму $I$	Напруга $U$	Опір $R$
<p><b>Сила струму в провіднику</b> — фізична величина, яка характеризує електричний струм і чисельно дорівнює заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за секунду:</p> $I = \frac{q}{t}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Одиниця сили струму в СІ — ампер: <math>[I] = 1 \text{ А} (\text{A})^*</math>. Це основна одиниця СІ.</li> <li>• 1 А дорівнює сили струму, який, проходячи в двох паралельних провідниках нескінченної довжини та нехтовоно малої площині перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликає бі на кожній ділянці провідників завдовжки 1 м силу взаємодії <math>2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}</math>.</li> <li>• Прилад для вимірювання сили струму — амперметр. Амперметр вмикають у коло послідовно зі споживачем, в якому вимірюють силу струму.</li> </ul>  	<p><b>Електрична напруга</b> на ділянці кола — фізична величина, яка характеризує електричне поле на ділянці кола і чисельно дорівнює роботі електричного поля з переміщення по цій ділянці заряду 1 Кл:</p> $U = \frac{A}{q}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Одиниця напруги в СІ — вольт: <math>[U] = 1 \text{ В} (\text{V})</math>.</li> <li>• 1 В — це така напруга на ділянці кола, за якої електричне поле виконує роботу 1 Дж, переміщуючи по цій ділянці заряд 1 Кл:</li> </ul> $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \quad (1 \text{ В} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}).$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Прилад для вимірювання напруги — вольтметр. Вольтметр приєднують до електричного кола паралельно ділянці, на якій вимірюють напругу.</li> </ul>	<p><b>Електричний опір</b> — фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти електричному струму.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Одиниця опору в СІ — ом: <math>[R] = 1 \text{ Ом} (\Omega)</math>.</li> <li>• 1 Ом — це опір такого провідника, в якому йде струм силою 1 А за напруги на кінцях провідника 1 В:</li> </ul> $1 \text{ Ом} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} \quad (1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}).$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Опір провідника, який має незмінний поперечний переріз, дорівнює:</li> </ul> $R = \rho \frac{l}{S},$ <p>де <math>\rho</math> — питомий опір речовини, з якої виготовлений провідник; <math>l</math> — довжина провідника; <math>S</math> — площа поперечного перерізу провідника.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Питомий опір речовини</b> — фізична величина, яка характеризує електричні властивості речовини та чисельно дорівнює опору виготовленого з неї провідника довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>.</li> </ul> <p>Одиниця питомого опору в СІ — ом-метр: <math>[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м} (\Omega \cdot \text{m})</math>.</p> <p>Питомий опір істотно залежить від температури.</p>
<p><b>Закон Ома для ділянки кола</b></p> <p>Сила струму в ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях ділянки та обернено пропорційна опору цієї ділянки:</p> $I = \frac{U}{R}$		 <p>Вольт-амперна характеристика (ВАХ) металевих провідників незмінного опору</p>

\* Тут і далі в дужках наведено міжнародні позначення одиниць СІ.

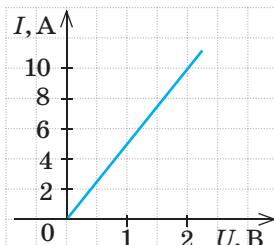
## 4

**Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** На рисунку подано вольт-амперну характеристику циліндричного провідника, який має довжину 250 м і площину поперечного перерізу  $3,5 \text{ mm}^2$ . Із якого металу виготовлений провідник?

**Аналіз фізичної проблеми.** Дізнаєтися, з якого металу виготовлений провідник, можна, якщо визначити його питомий опір і скористатися відповідною таблицею (див. Додаток 1).

Питомий опір металу знайдемо з формули для визначення опору циліндричного провідника. Опір обчислимо, скориставшись законом Ома та графіком залежності  $I(U)$ . Відповідно до графіка за напруги, наприклад, 2 В сила струму в провіднику становить 10 А.



Дано:

$$l = 25 \text{ м}$$

$$S = 3,5 \text{ mm}^2 = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$U = 2 \text{ В}$$

$$I = 10 \text{ А}$$

$$\rho = ?$$

Пошук математичної моделі, розв'язання. За законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I}. \text{ Оскільки } R = \rho \frac{l}{S}, \text{ маємо: } \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{S}. \text{ Отже, } \rho = \frac{US}{Il}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[\rho] = \frac{\text{В} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} \cdot \text{м} = \text{Ом} \cdot \text{м}; \rho = \frac{2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 25} = 2,8 \cdot 10^{-8} (\text{Ом} \cdot \text{м}).$$

За таблицею (див. Додаток 1) визначаємо, що провідник виготовлений з алюмінію.

*Відповідь:* провідник виготовлений з алюмінію.

### ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО

Безумовно, ви вже розумієте, що наш світ змінюється і багато професій, які є популярними зараз, зникнуть у майбутньому. Тож яку професію обрати, щоб не помилитися? Чи потрібен шкільний курс фізики для оволодіння навичками майбутньої професії? Стислі відомості про деякі перспективні професії ви знайдете на сторінках підручника.



#### Фахівець з ремонту та обслуговування роботів

Навіть малюкам відомо про наближення ери роботів. Але роботи, як і інші механізми, потребують обслуговування: налаштування, заміни зіпсованих частин тощо. Для такої роботи треба бути фахівцем з електрики та електроніки, знавцем у програмуванні.

Кількість роботів буде зростати, відповідно зростатиме попит на їх обслуговування. Тож фахівці з ремонту та обслуговування роботів — одна із професій майбутнього.



#### Підбиваємо підсумки

- Електричний струм — це напрямлений (упорядкований) рух частинок, які мають електричний заряд. Для виникнення та існування електричного струму необхідна наявність вільних заряджених частинок (носіїв струму) та електричного поля. За напрямок струму в електричному колі прийнято напрямок, у якому рухалися б по цьому колу позитивно заряджені частинки (напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного).

- Для кількісного опису струму в ділянці кола застосовують такі фізичні величини: сила струму ( $I = \frac{q}{t}$ ); напруга на ділянці ( $U = \frac{A}{q}$ ); опір провідника (опір ділянки). Опір провідника, що має поперечний переріз, визначають за формулою:  $R = \rho \frac{l}{S}$ .
- Сила струму в ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки та обернено пропорційна опору ділянки:  $I = \frac{U}{R}$  — закон Ома для ділянки електричного кола.

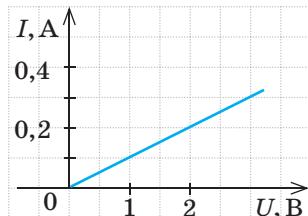
### Контрольні запитання



- Що таке електричний струм? Якими є умови його виникнення та існування?
- Які пристрої називають джерелами електричного струму? Наведіть приклади.
- Відтворіть, як позначають на електричних схемах гальванічний елемент; резистор; реостат; амперметр; вольтметр; ключ. Для чого призначені ці пристрої?
- Що прийнято за напрямок струму в колі?
- Дайте характеристики фізичних величин: сила струму в колі; напруга на ділянці кола; опір провідника; питомий опір.
- Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.

### Вправа № 1

- Наведіть приклади споживачів електричного струму. Які перетворення енергії в них відбуваються?
- Нагрівальним елементом праски, до кінців якого прикладено напругу 220 В, за 0,5 хв пройшов заряд 300 Кл. Визначте силу струму в нагрівальному елементі та опір елемента.
- На рисунку подано вольт-амперну характеристику ніхромового дроту із площею поперечного перерізу  $0,2 \text{ мм}^2$ . Визначте довжину дроту.
- Що, на вашу думку, спільне в плінку рідини та електричного струму? Які фізичні величини, що характеризують рух рідини, є аналогічними силі струму; напрузі; опору; заряду?
- Чому одиниці сили струму, напруги та опору пишуть із великих літер? На честь кого вони названі? Які відкриття зробили ці вчені?



### Фізика і техніка в Україні



**Борис Євгенович Патон** (народ. 1918 р.) — український учений, світову славу якому принесли дослідження в галузі електро-дугового зварювання. У 1953 р. Борис Євгенович став директором Інституту електрозварювання імені Е. О. Патона (Київ). Учений очолив дослідження, у результаті яких було створено електрошлаковий процес для підвищення якості іржостійких сталей. За ініціативи Б. Е. Патона започатковано зварювання в космосі. Він втілив у практику зварювання тканин людини під час хірургічних операцій. Ця методика зберегла життя тисячам хворих і зараз використовується в усьому світі.

Із 1962 р. Б. Е. Патон є незмінним президентом Національної академії наук України.

У 2018 р. вчений відзначив свій 100-річний ювілей. З нагоди цієї події він був нагороджений ЮНЕСКО Золотою медаллю Аристотеля, а також державними нагородами багатьох країн.

## § 2. ПОСЛІДОВНЕ І ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ. ШУНТИ І ДОДАТКОВІ ОПОРІ



Згадайте: якщо в ялинковій гірлянді псується одна з ламп, то всі лампи, розташовані у цій вітці, перестають світитися, при цьому інші вітки працюють. Чому так? А чому лампи в гірлянді, які розраховані на напругу 10 В, не виходять з ладу незважаючи на те, що напруга в мережі 220 В?

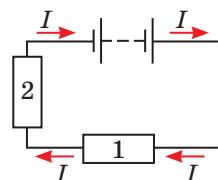
Сподіваємося, що ви пам'ятаєте курс фізики 8-го класу і розумієте, що річ у з'єднанні ламп. Згадаємо види з'єднання провідників та основні властивості цих з'єднань.

## 1

### Послідовне з'єднання провідників

З'єднання провідників називають **послідовним**, якщо воно не містить розгалужень, тобто провідники розташовані послідовно один за одним (рис. 2.1). Зрозуміло, що таким чином можна з'єднати будь-яку кількість провідників.

Як приклад розглянемо ділянку кола, яка містить два послідовно з'єднані резистори, а потім узагальнимо отримані співвідношення для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників.



**Рис. 2.1.** Схема електричного кола, яке містить послідовно з'єднані провідники

Сила струму $I$	Напруга $U$	Опір $R$
Сила струму в послідовно з'єднаних провідниках однакова і дорівнює загальний силі струму в ділянці кола:	$U = U_1 + U_2$	Загальний опір послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі опорів цих провідників:
$I_1 = I_2 = I$		$R = R_1 + R_2$
Дійсно, коло з послідовним з'єднанням провідників не містить розгалужень, тому заряд, який проходить через поперечний переріз будь-якого провідника за деякий час $t$ , буде однаковим: $q_1 = q_2 = q$ . Поділивши цю рівність на $t$ , отримаємо: $\frac{q_1}{t} = \frac{q_2}{t} = \frac{q}{t}$ .		
За означенням сили струму: $q/t = I$ . Отже, маємо: $I_1 = I_2 = I$ .		Дійсно, для послідовного з'єднання справді джуриться рівність $U = U_1 + U_2$ , тобто відповідно до закону Ома: $IR = I_1R_1 + I_2R_2$ . Оскільки $I_1 = I_2 = I$ , отримуємо: $IR = IR_1 + IR_2$ . Після скорочення на $I$ маємо: $R = R_1 + R_2$ .
Узагальнимо наведені співвідношення для $n$ послідовно з'єднаних провідників:		
$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

**Зверніть увагу:**

- загальний опір провідників, з'єднаних послідовно, більший за опір кожного із цих провідників;
- загальний опір послідовно з'єднаних провідників опором  $R_0$  кожен дорівнює:  $R = nR_0$ , де  $n$  — кількість провідників.

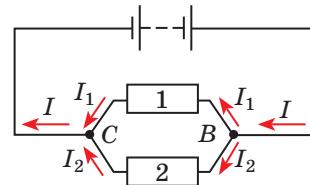


Поясніть, чому лампи в ялинковій гірлянді, які розраховані на напругу 10 В, не виходять із ладу незважаючи на те, що напруга в мережі 220 В.

**2****Паралельне з'єднання провідників**

**З'єднання провідників називають паралельним, якщо для проходження струму є два чи більше шляхів — віток, а всі ці вітки мають одну пару спільних точок — вузлів (рис. 2.2). У вузлах (вузлових точках) відбувається розгалуження кола (у кожному вузлі з'єднуються не менш ніж три проводи). Отже, розгалуження є характерною ознакою кола з паралельним з'єднанням провідників.**

Розглянемо ділянку кола, яка містить два паралельно з'єднані резистори.



**Рис. 2.2.** Схема електричного кола, яке містить паралельно з'єднані провідники.  $B$  і  $C$  — вузлові точки (вузли)

Сила струму $I$	Напруга $U$	Опір $R$
У разі паралельного з'єднання провідників сила струму в нерозгалужений частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях (окремих вітках): $I = I_1 + I_2$	Загальна напруга на ділянці кола та напруга на кожному із паралельно з'єднаних провідників є однаковими: $U = U_1 = U_2$	Величина, обернена до загального опору розгалуженої ділянки кола, дорівнює сумі величин, кожна з яких обернена до опору відповідної вітки цього розгалуження: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
Дійсно, у вузловій точці струм розтікається по двох вітках. Заряд у вузловій точці не накопичується, тому заряд $q$ , який надійшов у вузол за деякий час $t$ , дорівнює сумі зарядів, які вийшли із цього вузла за той самий час: $q = q_1 + q_2$ . Поділимо обидві частини рівності на $t$ і візьмемо до уваги, що $q/t = I$ . Маємо: $\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} + \frac{q_2}{t}$ , або $I = I_1 + I_2$ .		
Узагальнимо наведені співвідношення для $n$ паралельно з'єднаних провідників: $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$		
$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$		
$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$		

**Зверніть увагу:**

- загальний опір паралельно з'єднаних провідників менший від опору кожного із цих провідників;
- загальний опір паралельно з'єднаних провідників опором  $R_0$  кожний дорівнює:  $R = \frac{R_0}{n}$ , де  $n$  — кількість провідників;
- опір двох паралельно з'єднаних провідників дорівнює:  $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ .

?

Доведіть останні два твердження, скориставшись співвідношеннями для паралельно з'єднаних провідників.

### 3 Для чого потрібні шунти і додаткові опори

Як і будь-які прилади, амперметр і вольтметр мають *верхню межу вимірювання* — найбільше значення фізичної величини, яку можна виміряти даним приладом. Але якщо до амперметра чи вольтметра приєднати резистор певного опору, то межі вимірювання цих приладів можна збільшити.

Шунт	Додатковий опір
<p><b>Шунт</b> — резистор, який паралельно приєднують до амперметра з метою збільшити верхню межу вимірювання амперметра.</p> <p>У разі застосування шунта струм у колі розділяється на дві частини: одна частина йде на амперметр, друга — на шунт: <math>I = I_A + I_{\text{ш}}</math>. Дізнаємося, який шунт необхідно приєднати паралельно амперметру, щоб збільшити верхню межу вимірювання амперметра в <math>n</math> разів: <math>I = nI_A</math>. Оскільки <math>I = I_A + I_{\text{ш}}</math>, то <math>nI_A = I_A + I_{\text{ш}}</math>, або <math>I_{\text{ш}} = I_A(n - 1)</math>. Напруга на шунті й амперметрі однакова, тому відповідно до закону Ома маємо: <math>\frac{U}{R_{\text{ш}}} = \frac{U}{R_A}(n - 1) \Rightarrow \frac{1}{R_{\text{ш}}} = \frac{n - 1}{R_A}</math>. Отже, необхідний опір шунта обчислюють за формулою:</p> $R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n - 1}$	<p><b>Додатковий опір</b> — резистор, який послідовно приєднують до вольтметра з метою збільшити верхню межу вимірювання вольтметра.</p> <p>У разі застосування додаткового опору напруга розподілиться між вольтметром і додатковим опором: <math>U = U_V + U_d</math>. Дізнаємося, який додатковий опір необхідно приєднати послідовно з вольтметром, щоб збільшити верхню межу вимірювання вольтметра в <math>n</math> разів: <math>U = nU_V</math>. Оскільки <math>U = U_V + U_d</math>, то <math>nU_V = U_V + U_d</math>, або <math>U_d = U_V(n - 1)</math>. Сила струму в резисторі і вольтметрі однакова, тому відповідно до закону Ома маємо: <math>I_V R_d = I_V R_V(n - 1)</math>. Отже, необхідний додатковий опір обчислюють за формулою:</p> $R_d = R_V(n - 1)$

**Зверніть увагу!** У скільки разів зростає верхня межа вимірювання приладу, у стільки разів зростає ціна поділки його шкали.

**4****Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** Ділянка кола складається з однакових резисторів опором 8 Ом кожен (схема 1). На ділянку подано напругу 31,2 В. Визначте загальний опір ділянки, напругу на резисторі 2, силу струму в резисторах 1 і 6.

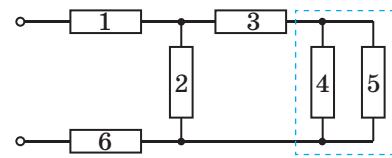


Схема 1

**Аналіз фізичної проблеми.** Електричне коло містить змішане з'єднання провідників. Тому будемо покроково спрощувати подану схему 1 і, користуючись законом Ома та співвідношеннями для послідовного і для паралельного з'єднань провідників, знаходити значення шуканих величин.

**Дано:**

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = \\ &= R_3 = R_4 = \\ &= R_5 = R_6 = \\ &= R_0 = 8 \text{ Ом} \\ U &= 31,2 \text{ В} \end{aligned}$$

 **$R$  — ?** **$U_2$  — ?** **$I_1$  — ?** **$I_6$  — ?****Пошук математичної моделі, розв'язання.**

Резистори 4 і 5 однакові та з'єднані паралельно, тому  $R_{4,5} = \frac{R_0}{2} = \frac{8 \text{ Ом}}{2} = 4 \text{ Ом}$ .

Отже, у схемі 1 можемо замінити резистори 4 і 5 одним резистором, опір якого  $R_{4,5} = 4 \text{ Ом}$ . Тоді вихідна схема набуде вигляду схеми 2.

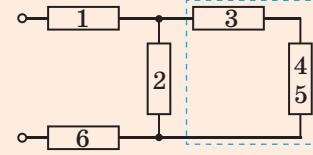


Схема 2

У схемі 2 послідовно з'єднані резистори 3 і 4,5 замінено резистором 3,4,5 опором  $R_{3,4,5} = R_3 + R_{4,5} = 8 + 4 = 12 \text{ (Ом)}$  і отримаємо схему 3.

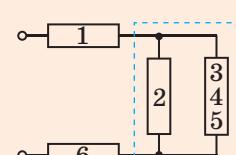


Схема 3

У схемі 3 паралельно з'єднані резистори 2 і 3,4,5 замінено резистором опором  $R_{2,3,4,5} = \frac{R_2 \cdot R_{3,4,5}}{R_2 + R_{3,4,5}} = \frac{8 \cdot 12}{8 + 12} = 4,8 \text{ (Ом)}$  і отримаємо схему 4, де резистори з'єднані послідовно.

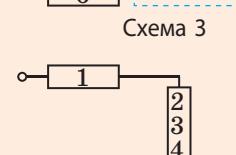


Схема 4

Загальний опір ділянки:

$$R = R_1 + R_{2,3,4,5} + R_6 = 8 + 4,8 + 8 = 20,8 \text{ (Ом)}$$

$$\text{Відповідно до закону Ома: } I = \frac{U}{R} = \frac{31,2}{20,8} = 1,5 \text{ (A).}$$

Проаналізувавши схеми 3 і 4, доходимо висновків:

$$I_1 = I_{2,3,4,5} = I_6 = I = 1,5 \text{ A}; \quad U_2 = U_{2,3,4,5} = I \cdot R_{2,3,4,5} = 1,5 \cdot 4,8 = 7,2 \text{ (B).}$$

Відповідь:  $R = 20,8 \text{ Ом}; \quad U_2 = 7,2 \text{ В}; \quad I_1 = 1,5 \text{ A}; \quad I_6 = 1,5 \text{ A}$ .**Підбиваємо підсумки**

- Якщо ділянка кола містить  $n$  послідовно з'єднаних провідників:
  - сила струму в усіх провідниках є однаковою і дорівнює загальній силі струму в ділянці:  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ ;
  - напруга на ділянці дорівнює сумі напруг на окремих провідниках:  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ ;
  - опір ділянки дорівнює сумі опорів провідників:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .
- Якщо ділянка кола містить  $n$  паралельно з'єднаних провідників:
  - напруга на всіх провідниках є однаковою і дорівнює напрузі на ділянці:  $U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$ ;

— загальна сила струму в ділянці дорівнює сумі сил струмів в окремих провідниках:  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ ;

— опір ділянки можна визначити з формули:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ .

- Для збільшення верхньої межі вимірювання до амперметра паралельно приєднують шунт, а до вольтметра послідовно приєднують додатковий опір.

### Контрольні запитання



1. Яке з'єднання провідників називають послідовним? Які співвідношення справджаються для цього з'єднання? Доведіть їх.
2. Яке з'єднання провідників називають паралельним? Які співвідношення справджаються для цього з'єднання? Доведіть їх.
3. Як можна збільшити верхню межу вимірювання вольтметра?
4. У якому випадку і як шунтують амперметри?

### Вправа № 2



1. Розгляніть рис. 1 і визначте: які прилади зображені; для вимірювання якої фізичної величини призначений кожен прилад; якою є верхня межа вимірювання кожного приладу.
2. Як, на вашу думку, з'єднані лампи в одній вітці ялинкової гірлянди? з'єднані різні вітки гірлянди? Для чого в гірляндах застосовують кілька віток ламп?
3. Чому споживачі електричного струму, якими ми користуємося в побуті, зазвичай розраховані на однакову напругу (220 В)?
4. Два резистори опорами 2 і 3 Ом приєднали до джерела струму, напруга на виході якого 12 В. Визначте силу струму в кожному резисторі та загальну силу струму в колі, якщо резистори з'єднані: а) послідовно; б) паралельно.
5. Визначте загальний опір  $R$  ділянки кола (рис. 2), якщо  $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3$  Ом,  $R_3 = 20$  Ом,  $R_4 = 24$  Ом. Чому дорівнює сила струму в кожному резисторі, якщо до ділянки кола прикладена напруга 36 В?
6. До ділянки кола, яка містить два резистори, подано напругу 24 В. Коли резистори з'єднані послідовно, сила струму в ділянці дорівнює 0,6 А, а коли паралельно — 3,2 А. Визначте опір кожного резистора.
7. Міліамперметр зі шкалою, розрахованою на 20 мА, треба використати для вимірювання сили струму 1 А. Обчисліть опір шунта, якщо опір міліамперметра 4,9 Ом.
8. Коли в ділянці кола (рис. 3) ключ замкнено, сила струму, який проходить через амперметр, дорівнює 0,45 А. Якої сили струм проходитиме через амперметр, якщо ключ розімкнути? Опори резисторів 1 і 3 та 2 і 4 попарно однакові й дорівнюють  $R$  і  $2R$  відповідно. Напруга на клемах є незмінною. Амперметр вважайте ідеальним (тобто опір амперметра  $R_A = 0$ ).



Рис. 1

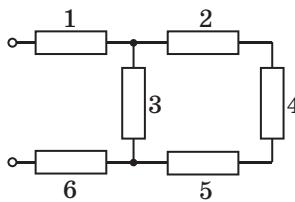


Рис. 2

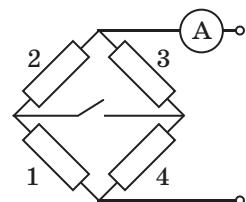


Рис. 3

## § 3. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА



Зараз електричний струм використовується практично всюди. Різноманітні побутові електроприлади, електричне обладнання автомобілів, хімічна промисловість, медицина, засоби зв'язку... Кожен із вас може навести кілька десятків пристроїв, дія яких ґрунтуються на використанні електричної енергії, яка в цих пристроях перетворюється на інші види енергії. Електричне поле при цьому виконує роботу, яку називають *роботою струму*. Згадаємо, як її визначити.

### 1

### Як визначити роботу і потужність електричного струму

Розглянемо ділянку кола, на яку подано напругу  $U$  і в якій тече постійний електричний струм силою  $I$ . Це може бути будь-який провідник: обмотка електродвигуна, стовп іонізованого газу в лампі денного світла, спіраль нагрівального елемента праски тощо. Якщо за деякий час  $t$  через поперечний переріз провідника проходить заряд  $q$ , то електричне поле виконує роботу  $A = qU$ .

Подавши заряд  $q$  через силу струму  $I$  і час  $t$  ( $q = It$ ), отримаємо формулу для розрахунку роботи електричного струму на даній ділянці кола:

$$A = UIt$$

*Одиниця роботи струму в СІ — джоуль:*

$$[A] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} (1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}).$$

В електротехніці використовують *позасистемну* одиницю роботи струму — **кіловат-годину**:  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$  ( $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ ). Саме в таких одиницях подає роботу струму *лічильник електричної енергії* (рис. 3.1).

На електролічильнику наявні значення ще трьох фізичних величин. Одна з них показує, до кола з якою напругою слід приєднувати електролічильник, друга — максимально допустиму силу струму в приладі, третя — частоту змінного струму в мережі (див. § 19). За значеннями перших двох величин визначають максимально допустиму *потужність споживачів*, які можна підключити через електролічильник.

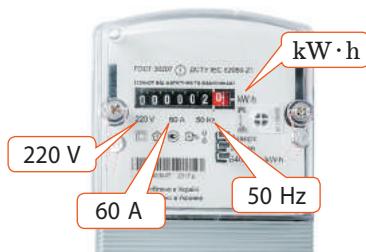


Рис. 3.1. Лічильник електричної енергії — прилад для прямого вимірювання роботи струму

**Потужність струму  $P$**  — фізична величина, яка чисельно дорівнює роботі струму за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t},$$

де  $A$  — робота, виконана струмом за час  $t$ .

Урахувавши, що  $A = UIt$ , маемо:

$$P = UI,$$

де  $U$  — напруга на ділянці кола, на якій визначають потужність струму;  $I$  — сила струму в ділянці.

Одиниця потужності струму в СІ — ват:

$$[P] = 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \left( 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \right).$$

**Зверніть увагу!** Наведені формули завжди справджаються для постійного струму і мають певні межі застосування в разі змінного струму (див. § 20).



На яку максимальну потужність розрахованій електролічильник на рис. 3.1?

2

## Закон Джоуля — Ленца

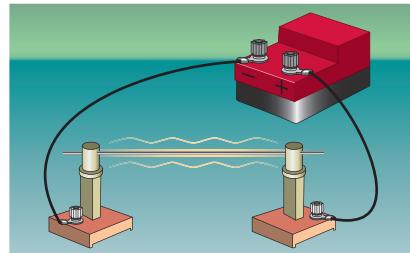
Будь-який провідник під час проходження струму нагрівається (рис. 3.2). Це відбувається тому, що вільні заряджені частинки в провіднику розганяються електричним полем і, зіштовхуючись з іншими частинками, передають їм частину своєї кінетичної енергії. Унаслідок цього внутрішня енергія провідника збільшується — провідник нагрівається.

Зрозуміло, що температура провідника зі струмом не може зростати нескінченно, адже шляхом теплопередачі він віддає частину отриманої енергії навколошнім тілам. Що вища температура провідника, то більше енергії він віддає. Із часом кількість теплоти, що виділяється в провіднику, дорівнюватиме кількості теплоти, яка віддається довкіллю, і провідник припинить нагріватися.

Закон, що визначає кількість теплоти, яка виділяється в провіднику зі струмом і яку він віддає довкіллю, незалежно один від одного експериментально встановили англійський фізик *Джеймс Прескотт Джоуль* (1818–1889) і російський фізик *Емілій Християнович Ленц* (Генріх Ленц) (1804–1865). Згодом цей закон отримав назву **закон Джоуля — Ленца**:

Кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна квадрату сили струму  $I$ , опору  $R$  провідника та часу  $t$  проходження струму:

$$Q = I^2 R t$$



**Рис. 3.2.** Якщо в металевому дроті пропускати електричний струм, дрот нагріється; незначно нагріваються і підвідні проводи

**Зверніть увагу!**

■ Роботу постійного струму завжди можна визначити за формuloю:

$$A = UIt.$$

■ Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику, завжди можна визначити за формuloю:

$$Q = I^2 R t.$$

■ Якщо ділянка кола містить тільки споживачі, в яких вся електрична енергія витрачається лише на нагрівання (реєстори, нагрівальні елементи тощо), робота струму дорівнює кількості теплоти. У цьому випадку і роботу струму, і кількість теплоти можна визначити за будь-якою з таких формул:

$$A = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = Q,$$

а потужність струму — за будь-якою з таких формул:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Формули  $A = I^2 R t = Q$ ,  $P = I^2 R$  зручно використовувати, якщо провідники з'єднані послідовно (сила струму в провідниках однакова).

Формули  $A = \frac{U^2}{R} t = Q$ ,  $P = \frac{U^2}{R}$  зручно використовувати, якщо провідники з'єднані паралельно (напруга на провідниках однакова).



**Рис. 3.3.** Основна частина будь-якого нагрівального пристрою — нагрівальний елемент, який являє собою виготовлений із тугоплавкого матеріалу з великим питомим опором провідник, що має невелику площину поперечного перерізу з підвідними проводами

Проаналізувавши закон Джоуля — Ленца, доходимо висновку: якщо в різних ділянках кола сила струму однаакова, то в ділянці, що має більший опір, виділяється більша кількість теплоти. Отже, збільшивши опір певної ділянки кола, можна досягти того, що майже вся теплота буде виділятися саме тут. Так працюють електронагрівальні пристрої (рис. 3.3), нагрівальний елемент яких має невелику площину поперечного перерізу і виготовлений із матеріалу з великим питомим опором (ніхром, константан). А от підвідні проводи, навпаки, мають порівняно велику площину поперечного перерізу і виготовлені із матеріалу з малим питомим опором (мідь, алюміній, сталь). Унаслідок цього опір підвідних проводів набагато менший, ніж опір нагрівального елемента, і тому вони майже не нагріваються.



Чому можна стверджувати, що сила струму в проводах під'єднувального шнура електронагрівального пристрою дорівнює силі струму в нагрівальному елементі?

### 3

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Електродвигун дитячого електромобіля живиться від батареї акумуляторів, напруга на виході якої є незмінною і становить 12 В. Сила струму в обмотці двигуна — 6 А. Визначте опір обмотки, якщо ККД двигуна 80 %. Втратами енергії на тертя знехтуйте.

**Аналіз фізичної проблеми.** Для розв'язання задачі скористаємося формулою для визначення ККД. Втратами енергії на тертя нехтуємо, тому електрична енергія (вона дорівнює роботі струму) витрачається на корисну (механічну) роботу та нагрівання обмотки двигуна внаслідок проходження струму:  $A_{\text{повна}} = A_{\text{кор}} + Q$ .

**Дано:**

$$U = 12 \text{ В}$$

$$I = 6 \text{ А}$$

$$\eta = 80\% = 0,8$$

**R — ?**

**Пошук математичної моделі, розв'язання.**

$$\text{За означенням ККД: } \eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}.$$

Оскільки  $A_{\text{повна}} = UIt$ , а  $A_{\text{кор}} = A_{\text{повна}} - Q$ , де  $Q = I^2Rt$  за законом Джоуля — Ленца, то  $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}} = \frac{A_{\text{кор}}}{UIt} = \frac{UIt - I^2Rt}{UIt}$ . Після скорочення на  $It$  маємо:  $\eta = \frac{U - IR}{U}$ . Звідси отримаємо формулу для визначення опору обмотки:  $R = \frac{U(1 - \eta)}{I}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[R] = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}; R = \frac{12 \cdot (1 - 0,8)}{6} = 0,4 \text{ (Ом)}.$$

**Відповідь:**  $R = 0,4 \text{ Ом}$ .



## Підбиваємо підсумки

- Робота струму на ділянці кола дорівнює добутку напруги на ділянці, сили струму в ділянці та часу, за який визначається робота:  $A = UIt$ .
- Потужність струму чисельно дорівнює роботі струму за одиницю часу:  $P = \frac{A}{t} = UI$ .
- Кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму:  $Q = I^2Rt$  (закон Джоуля — Ленца).



## Контрольні запитання

1. За якою формулою обчислюють роботу струму? Якими є одиниці роботи струму?
2. Доведіть, що  $1 \text{ кВт}\cdot\text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .
3. Сформулюйте закон Джоуля — Ленца. Чому він має таку назву?
4. Які формулі для розрахунку кількості теплоти, що виділяється в провіднику під час проходження струму, ви знаєте? Чи завжди можна ними користуватися?
5. Дайте характеристику потужності струму як фізичної величини.



## Вправа № 3

1. Дві лампи з'єднані паралельно і підключені до джерела струму, напруга на виході якого становить 220 В. Фактична потужність ламп — 6 і 10 Вт. Визначте: а) опір кожної лампи; б) силу струму в лампах; в) енергію, яку разом споживають лампи за 2 години.
2. Як зміниться яскравість світіння лампи розжарювання, якщо повзунок реостата пересунути ліворуч (рис. 1)? Обґрунтуйте свою відповідь.
3. За даними рис. 2 визначте: а) опір нагрівального елемента бойлера; б) силу струму в нагрівальному елементі; в) час, за який бойлер нагріває 10 л води від 20 до 70 °С. ККД бойлера — 90 %; питома теплоємність води — 4200 Дж/(кг·°С).
4. Якою є сила струму в обмотці двигуна електричного підйомника, якщо платформу з вантажем загальною масою 240 кг він підіймає на висоту 6 м за 50 с? ККД підйомника — 60 %, напруга на клемах — 48 В.
5. Дві електроплити, спіралі яких мають однакові опори, спочатку ввімкнули в мережу послідовно, а потім паралельно. У якому випадку електроплити споживали більшу потужність і в скільки разів?
6. Дізнайтесь про будову одного із сучасних нагрівників води. Які особливості його конструкції дозволяють швидко нагрівати воду, зберігати її теплою, своєчасно вмикати і вимикати струм? Складіть 2–3 завдання про цей пристрій і виконайте їх.

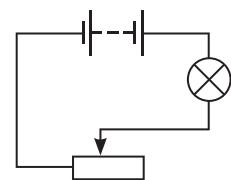


Рис. 1



Рис. 2



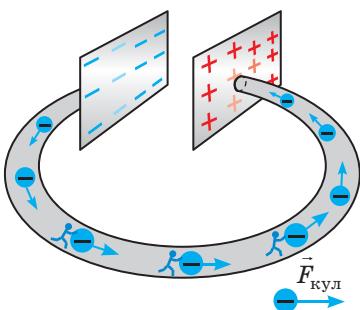
## Експериментальне завдання

Визначте ККД електричного чайника, яким користуєтесь ви або ваші знайомі.

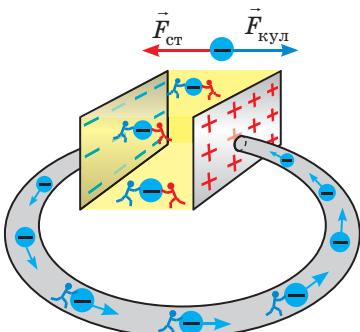
## § 4. ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА



Кожен із вас, напевно, не раз купував батарейки або акумулятори. На найпоширеніших із них написано: 1,5 В. А чи знаєте ви, що це означає? Не кваптеся з відповіддю, доки не прочитаєте цей параграф!



**Рис. 4.1.** Під дією кулонівських сил електрони рухаються в провіднику від негативно зарядженої пластини до позитивно зарядженої, внаслідок чого пластини втрачають заряд (стають електрично нейтральними)



**Рис. 4.2.** Усередині джерела струму завдяки дії сторонніх сил  $\vec{F}_{\text{ст}}$  негативні заряди переміщуються від позитивного полюса до негативного, тобто в напрямку, протилежному напрямку кулонівських сил, які також діють усередині джерела

### 1

#### Які сили називають сторонніми

Якщо на кінцях металевого дроту створити різницю потенціалів, наприклад приєднати кінці дроту до пластин зарядженого конденсатора, то під дією кулонівських сил  $\vec{F}_{\text{koul}}$  електрони всередині провідника почнуть рухатися напрямлено і в провіднику виникне електричний струм. Але такий струм швидко припиниться (рис. 4.1).

Щоб струм існував тривалий час, необхідно якимось чином безперервно «перетягувати» електрони на негативно заряджену пластину. Таке «перетягування» не може відбуватися під дією кулонівських сил, які, навпаки, заважають рухові електронів, адже однайменні заряди відштовхуються. Слід використати сили іншого — не електростатичного (не кулонівського) — походження.

Будь-які сили, що діють на електрично заряджені частинки і не є кулонівськими, називають **сторонніми силами**.

Сторонні сили «працюють», наприклад, усередині джерела струму (рис. 4.2). Природа сторонніх сил може бути різною: вони можуть виникати внаслідок хімічних реакцій (у гальванічних елементах і акумуляторах), під час змінення магнітного поля (в електромагнітних генераторах, електричних двигунах), завдяки дії світла (у фотоелементах, світлодіодах) тощо.

Якщо приєднати споживач до джерела струму, отримаємо **повне електричне коло** (рис. 4.3). *На внутрішній ділянці цього кола «працюють» сторонні сили, які підтримують постійну різницю потенціалів на виході джерела. На зовнішній ділянці кулонівські сили створюють напрямлений рух вільних заряджених частинок — у споживачі та в з'єднувальних проводах тече постійний електричний струм.*

Дія сторонніх сил подібна до дії помпи, яка змушує воду рухатися в напрямку, протилежному силі тяжіння, і підніматися на певну висоту. А от уніз вода рухається під дією сили тяжіння, подібно до того як під дією кулонівських сил рухаються вільні електрони в зовнішній ділянці електричного кола (рис. 4.4).

Розгляніть рис. 4.4. Визначте, що є механічним аналогом джерела струму; з'єднувальних проводів; споживача струму.

## 2 Електрорушійна сила

Перетягуючи заряди всередині джерела струму, сторонні сили виконують певну роботу. Роботу сторонніх сил характеризує *електрорушійна сила (ЕРС)\**, яка є основною характеристикою джерела струму.

**Електрорушійна сила**  $\mathcal{E}$  джерела струму — скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості джерела струму і дорівнює відношенню роботи сторонніх сил  $A_{\text{ст}}$  із переміщенням позитивного заряду  $q$  всередині джерела до значення цього заряду:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$

Одиниця ЕРС у СІ — вольт:  $[\mathcal{E}] = 1 \text{ В (V)}$ .

ЕРС джерела струму дорівнює 1 В, якщо сторонні сили всередині джерела виконують роботу 1 Дж, переміщуючи заряд +1 Кл від негативного поляса цього джерела до позитивного.

Яку роботу виконали сторонні сили всередині джерела, зображеного на рис. 4.5, якщо під час телефонної розмови по колу перемістився заряд +5 Кл?

## 3 Закон Ома для повного кола

Розглянемо найпростіше повне замкнене електричне коло (рис. 4.6). Зовнішня ділянка цього кола (з'єднувальні проводи і нагрівник) має опір  $R$ . Внутрішня ділянка кола (джерело

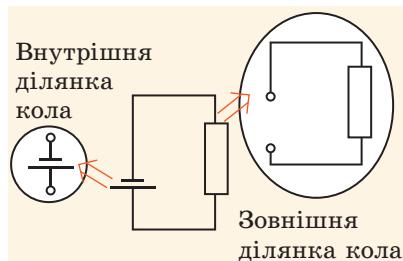


Рис. 4.3. Повне коло складається із двох ділянок — внутрішньої (джерело струму) і зовнішньої (споживач + з'єднувальні проводи)

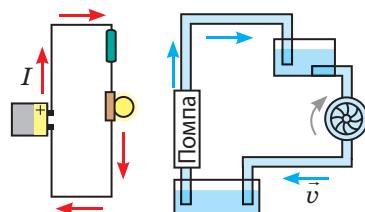


Рис. 4.4. Аналогія між електричним струмом і пливом рідини



Рис. 4.5. Літій-йонна акумуляторна батарея телефона. ЕРС батареї зазначенено на її поверхні

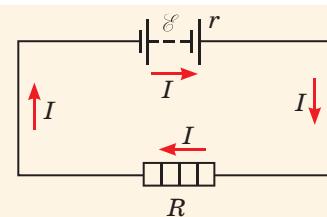


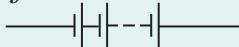
Рис. 4.6. Споживач і джерело струму з'єднані послідовно, тому сила струму в них є однаковою

\* Зазначимо, що назва цієї фізичної величини дещо невдала: електрорушійна сила є роботою, а не силою у звичайному, «механічному», розумінні. Проте цей термін усталився.

**Зверніть увагу!**

Для вирішення різноманітних електротехнічних завдань джерела струму з'єднують у батареї.

■ Для збільшення загальної ЕРС використовують батарею послідовно з'єднаних джерел струму:

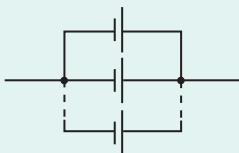


У разі послідовного з'єднання  $n$  однакових джерел струму, кожне з яких має ЕРС  $\mathcal{E}_0$  і внутрішній опір  $r_0$ , загальна ЕРС батареї збільшується:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n = n\mathcal{E}_0.$$

Разом із тим збільшується і внутрішній опір батареї:  $r = nr_0$ , тому послідовне з'єднання застосовують, коли внутрішній опір джерел набагато менший від зовнішнього опору кола.

■ Якщо внутрішній опір джерела порівнянний або більший за зовнішній опір кола, то загальний внутрішній опір можна зменшити, якщо використати батарею паралельно з'єднаних джерел струму:



У разі паралельного з'єднання  $n$  однакових джерел струму, кожне з яких має ЕРС  $\mathcal{E}_0$  і внутрішній опір  $r_0$ , ЕРС батареї не змінюється:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$ , а внутрішній опір зменшується в  $n$  разів:  $r = \frac{r_0}{n}$ .



Як з'єднати джерела струму, якщо необхідно одночасно збільшити ЕРС і зменшити внутрішній опір? До речі, так побудовані «джерела струму» в «батареї» електричного ската.

струму) має ЕРС і опір  $r$  (опір електроліту й електродів). *Опір джерела струму називають внутрішнім опором джерела.*

Якщо сила струму в колі дорівнює  $I$ , то відповідно до закону Джоуля — Ленца за час  $t$  на зовнішній і внутрішній ділянках кола разом виділиться певна кількість теплоти:  $Q = I^2Rt + I^2rt$ . З'ясуємо, звідки береться ця енергія.

У колі одночасно «працюють» і кулонівські, і сторонні сили:  $A = A_{\text{кул}} + A_{\text{ст}}$ . Проте кулонівські сили є потенціальними — їхня робота на замкненому контурі дорівнює нулю:  $A_{\text{кул}} = 0$  (на зовнішній ділянці кола кулонівські сили виконують додатну роботу, на внутрішній ділянці — від'ємну). Отже, енергія виділяється тільки завдяки роботі сторонніх сил:  $Q = A_{\text{ст}}$ .

Оскільки  $A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q$ , а  $q = It$ , отримаємо:  $I^2Rt + I^2rt = \mathcal{E}It$ . Після скорочення на  $It$  отримаємо:  $I(R+r) = \mathcal{E}$ , де  $R+r$  — повний опір кола. З останньої рівності маємо закон Ома для повного кола:

**Сила струму в повному електричному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму до повного опору кола:**

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

**4**

**Що таке коротке замикання**

Щороку в Україні виникає понад 40 тис. пожеж, і дуже часто їхньою причиною є коротке замикання.

**Коротким замиканням** називають з'єднання кінців ділянки кола, яка перебуває під напругою, провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором цієї ділянки.

Коротке замикання може відбутися внаслідок порушення ізоляції, якщо два огорнені проводи, приєднані до споживача, торкнуться один одного, або під час ремонту елементів кола, які перебувають під напругою (*нагадуємо: це смертельно небезпечно!*).

Під час короткого замикання сила струму в колі збільшується в кілька разів, що згідно із законом Джоуля — Ленца призводить до значного нагріву проводів і як наслідок — до пожежі. Саме тому *електрична проводка повинна обов'язково містити запобіжники* — пристрой для розмикання кола в разі надмірного збільшення сили струму.

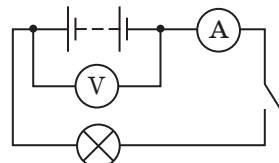
Підключення до джерела струму провідника з дуже малим опором ( $R \rightarrow 0$ ) теж спричиняє коротке замикання. Сила струму короткого замикання є максимальною для даного джерела та визначається за формулою:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

де  $\mathcal{E}$  — ЕРС джерела струму;  $r$  — внутрішній опір джерела.

## 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** До батареї гальванічних елементів приєднали лампу розжарювання, ключ, амперметр і вольтметр (див. рисунок). Спочатку ключ був розімкнений, а показ вольтметра — 5,6 В. Після того як ключ замкнули, показ вольтметра став 4,8 В, а амперметра — 0,8 А. Визначте ЕРС і внутрішній опір джерела струму, а також ККД джерела при цьому навантаженні. Прилади вважайте ідеальними.



Дано:

$$U_1 = 5,6 \text{ В}$$

$$U_2 = 4,8 \text{ В}$$

$$I_2 = 0,8 \text{ А}$$

$\mathcal{E} = ?$

$r = ?$

$\eta = ?$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

Запишемо закон Ома для повного кола  $(I = \frac{\mathcal{E}}{R+r})$  у вигляді:  $\mathcal{E} = I(R+r) = IR + Ir$ . Оскільки  $IR = U$ , отримаємо:

$$\mathcal{E} = U + Ir. \quad (*)$$

1) Якщо ключ розімкнений, а вольтметр ідеальний ( $R_V \rightarrow \infty$ ), сила струму в колі дорівнює нулю ( $I = 0$ ) і формула (\*) набуває вигляду:  $\mathcal{E} = U$ .

Отже,  $\mathcal{E} = U_1 = 5,6 \text{ В}$ .

2) ЕРС і внутрішній опір джерела не залежать від навантаження, тому, знаючи ЕРС, напругу і силу струму в колі при замкненому ключі та скориставшись формuloю (\*), визначимо внутрішній опір джерела:

$$\mathcal{E} = U + Ir \Rightarrow r = \frac{\mathcal{E} - U}{I}; \quad r = \frac{\mathcal{E} - U_2}{I_2} = \frac{5,6 \text{ В} - 4,8 \text{ В}}{0,8 \text{ А}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом.}$$

3) За означенням ККД:  $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}$ , де  $A_{\text{повна}} = \mathcal{E}It$  — робота сторонніх сил усередині джерела струму;  $A_{\text{кор}} = UIt$  — робота струму на зовнішній ділянці кола.

$$\text{Остаточно маємо: } \eta = \frac{UIt}{\mathcal{E}It} = \frac{U}{\mathcal{E}}; \quad \eta = \frac{U_2}{\mathcal{E}} = \frac{4,8 \text{ В}}{5,6 \text{ В}} = \frac{6}{7} \approx 0,86.$$

**Аналіз результатів.** Бачимо, що ККД джерела струму залежить від навантаження. І це дійсно так: зі зменшенням зовнішнього опору збільшується сила струму в колі, а отже, збільшується й кількість теплоти, що виділяється в джерелі, тобто витрачається марно.

**Відповідь:**  $\mathcal{E} = 5,6 \text{ В}$ ;  $r = 1 \text{ Ом}$ ;  $\eta = 86 \%$ .



## Підбиваємо підсумки

- Будь-які сили, що діють на електрично заряджені частинки і не є кулонівськими, називають сторонніми силами. Саме сторонні сили, «працюючи» всередині джерела струму, підтримують напругу на його полюсах.
- Основна енергетична характеристика джерела струму — електро-рушійна сила (ЕРС) — скалярна фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи сторонніх сил  $A_{ct}$  з переміщення позитивного заряду  $q$  всередині джерела до значення цього заряду:  $\mathcal{E} = \frac{A_{ct}}{q}$ .
- Сила струму в повному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму до повного опору кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , де  $R$  і  $r$  — опір зовнішньої і внутрішньої ділянок кола відповідно. Це твердження є законом Ома для повного кола.

## Контрольні запитання



1. Що називають сторонніми силами?
2. Охарактеризуйте ЕРС як фізичну величину.
3. Скориставшись законом збереження енергії, законом Джоуля — Ленца та означеннями ЕРС і сили струму, отримайте закон Ома для повного кола. Сформулюйте цей закон.
4. Що називають коротким замиканням? Наведіть приклади.
5. Як розрахувати силу струму короткого замикання?
6. Як і чому ККД джерела струму залежить від навантаження?



## Вправа № 4

Якщо не зазначено інше, опором з'єднувальних проводів нехтуйте.

1. До джерела струму з ЕРС 6 В і внутрішнім опором 2 Ом підключено резистор опором 10 Ом. Визначте: а) силу струму в колі; б) напругу на полюсах джерела струму.
2. До полюсів джерела струму з ЕРС 4 В підключили лампу опором 8 Ом, у результаті чого в колі встановилася сила струму 0,4 А. Визначте внутрішній опір джерела.
3. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали електричне коло (рис. 1). Коли обидва ключі замкнули, показ амперметра був 1,8 А. Після того як один ключ розімкнули, показ амперметра став 1 А. Які результати було отримано?
4. Визначте потужність, яку споживає кожен із трьох резисторів (рис. 2), і ККД джерела струму при цьому навантаженні, якщо ЕРС джерела 12 В, а його внутрішній опір — 6 Ом.
5. Дізнайтесь, як побудований електричний орган електричного ската (рис. 3) або електричного вугра, яку ЕРС він створює, якими є потужність його електричного розряду, сила струму та напруга під час розряду. Використавши отримані дані, складіть 2–3 задачі та розв'яжіть їх.

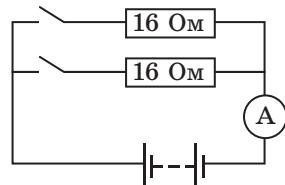


Рис. 1

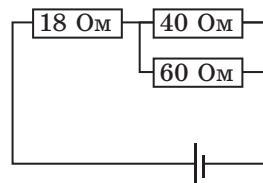


Рис. 2



Рис. 3



## § 5. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ



Вольфрамова нитка лампи розжарювання поступово тоншає через випаровування металу; врешті-решт у найтоншому місці нитка перегоряє. А чому лампа найчастіше перегоряє в той момент, коли її вмикають? Якщо ви не можете зараз відповісти на це запитання, поверніться до нього після опрацювання матеріалу параграфа.

### 1 Як рухаються електрони в металевому провіднику

У 1900 р., через три роки після відкриття електрона, німецький фізик Пауль Друде (1863–1906) запропонував *електронну теорію провідності металів*, відповідно до якої електрони в металах поводяться подібно до молекул ідеального газу. Зараз ця теорія має назву **класична електронна теорія**.

Згідно із класичною електронною теорією внутрішня будова металу являє собою утворену позитивно зарядженими іонами кристалічну ґратку, яка перебуває в «газі» вільних електронів. Якщо в металевому провіднику створити електричне поле, то на хаотичний рух електронів накладатиметься дрейф електронів у напрямку сили, що діє на електрони з боку електричного поля. Цей дрейф електронів і є **електричним струмом**.

**Електричний струм у металах** являє собою напрямлений рух вільних електронів.

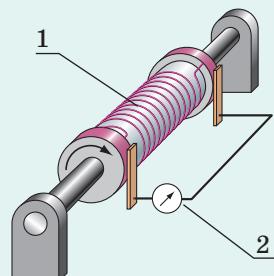
Уявімо модель руху електрона в металі, в якому створено електричне поле. Відповідно до класичної теорії електрон досить короткий час розганяється електричним полем, потім, зіткнувшись із позитивним іоном, змінює напрямок свого руху, потім знову набирає швидкості в напрямку дії поля, знову зіштовхується з іоном і т. д. Під час зіткнень електрон передає іону частину кінетичної енергії, здобуту внаслідок дії поля. Саме ці зіткнення «відповідають» за опір металу.

Визначимо *середню швидкість*  $\bar{v}$  *напрямленого руху електронів*. За інтервал часу  $t$  через переріз площею  $S$  провідника проходить  $N$  електронів:  $N = nS\bar{v}t$ , де  $n$  — концентрація

### Дослід

#### Стюарта — Толмена

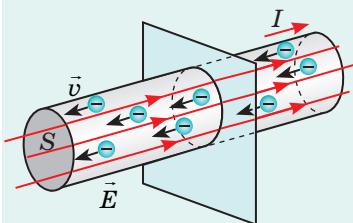
Якщо металевому провіднику (1) надати швидкого обертання, а потім різко зупинити, то вільні заряджені частинки рухатимуться за інерцією — в провіднику виникне коротковчасний електричний струм. За відхиленням стрілки гальванометра (2) можна виявити, заряди якого знаку створюють цей струм, а знаючи опір провідника, силу струму та лінійну швидкість обертання, дізнається, які саме частинки створюють струм.



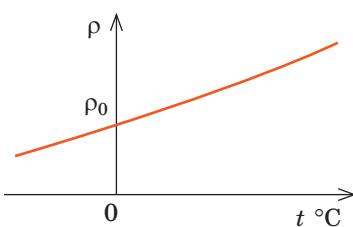
Такий дослід у 1916 р. здійснили американські вчені Річард Толмен (1881–1948) і Томас Стюарт (1890–1958). Вони експериментально довели, що електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

### Як швидко рухаються електрони

Середня швидкість хаотичного руху вільних електронів величезна — близько 300 км/с. Разом із тим середня швидкість їхнього напрямленого руху надзвичайно мала — кілька десятих міліметра за секунду. Чому ж, щойно ми натискаємо вмікач лампи, вона відразу спалахує? Річ у тім, що електричне поле поширяється в провіднику зі швидкістю 300 000 км/с. Завдяки дії поля вільні електрони, розташовані в будь-якій точці провідника, майже миттєво втягуються в напрямлений рух.



Оцініть, через який інтервал часу після ввімкнення плеєра ви почули б музику в навушниках, якби електричне поле поширювалось зі швидкістю напрямленого руху електронів.



**Рис. 5.1.** Графік залежності питомого опору металу від температури (лінійна ділянка). Зі збільшенням температури питомий опір металу збільшується

вільних електронів у провіднику. При цьому переноситься заряд  $q = N|e|$ . За означенням:

$$I = \frac{q}{t}. \text{ Отже, маємо:}$$

$$I = n|e|\bar{v}S \Rightarrow \bar{v} = \frac{I}{n|e|S}$$



Визначте середню швидкість напрямленого руху електронів у мідному проводі з перерізом 1  $\text{мм}^2$  за сили струму 1 А, якщо концентрація вільних електронів у міді  $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

### 2

### Як опір металів залежить від температури

Опір металевого провідника залежить не тільки від його геометричних розмірів і речовини, з якої він виготовлений, а й від температури (останнє обґрунтовано в квантовій теорії електропровідності металів). Досліди свідчать: якщо температура  $t$  металу є не надто низькою і не надто високою ( $t < t_{\text{плавл}}$ ), питомий опір металу та опір металевого провідника залежать від температури майже лінійно (рис. 5.1):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), R = R_0(1 + \alpha t),$$

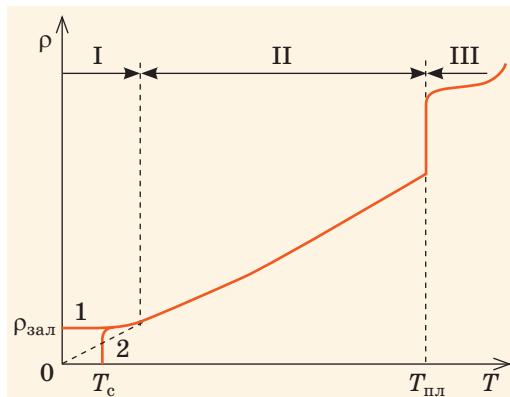
де  $\rho_0$ ,  $R_0$  — відповідно питомий опір і опір провідника за температури 0 °C;  $\rho$ ,  $R$  — відповідно питомий опір і опір провідника за температури  $t$ ;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт електричного опору.

**Температурний коефіцієнт електричного опору** — це фізична величина, яка характеризує залежність питомого опору речовини від температури.

Одиниця температурного коефіцієнта в СІ — обернений кельвін (кельвін у мінус першому степені):  $[\alpha] = \text{K}^{-1} (\text{K}^{-1})$ .

Для всіх металів  $\alpha > 0$ . Наприклад, температурний коефіцієнт електричного опору алюмінію становить 0,0038  $\text{K}^{-1}$  (див. Додаток 1).

Якщо температура металу зменшується, наближаючись до абсолютноного нуля (0 К, -273 °C), або збільшується, наближаючись до температури плавлення, то залежність  $\rho(t)$  вже не буде лінійною (рис. 5.2).



**Рис. 5.2.** Приближний графік зміни питомого опору металу в широкому діапазоні температур

### 3 Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений Гейке Камерлінг-Оннес (1853–1926), досліджуючи, як поводиться ртуть за температур, близьких до абсолютноного нуля, помітив дивне явище: в разі зниження температури ртути до 4,1 К її питомий опір стрибком падав до нуля.

Аналогічне явище спостерігалося з оловом, свинцем і низкою інших металів (рис. 5.3). Це явище назвали **надпровідністю**. Зараз відомо багато речовин і матеріалів, які за відповідної температури переходят у надпровідний стан.

Якщо в замкненому провіднику, який перебуває в надпровідному стані, створити електричний струм, то струм існуватиме в провіднику без підтримки джерела необмежений час. Ця та інші властивості надпровідників відкривають широкі можливості для їх застосування в техніці й промисловості. Тільки створення надпровідних ліній електропередачі дозволяє зекономити 10–15 % електроенергії.

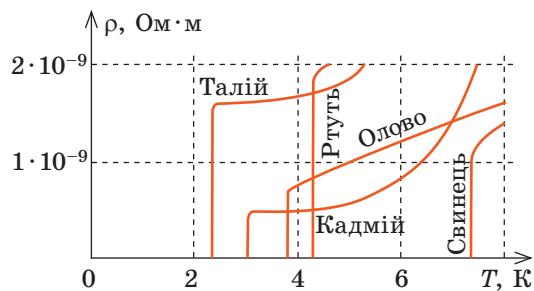
Труднощі широкого застосування надпровідників пов’язані з необхідністю охолодження матеріалів

**Ділянка I.** Температура наближається до 0 К:

- у деяких металів питомий опір перестає залежати від температури і стає незмінним (вітка 1);  $\rho_{\text{зал}}$  — залишковий питомий опір;
- питомий опір деяких металів стрибком падає до нуля (вітка 2) — *стан надпровідності*;  $T_c$  — критична температура (температура переходу в надпровідний стан).

**Ділянка II.** Лінійна ділянка: питомий опір майже лінійно залежить від температури.

**Ділянка III.** При досягненні температури плавлення питомий опір збільшується стрибком.

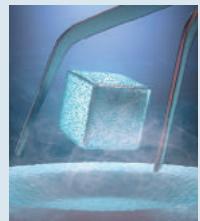


**Рис. 5.3.** Графіки зміни питомого опору деяких металів за температур, близьких до абсолютноного нуля

#### «Труна Магомета»

Нульовий опір — це не єдина унікальна властивість матеріалів у надпровідному стані. У 1933 р. німецькі вчені Вальтер Мейснер (1882–1974) і Роберт Оксенфельд (1901–1993) виявили, що під час переходу в надпровідний стан магнітне поле повністю витісняється з провідника (ефект Мейснера).

Якщо над провідником помістити магніт і, охолоджуючи, перевести провідник у надпровідний стан, магніт буде левітувати над надпровідником. Дослід, який демонструє ефект Мейснера, назвали «труна Магомета» — вважається, що труна з тілом пророка Магомета левітувала в повітря без жодної підтримки.





**Рис. 5.4.** Микола Миколайович Боголюбов (1909–1992) — видатний радянський фізик-теоретик і математик, засновник наукових шкіл у галузях нелінійної механіки, статистичної фізики і квантової теорії поля. У 1934–1959 рр. працював у Київському університеті, у 1965–1973 рр. — директор Інституту теоретичної фізики АН України (зараз цей інститут носить ім'я вченого)

до низьких температур — це досить дорого коштує. Зараз знайдено матеріали, які переходять у надпровідний стан за температури близько 100 К ( $-173^{\circ}\text{C}$ ) і нижче. Останній «рекорд» високотемпературної надпровідності був поставлений у 2015 р.: за величезного тиску (1 млн атм.) сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) був переведений у надпровідний стан за температури  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Надпровідність неможливо пояснити з точки зору класичної теорії електропровідності металів. У 1957 р. група американських учених: Джон Бардін (1908–1991), Леон Купер (народ. 1930), Джон Шріффер (народ. 1931) — і незалежно від них радянський вчений Микола Миколайович Боголюбов (рис. 5.4) розробили **квантову теорію надпровідності**.

## 4

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Електричне коло складається із джерела струму, міліамперметра опором 20 Ом і реостата, обмотка якого виготовлена зі сталі. За температури  $0^{\circ}\text{C}$  показ міліамперметра 30 мА, а опір реостата — 200 Ом. Яким буде показ міліамперметра, якщо обмотка реостата нагріється до  $50^{\circ}\text{C}$ ? Внутрішнім опором джерела та опором з'єднувальних проводів знехватути.

**Аналіз фізичної проблеми.** Обмотка реостата нагрівається, і її опір збільшується, що спричиняє збільшення повного опору кола. Відповідно до закону Ома сила струму в колі зменшується. Реостат і міліамперметр з'єднані послідовно, внутрішній опір джерела дорівнює нулю, тому загальний опір кола становить  $R + R_A$ , де  $R$  — опір обмотки реостата за  $t = 50^{\circ}\text{C}$ . Температурний коефіцієнт опору сталі знайдемо в таблиці (див. Додаток 1).

**Дано:**

$$R_A = 20 \text{ Ом}$$

$$t_0 = 0^{\circ}\text{C}$$

$$I_0 = 30 \text{ мА} = 0,03 \text{ А}$$

$$R_0 = 200 \text{ Ом}$$

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

$$\alpha = 0,006 \text{ К}^{-1}$$

$$I = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання.** Запишемо закон Ома для повного кола для двох теплових станів обмотки реостата.

До нагрівання:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_A} \Rightarrow \mathcal{E} = I_0(R_0 + R_A).$$

Після нагрівання:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_A}, \text{ де } R = R_0(1 + \alpha t).$$

Після підстановки  $\mathcal{E}$  і  $R$  одержуємо:  $I = \frac{I_0(R_0 + R_A)}{R_0(1 + \alpha t) + R_A}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[I] = \frac{\text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{Ом}} = \text{А}; I = \frac{0,03 \cdot (200 + 20)}{200 \cdot (1 + 0,006 \cdot 50) + 20} \approx 24 \cdot 10^{-3} (\text{А}).$$

**Аналіз результату.** Сила струму зменшилась — це реальний результат.

**Відповідь:**  $I \approx 24 \text{ мА}$ .



## Підбиваємо підсумки

• Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

- За відсутності електричного поля вільні електрони в металах рухаються хаотично. Якщо в металевому провіднику існує електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, рухаються напрямлено.

- Опір металевого провідника майже лінійно залежить від температури:  $R = R_0(1 + \alpha t)$ , де  $R_0$  — опори провідника відповідно за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  і за даної температури  $t$ ;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору.

- У разі зниження температури деяких металів до температур, близьких до абсолютноного нуля, їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.



## Контрольні запитання

1. Що являє собою електричний струм у металах? 2. Опишіть суть досліду Стюарта — Толмена щодо виявлення природи електричного струму в металах.

3. Як рухаються електрони в металевому провіднику з точки зору класичної фізики, якщо в провіднику створено електричне поле? 4. У чому причина опору металів? 5. Чи залежить опір металів від температури? Якщо залежить, то як? 6. У чому полягає явище надпровідності?



## Вправа № 5

- На рис. 1 подано дослід. З якою метою здійснюється цей дослід? Назвіть використане обладнання. Як ви вважаєте, як і чому буде змінюватися показ вимірювального приладу під час нагрівання?
- Чи виділяється теплота під час проходження струму в провіднику, який перебуває в надпровідному стані?
- На рис. 2 подано графік залежності опору металевого провідника від температури. Яким є температурний коефіцієнт опору цього металу? Яка сила струму в провіднику за температури  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , якщо напруга на кінцях провідника  $5\text{ В}$ ?
- Опір нікелінової обмотки електричної печі за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  дорівнює  $60\text{ Ом}$ . Яким буде опір обмотки, якщо температура сягне  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
- Яку довжину має вольфрамова нитка лампи розжарювання, розрахованої на напругу  $220\text{ В}$  і потужність  $220\text{ Вт}$ ? Температура розжареної нитки становить  $2700\text{ К}$ , її діаметр —  $0,03\text{ мм}$ .
- На залежності опору металів від температури ґрунтуються дія термометрів опору — термоперетворювачів (рис. 3). Дізнайтеся, як побудовані такі термометри, де їх застосовують, які метали використовують для виготовлення їхнього термометричного тіла.

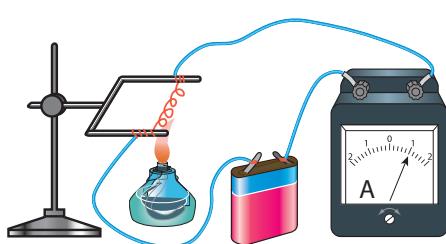


Рис. 1

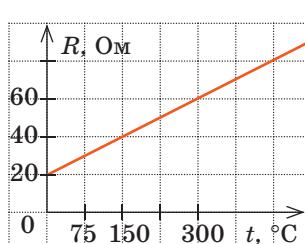


Рис. 2

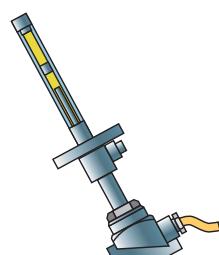


Рис. 3

## § 6. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ. ЕЛЕКТРОЛІЗ

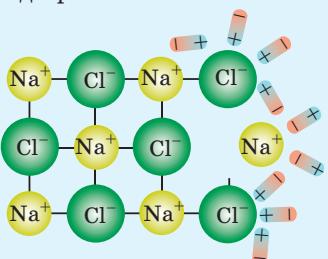


Насправді прикраса на малюнку не є золотою — вона виготовлена зі срібла, а тонкий шар золота (6 мікронів) нанесено на прикрасу електрохімічним способом — способом електролізу. Автомобільний диск виготовлений зі сплаву алюмінію, а блиску йому надає тонкий шар хрому. І вироблення алюмінію, і рівномірне нанесення хрому на поверхню деталі — це теж електроліз. Про електроліз та його застосування згадаємо в цьому параграфі.

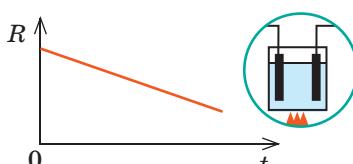
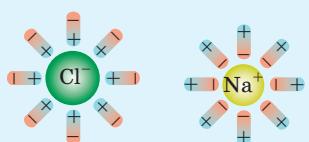
### Нагадуємо

**Електролітична дисоціація** (від латин. *dissociatio* — розділення) — це **розпад речовин на іони внаслідок дії полярних молекул розчинника**.

Так, коли кристалик кухонної солі потрапляє у воду, полярні молекули води оточують іони Натрію та іони Хлору і відокремлюють їх від кристалика.



У результаті в розчині з'являються вільні заряджені частинки — позитивні й негативні іони.



**Рис. 6.1.** Приближний графік залежності опору  $R$  електроліту від температури  $t$

### 1 Що являє собою електричний струм в електролітах

**Електроліти** — тверді або рідкі речовини, які мають іонну провідність.

Механізм іонної провідності твердих речовин є досить складним, тому розглянемо іонну провідність лише рідких електролітів.

Солі, кислоти або луги під час розчинення можуть розпастися на окремі іони. Це явище називають *електролітичною дисоціацією* (див. текст ліворуч), а розчини відповідних речовин — електролітами.

Розпад речовин на іони може бути спричинений не тільки розчинником. Деякі солі та оксиди металічних елементів розпадаються на іони внаслідок значного підвищення температури. Розплави цих речовин теж є електролітами.

За відсутності електричного поля іони перебувають у хаотичному тепловому русі. А от якщо в розчині або розплаві помістити електроди, приєднані до різноїменних полюсів джерела струму, то, як і вільні електрони в металах, іони дрейфуватимуть у певному напрямку: позитивні іони (катіони) — до негативного електрода (катода); негативні іони (аніони) — до позитивного електрода (анода). Тобто в розчині виникне *електричний струм*.

**Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів** являє собою напрямлений рух вільних іонів.

Зазначимо, що з *збільшенням температури* кількість іонів в електроліті значно збільшується, тому, незважаючи на збільшення кількості ефективних зіткнень, *опір електроліту зменшується* (рис. 6.1).

## 2 Що таке електроліз

Під час проходження електричного струму через електроліт відбувається перенесення хімічних складових електроліту й ті виділяються на електродах — осідають у вигляді твердого шару або виділяються в газоподібному стані.

Так, якщо через водний розчин купруму(ІІ) хлориду пропускати струм, то поверхню катода вкриє тонкий шар міді, а біля анода виділиться хлор. Це відбувається тому, що під дією електричного поля вільні позитивні іони Купруму ( $Cu^{2+}$ ) прямуєть до катода, а вільні негативні іони Хлору ( $Cl^-$ ) — до анода (рис. 6.2).

Досягши катода, катіони Купруму «захоплюють» з його поверхні електрони, яких їм «брakuє», — відбувається *хімічна реакція відновлення*: катіони Купруму перетворюються на нейтральні атоми, і на поверхні катода осідає мідь. Водночас аніони Хлору, досягши поверхні анода, «віддають» йому «надлишкові» електрони — відбувається *хімічна реакція окиснення*: аніони Хлору перетворюються на нейтральні атоми, і на аноді виділяється хлор.

Процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, які відбуваються на електродах під час проходження струму, називають **електролізом**.

## 3 Закони М. Фарадея для електролізу

Уперше явище електролізу докладно вивчив англійський фізик **Майкл Фарадей** (1791–1867). Точно вимірюючи маси речовин, які виділялися на електродах під час електролізу, вчений сформулював два **закони електролізу**.

### Закони Фарадея для електролізу

#### Перший закон електролізу

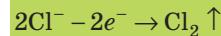
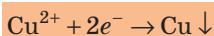
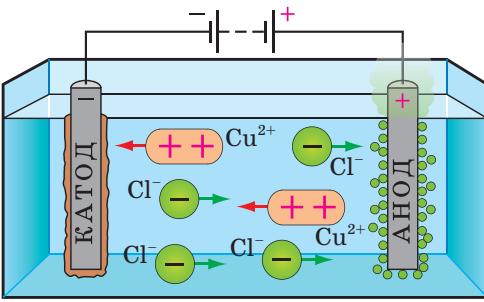
Маса речовини, яка виділяється на електроді під час електролізу, прямо пропорційна силі струму  $I$  та часу  $t$  його проходження через електроліт:

$$m = kIt, \text{ або } m = kq,$$

де  $q$  — заряд, що пройшов через електроліт;  $k$  — коефіцієнт пропорційності, який називають **електрохімічний еквівалент**:

$$[k] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{C}} \right).$$

Електрохімічні еквіваленти визначають експериментальним шляхом і заносять у таблиці (див. Додаток 1).



**Рис. 6.2.** Електроліз розчину  $CuCl_2$ . У ванну з розчином занурені катод і анод. Після замикання кола позитивні іони (катіони) рухаються до катода, негативні іони (аніони) — до анода

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$$

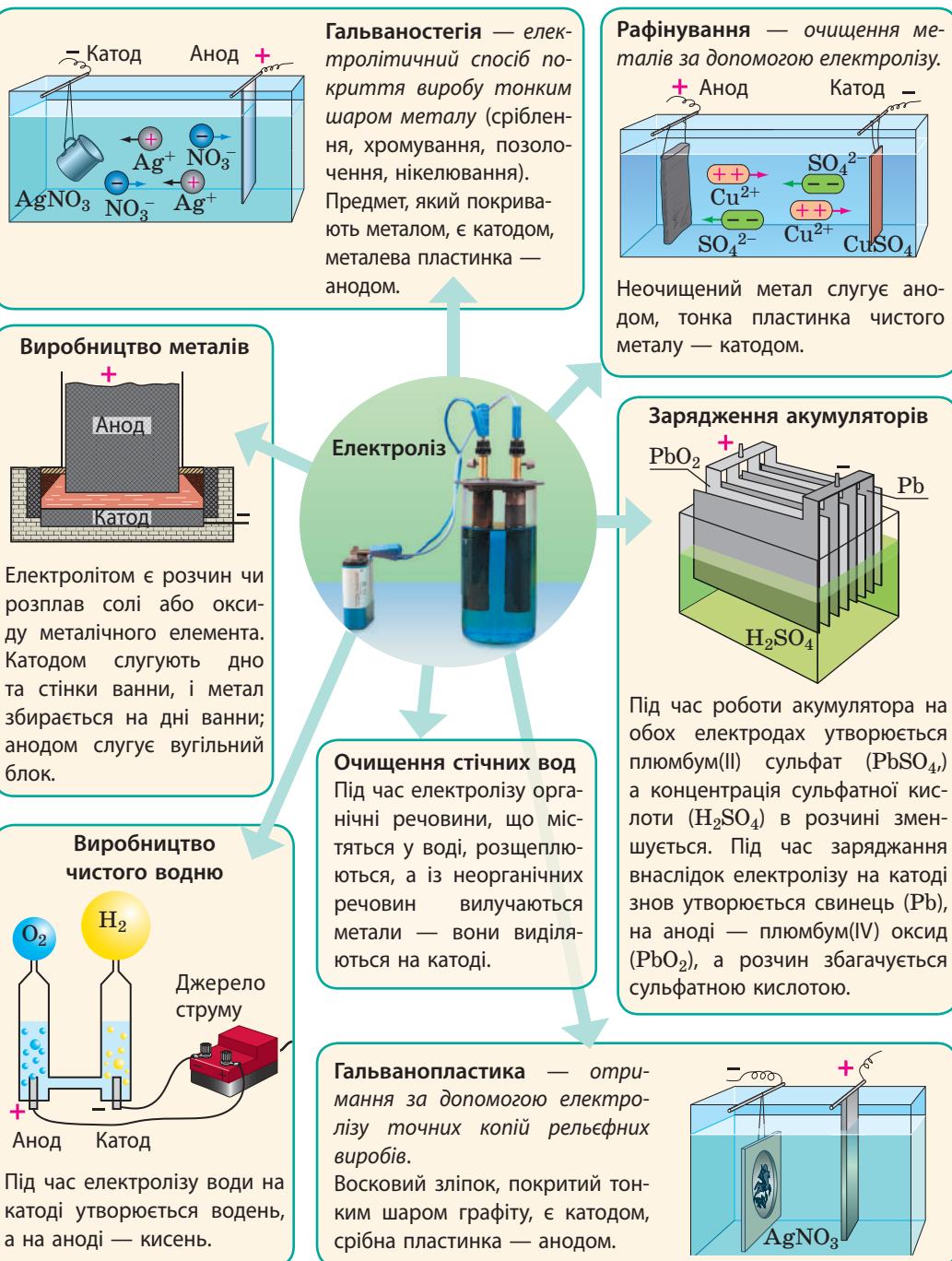
де  $F$  — **стала Фарадея**, яка визначається як добуток модуля заряду електрона на сталу Авогадро:

$$F = |e|N_A = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл} / \text{моль}.$$

Тобто стала Фарадея дорівнює модулю заряду одного моля електронів.

## 4 Де застосовують електроліз

Електроліз широко застосовують у сучасній техніці, зокрема для полірування поверхонь, зарядження кислотних і лужних акумуляторів, отримання чистого водню (електроліз води), багатьох металів тощо.



## 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Під час рафінування міді анодом слугує пластина з неочищеної міді, що має 12 % домішок. Скільки електроенергії витратили для очищення 2 кг такої міді, якщо процес відбувається за напруги 0,5 В?

*Аналіз фізичної проблеми.* Витрати енергії дорівнюють роботі струму:  $\Delta W = A = qU$ , де  $q$  — заряд, який пройшов через електроліт за час рафінування. За першим законом Фарадея знайдемо заряд  $q$  і, скориставшись табличним значенням електрохімічного еквівалента міді ( $Cu^{2+}$ ) (див. Додаток 1), визначимо шукану величину.

*Дано:*

$$m_{\text{доміш}} = 0,12m$$

$$m = 2 \text{ кг}$$

$$U = 0,5 \text{ В}$$

$$k = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$$

$$\Delta W = ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання.*

$$\text{За першим законом Фарадея: } m_{\text{Cu}} = kq \Rightarrow q = \frac{m_{\text{Cu}}}{k}.$$

$$\text{Отже, } \Delta W = A = qU = \frac{m_{\text{Cu}}}{k} U.$$

$$\text{За умовою маса чистої міді дорівнює: } m_{\text{Cu}} = m - m_{\text{доміш}}.$$

$$\text{Остаточно маємо: } \Delta W = \frac{(m - m_{\text{доміш}})U}{k}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[\Delta W] = \frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{кг/Кл}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл}} = \text{Дж}; \quad \Delta W = \frac{(2 - 0,12 \cdot 2) \cdot 0,5}{0,33 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,88}{0,33 \cdot 10^{-6}} \approx 2,7 \cdot 10^6 \text{ (Дж)}.$$

*Відповідь:*  $\Delta W \approx 2,7 \text{ МДж.}$



### Підбиваємо підсумки

• Електричний струм в електролітах — це напрямлений рух вільних позитивних і негативних іонів. Процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, що відбуваються на електродах під час проходження струму, називають електролізом.

• Перший закон електролізу: маса речовини, що виділяється на електроді, прямо пропорційна силі струму та часу його проходження через електроліт:  $m = kIt$ , де  $k$  — електрохімічний еквівалент.

• Другий закон електролізу: електрохімічний еквівалент  $k$  прямо пропорційний відношенню молярної маси елемента до валентності  $n$  цього елемента в даній хімічній сполуці:  $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$ , де  $F = N_A |e|$  — стала Фарадея.



### Контрольні запитання

- У чому полягає явище електролітичної дисоціації? Наведіть приклади.
- Що таке електроліт? 3. Що являє собою електричний струм у розчинах і розплавах електролітів? 4. Опишіть процес електролізу. 5. Сформулюйте закони Фарадея. 6. Наведіть приклади застосування електролізу.



### Вправа № 6

- Через розчин мідного купоросу ( $CuSO_4$ ) досить довгий час пропускають електричний струм. Як змінюється маса міді, що виділяється на катоді за одиницю часу, якщо напруга на електродах є незмінною?

**2.** Заповніть таблицю.\*

Речовина, яка виділилася на катоді			Час електролізу	Сила струму під час електролізу
назва	маса	електрохімічний еквівалент		
Мідь	6,6 г	0,30 мг/Кл	1 год	0,4 А
				0,6 А
Алюміній	1,35 г		50 хв	5 А

- 3.** Дві однакові електролітичні ванни заповнені розчином аргентум(І) нітрату. Концентрація розчину у ванні 1 більша, ніж у ванні 2. Визначте, на катоді якої ванни виділиться більше срібла, якщо ванни з'єднані: а) послідовно; б) паралельно.
- 4.** На рис. 1 наведено зображення електричного кола, до складу якого входить електролітична ванна з водним розчином цинк сульфату. Напруга на електродах становить 2 В; густота цинку — 7100 кг/м<sup>3</sup>. Визначте:
- який електрод є катодом, який — анодом;
  - на якому електроді виділяється цинк;
  - за який час на електроді утвориться шар цинку завтовшки 6,8 мкм і яка енергія буде на це витрачена.
- 5.** Дізнайтесь докладніше, що таке електролізер (рис. 2). Чи відрізняється електролізер від електролітичної ванни?

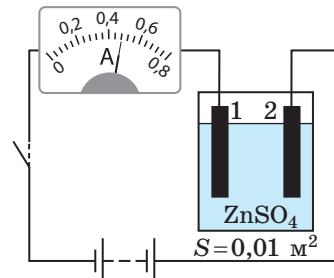


Рис. 1



Рис. 2

## § 7. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ



99 % речовини Всесвіту перебуває у стані **плазми**: у цьому стані — речовина в зорях і галактичних туманностях, плазмою заповнений міжзоряний простір. На Землі ми теж часто маємо справу з плазмою: газ перебуває у стані плазми і в каналі блискавки, і в язиках полум'я, і всередині рекламних трубок; процесами в навколоzemній плазмі зумовлені магнітні бурі, полярні сяйва... **Плазма** — це частково або повністю йонізований газ, у якому концентрації позитивних і негативних зарядів майже однакові. Про те, як йонізувати газ (створити плазму) і які процеси відбуваються, якщо йонізований газ помістити в електричне поле, згадаємо в цьому параграфі.

**1**

### За яких умов гази стають провідниками

На відміну від металів та електролітів гази складаються з електрично нейтральних атомів та молекул і за звичайних умов майже не містять

\* Зрозуміло, що в цьому та аналогічних завданнях таблиці, креслення тощо слід перевести в зошит.

вільних носіїв струму, тобто є діелектриками. А от якщо якось змусити електрон залишити атом, то в газі утворяться *позитивні йони* і *вільні електрони*; деякі електрони, у свою чергу, можуть приєднатися до нейтральних молекул і атомів — утворяться *негативні йони* (рис. 7.1).

Процес утворення в газі позитивних і негативних йонів та вільних електронів із нейтральних молекул і атомів називають **йонізацією**.

Щоб змусити електрон залишити атом, необхідно надати йому певну мінімальну енергію — *енергію йонізації* ( $W_i$ ), яка залежить від хімічної природи газу. Залежно від того, звідки береться ця енергія, розрізняють кілька видів йонізації (див., наприклад, рис. 7.2).

Якщо йонізований газ помістити в електричне поле, то позитивні йони рухатимуться в напрямку силових ліній поля, негативні йони та електрони — в протилежному напрямку (рис. 7.3). У газі виникне *електричний струм*.

**Електричний струм у газах — газовий розряд** — являє собою напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів.

## 2

### Самостійний і несамостійний газові розряди

Досліди показують: якщо усунути причину, яка викликала йонізацію газу (прибрати пальник, вимкнути джерело випромінювання), то зазвичай газовий розряд припиняється. Це пояснюється кількома причинами.

1. Електрон і позитивний іон можуть об'єднатися, перетворившись на нейтральну молекулу (атом). Цей процес називають *рекомбінацією*.

2. Вільні електрони поглинаються анодом.

3. Вільні йони біля електродів перетворюються на нейтральні частинки: негативні йони «віддають» «зайві» електрони аноду, а позитивні йони «забирають» електрони, яких їм «брakuє», у катода. Після цього нейтральні частинки (молекули й атоми) повертаються в газ.

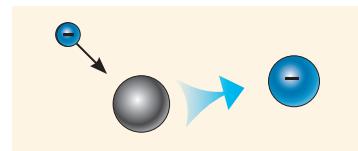
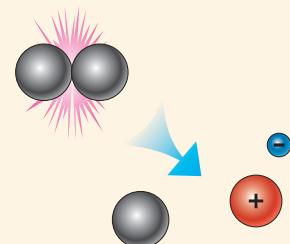


Рис. 7.1. Схема утворення негативних йонів у газах

**Термічна йонізація:** енергія, необхідна для йонізації, виділяється під час непружного зіткнення молекул, які за високої температури газу мають велику швидкість.



**Йонізація випромінюванням:** енергію, необхідну для йонізації, постачає в атом високочастотне електромагнітне випромінювання.

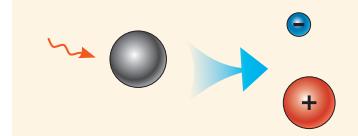
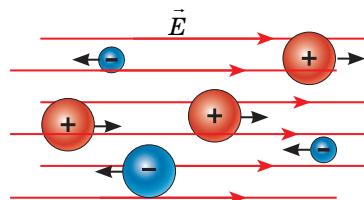
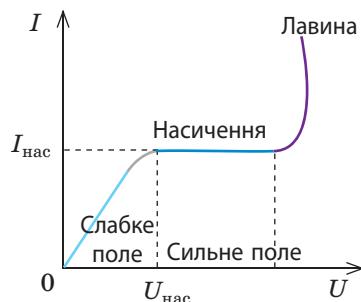


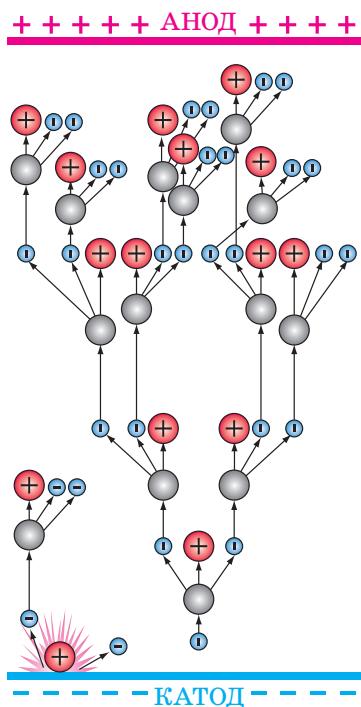
Рис. 7.2. Деякі види йонізації газів



**Рис. 7.3.** В йонізованому газі за наявності електричного поля виникає напрямлений рух вільних заряджених частинок — електричний струм



**Рис. 7.4.** Вольт-амперна характеристика (ВАХ) газового розряду



**Рис. 7.5.** Схема розвитку електронної лавини. Вільний електрон, прискорений електричним полем, зіштовхується з атомом (молекулою) і «вибиває» ще один електрон. Розігнавшись, два електрони звільняють ще два, і т. д.

Газовий розряд, який відбувається тільки під час дії зовнішнього іонізатора, називають **несамостійним газовим розрядом**.

Здавалося б, що збільшення напруги між пластинами обов'язково приведе до збільшення сили струму, навіть якщо інтенсивність іонізатора не змінюється. Але це не завжди так. Графік залежності сили розрядного струму від напруги між електродами за незмінних характеристиках іонізатора наведений на [рис. 7.4](#). На графіку можна виділити кілька характерних ділянок.

**Ділянка 1** (на графіку виділено блакитним). Залежність сили струму від напруги підкорюється закону Ома.

**Ділянка 2** (виділено синім). Напруга збільшується, а сила струму залишається незмінною. Річ у тім, що в сильному електричному полі всі заряджені частинки, які створюють іонізатор, долітають до електродів. **Найбільшу силу струму, що є можливою внаслідок дії даного іонізатора, називають струмом насиження**.

**Ділянка 3** (виділено фіолетовим). Сила струму різко зростає за незначного збільшення напруги. З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що це відбувається завдяки **йонізації газу електронним ударом**, унаслідок чого кількість вільних заряджених частинок лавиноподібно збільшується ([рис. 7.5](#)).

Електрони, що утворилися під час ударної іонізації, прямують до анода і врешті-решт поглинаються ним. Проте газовий розряд може й не припинитися, навіть якщо прибрати іонізатор. Одним із джерел нових електронів є поверхня катода: позитивні іони «бомбардують» катод і вибивають із нього електрони — відбувається **емісія (випромінювання) електронів** з поверхні катода.

Газовий розряд, який відбувається без дії зовнішнього іонізатора, називають **самостійним газовим розрядом**.

Залежно від тиску та температури газу, конфігурації електродів і напруги між ними розрізняють чотири види самостійних газових розрядів: *іскровий, тліючий, дуговий, коронний*.

*Види самостійних газових розрядів***Іскровий газовий розряд**

Виникає за атмосферного тиску та великої напруги між електродами. Має вигляд яскравих зигзагоподібних смуг, що розгалужуються, триває лише кілька десятків мікросекунд і зазвичай супроводжується звуковими ефектами (потріскування, тріск, грім тощо). Використовують у запальних свічках бензинових двигунів, для обробки особливо міцних металів, для запобігання перенапрузі ліній електропередачі (іскрові розрядники).

Приклад грандіозного іскрового розряду в природі — блискавка.

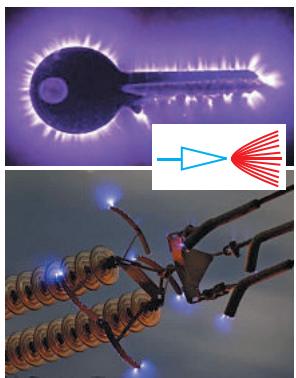
**Тліючий газовий розряд**

Виникає за невеликої напруги між електродами і низького тиску (десяти й соті міліметра ртутного стовпа): за зазначеного тиску відстань між молекулами є такою, що навіть у слабкому електричному полі електрони розганяються до такої швидкості, що набувають енергії, достатньої для ударної іонізації. Використовують у лампах денного світла (люмінесцентних трубках), кольорових газорозрядних трубках (колір світіння визначається природою газу). Найважливіша галузь застосування — квантові генератори світла (газові лазери).

**Дуговий газовий розряд (електрична дуга)**

Виникає за високої температури (понад 4000 °С) і майже за будь-якого тиску. Являє собою яскраве дугоподібне полум'я. За такої високої температури з поверхні катода безперервно «випаровуються» електрони, а в стовпі розпеченої газу відбувається термічна іонізація. Висока температура катода й анода підтримується бомбардуванням електродів позитивними і негативними іонами та електронами, прискореними електричним полем.

Використовують у металургії (електропечі, зварювання жаром електричної дуги металів), як потужне джерело світла в прожекторах тощо.

**Коронний газовий розряд**

Виникає за тиску порядку атмосферного в сильному ( $E > 500$  кВ/м), різко неоднорідному електричному полі. Такі поля формуються поблизу електродів із великою кривизною поверхні (вістря, тонкий дріт тощо). Являє собою слабке фіолетове світіння у вигляді корони (пучків, пензликів).

Використовують для очищення газів (електрофільтри), в лічильниках елементарних частинок (лічильники Гейгера — Мюллера); на виникненні цього розряду трунтується дія блискавковідводу.

У природі зазвичай спостерігається перед грозою або під час грози на гострих кінцях високих предметів (веж, щогл, вершин скал тощо); має ще одну назву — «вогні святого Ельма».

**Зверніть увагу!** Електрон, зіштовхнувшись з атомом, не завжди вибиває з нього електрон — також він може передати електронній оболонці атома частину своєї енергії. Атом збуджується, тобто його електронна оболонка переходить у стан із більшим рівнем енергії. Проте у збудженному стані атом перебуває дуже короткий час (кілька наносекунд) — майже миттєво він повертається в основний стан, випромінюючи надлишкову енергію у вигляді певної «порції» (кванта) світла. Оскільки під час газового розряду збуджується величезна кількість атомів, газовий розряд *зазвичай супроводжується світінням*.

### 3 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Яку найменшу швидкість руху повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Гідрогену? Енергія йонізації атома Гідрогену дорівнює 13,6 еВ (електрон-вольт — позасистемна одиниця енергії:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

**Аналіз фізичної проблеми.** Щоб йонізувати атом Гідрогену, електрон повинен мати кінетичну енергію не меншу, ніж енергія йонізації цього атома. Найменшу швидкість електрона знайдемо, користуючись рівністю  $E_k = W_i$ .

<p><b>Дано:</b></p> $W_i = 13,6 \text{ еВ} = 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 21,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ <p><math>v = ?</math></p>	<p><b>Пошук математичної моделі, розв'язання.</b></p> <p>За означенням кінетичної енергії: <math>E_k = \frac{m_e v^2}{2}</math>, де <math>m_e</math> — маса електрона. Оскільки <math>E_k = W_i</math>, то <math>\frac{m_e v^2}{2} = W_i \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2W_i}{m_e}}</math>.</p> <p>Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:</p> $[v] = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}; v = \sqrt{\frac{2 \cdot 21,8 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 2,2 \cdot 10^6 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$ <p><i>Відповідь:</i> <math>v \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с.}</math></p>
---	---



### Підбиваємо підсумки

- Процес утворення позитивних і негативних іонів та вільних електронів із електрично нейтральних атомів (молекул) газу називають **йонізацією**.
- Електричний струм у газах (газовий розряд) — напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних іонів, які утворюються в газі внаслідок йонізації.
- Газовий розряд, який відбувається тільки під час дії зовнішнього йонізатора, називають **несамостійним газовим розрядом**; розряд, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають **самостійним газовим розрядом**.
- Залежно від тиску й температури газу, способу його йонізації, напруги та характеру світіння, яке супроводжує газовий розряд, розрізняють чотири види самостійних газових розрядів: іскровий, коронний, дуговий, тліючий.

### Контрольні запитання



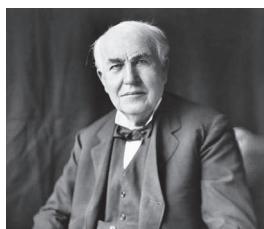
1. Що таке плазма?
2. Чому за звичайних умов газ не проводить електричний струм?
3. Що таке йонізація? Які існують види йонізації?
4. Який розряд у газі називають самостійним? несамостійним?
5. Опишіть механізм ударної йонізації.
6. Опишіть основні види самостійних газових розрядів: за яких умов вони виникають; який мають вигляд; де їх застосовують.

**Вправа № 7**

- Який вид газового розряду описував римський філософ і поет *Луцій Анней Сенека* (4 р. до н. е. — 65 р.), говорячи, що перед грозою «зорі ніби сходять з неба і сідають на щогли кораблів»?
- 5 листопада 1953 р. у Києві відкрили рух по мосту Патона — першому у світі суцільнозварному мосту (названий на честь видатного українського радянського вченого *Євгена Оскаровича Патона* (1870–1953), під керівництвом якого й був споруджений міст). Технологію застосування якого газового розряду досліджував і впроваджував *Є. О. Патон*?
- Яку найменшу швидкість руху повинен мати електрон, щоб іонізувати атом Нітрогену? Енергія йонізації атома Нітрогену — 14,5 еВ.
- Якою має бути температура атомарного водню, щоб середня кінетична енергія поступального руху його атомів була достатньою для іонізації шляхом зіткнень? Енергія йонізації атома Гідрогену — 13,6 еВ.
- Об'єднавшись у невеликі групи, підготуйте короткі презентації або повідомлення про застосування та прояви в природі самостійних газових розрядів.

**Фізика в цифрах***Деякі характеристики блискавки*

- Напруга — 10–100 МВ; сила струму — 20–300 кА.
- Тривалість першого імпульсу струму — близько 80 мкс.
- Температура в каналі — близько 10 000 °С.
- Діаметр внутрішнього каналу — до 0,4 м.

**§ 8. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ. ЕЛЕКТРОВАКУУМНІ ПРИЛАДИ**Томас Едісон  
(1847–1931)

У 1883 р. американський винахідник *Томас Едісон*, намагаючись збільшити термін служби свого винаходу — електричної лампи розжарювання, увів у балон лампи, з якого було відкачано повітря, електрод. Приєднавши електрод до позитивного полюса джерела струму, а нитку розжарення лампи — до негативного, Едісон спостерігав появу струму. А от коли електрод був з'єднаний з негативним полюсом джерела, а нитка розжарення — з позитивним полюсом, струм не виявлявся. Про те, чому у вакуумі існував струм і чому лампа Едісона мала однобічну провідність, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

**1 Термоелектронна емісія**

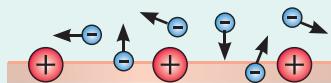
Щоб розібратися, що являє собою струм у вакуумі, спочатку визначимося з поняттям вакууму.

**Вакуум** (від латин. *vacuum* — порожнеча) — це стан газу за тиску, який менший від атмосферного.

Розрізняють **низький**, **середній**, **високий (глибокий) вакуум**. Коли кажуть про електричний струм у вакуумі, мають на увазі **високий (глибокий) вакуум** — **стан газу, за якого довжина вільного пробігу молекул газу більша за лінійні розміри ємності, в якій міститься газ**.

**Види електронної емісії**

- **Термоелектронна емісія** — випромінювання електронів нагрітими тілами.



- **Фотоелектронна емісія** відбувається під дією випромінювання, яке падає на поверхню тіла.

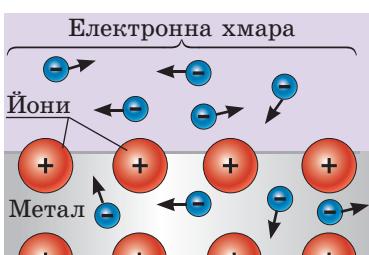


- **Автоелектронна емісія** зумовлена наявністю біля поверхні тіла сильного електричного поля, яке «вириває» електрони з металу.

• **Вторинна електронна і йонно-електронна емісія** — випромінювання електронів із поверхні тіла внаслідок його бомбардування електронами або іонами відповідно.



- **Вибухова електронна емісія** — емісія електронів унаслідок переходу мікрокопічних ділянок катода в плазму (локальний вибух).



**Рис. 8.1.** Електрони, що покинули метал, утримуються біля його поверхні електричним полем, створеним електронною хмарою та нескомпенсованими позитивними іонами металу

Щоб у вакуумі існував струм, слід помістити у вакуумі джерело вільних заряджених частинок, наприклад електронів. Найбільша концентрація вільних електронів — у металах. Однак вільні електрони зазвичай не можуть залишити поверхню металу — вони утримуються силами кулонівського притягання з боку позитивних іонів. Для подолання цих сил електрону необхідно мати певну енергію.

Енергію, яку необхідно мати електрону, щоб залишити метал, називають **роботою виходу**  $A_{\text{вих}}$ .

Електрон може залишити метал, якщо його кінетична енергія  $E_k$  буде більшою за роботу виходу або буде дорівнювати їй:

$$E_k \geq A_{\text{вих}}, \text{ або } \frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$$

Роботу виходу електронів вимірюють в **електрон-вольтах** ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ), визначають експериментально для кожного металу окремо та заносять до таблиць (див. Додаток 1).

Процес випромінювання електронів із поверхні металів називають **електронною емісією**. Залежно від того, як була передана електронам необхідна енергія, розрізняють кілька видів емісій (див. колонку зліва). Щоб створити електричний струм у вакуумі, найчастіше використовують **термоелектронну емісію** — процес випромінювання електронів нагрітими тілами.

У нагрітому металі є величезна кількість швидких електронів, які безперервно з нього вилітають. Саме тому біля поверхні металу утворюється **хмара вільних електронів — електронна хмара**, що має негативний заряд, а сама поверхня металу набуває позитивного заряду (рис. 8.1). Під впливом електричного поля, створеного електронною хмарою та поверхнею металу, деякі електрони повертаються в метал. У стані рівноваги кількість електронів, що залишили метал, дорівнює кількості електронів, що повернулися в нього. При цьому чим вища температура металу, тим більша густина електронної хмари.

Погодьтеся: описана «поведінка» електронів дуже нагадує «поведінку» молекул біля поверхні рідини, а електронна хмара асоціюється з насиченою парою біля поверхні рідини.

## 2 Електричний струм у вакуумі. Вакуумний діод

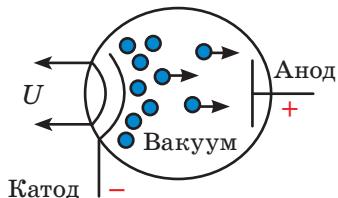
Ви вже знаєте, що для існування струму необхідно виконання двох умов: *наявність вільних заряджених частинок і наявність електричного поля*.

Для створення цих умов у скляній балон поміщують два електроди (катод і анод) і відкачують із балона повітря. Катод нагрівають, використовуючи нитку розжарення — тонкий дріт із тугоплавкого металу, підключений до джерела струму. У результаті з поверхні катода вилітають електрони. Щоб збільшити емісію електронів, катод покривають шаром оксидів лужноземельних металічних елементів (Барію, Стронцію, Калію тощо), для яких робота виходу електронів є невеликою. На катод подають негативний потенціал, а на анод — позитивний (*пряме ввімкнення*). Електрони, що вилітали з катода, потрапляють в електричне поле між катодом і анодом і починають рухатися напрямлено, створюючи електричний струм (рис. 8.2).

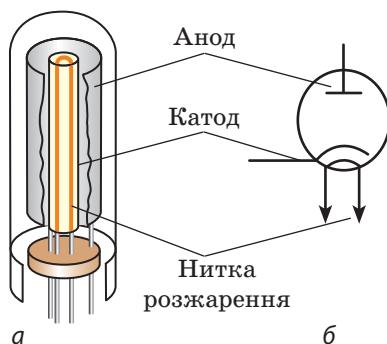
**Електричний струм у вакуумі** являє собою напрямлений рух вільних електронів, отриманих у результаті електронної емісії.

Пристрій, що складається зі скляного балона, з якого відкачано повітря, і розташованих у балоні двох електродів (анода і підігрівного катода), називається **вакуумним (ламповим) діодом** (рис. 8.3). Очевидно: якщо подати на катод позитивний потенціал, а на анод — негативний (*зворотне ввімкнення*), то електрони, що вилітають із катода, будуть відкидатися полем назад, на катод, і струму в колі не буде. Таким чином, *вакуумний діод має однобічну провідність* (рис. 8.4).

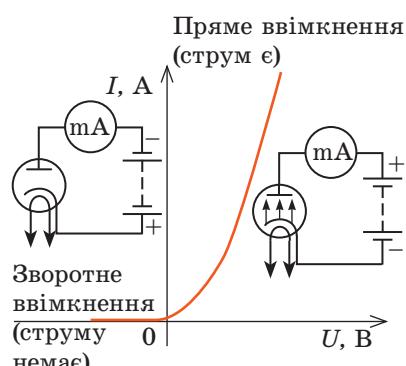
Чому в 1883 р. Т. Едісон не зміг пояснити причину того, що його лампа розжарювання з введеним додатковим електродом мала однобічну провідність?



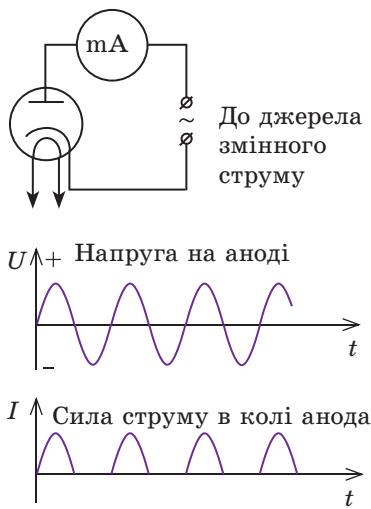
**Рис. 8.2.** Термоелектрони (електрони, що вилітали з металу в ході термоелектронної емісії), рухаючись від катода до анода, створюють електричний струм



**Рис. 8.3.** Вакуумний діод:  
а — будова;  
б — позначення на схемі



**Рис. 8.4.** Вольт-амперна характеристика (ВАХ) вакуумного діода. Пряме ввімкнення: зі збільшенням напруги між електродами сила струму швидко зростає. Зворотне ввімкнення: сила струму дорівнює нулю



**Рис. 8.6.** Використання вакуумного діода для перетворення змінного струму на пульсуючий

### Зварювання у відкритому космосі

25 липня 1984 р. радянські космонавти Володимир Джанібеков і Світлана Савицька вийшли у відкритий космос і протягом трьох годин здійснювали перше космічне зварювання в умовах глибокого вакууму.

Зварювальний апарат був розроблений і створений в Інституті електрозварювання ім. Е. О. Патона НАНУ. Апарат дозволяв здійснювати зварювання, спаювання, різання і нагрівання металу. Ці операції виконувалися короткофокусною електронно-променевою гарматою масою 2,5 кг, яку слід було тримати в руці.



Поштова марка України:  
«Зварювання в космосі», 2006 р.

Свого часу однобічну провідність вакуумного діода активно використовували в радіоелектроніці для перетворення змінного струму на пульсуючий. Якщо між катодом і анодом увімкнути джерело змінного струму, то протягом першого півперіоду діод пропускатиме електричний струм, а протягом другого півперіоду електрони відштовхуватимуться від анода і струму в лампі не буде (рис. 8.6). Отже, струм у колі буде незмінного напрямку, але пульсуючим. У сучасній електроніці замість лампових (вакуумних) діодів використовують напівпровідникові (див. § 9).

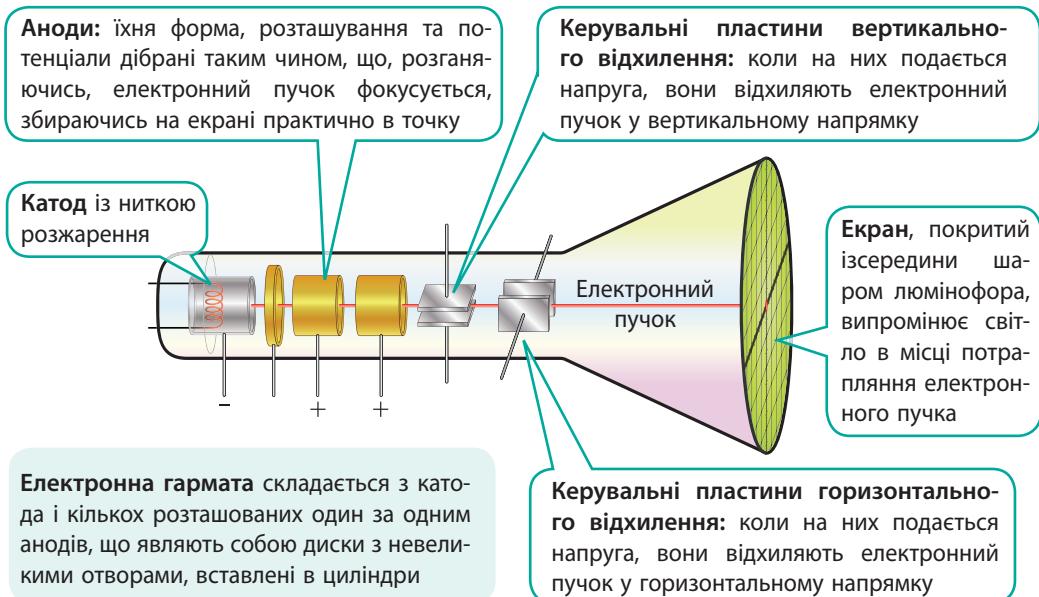
### 3 Електронні пучки: їх властивості та застосування

Якщо в аноді лампового діода зробити отвір, то частина електронів, прискорених електричним полем, влетить у цей отвір і створить за анодом **електронний пучок** — потік електронів, які швидко рухаються.

*Властивості електронних пучків:*

- 1) спричиняють нагрівання тіл у разі потрапляння на їх поверхню;
- 2) викликають появу рентгенівського випромінювання в разі швидкого гальмування;
- 3) викликають світіння деяких речовин і матеріалів (так званих люмінофорів);
- 4) відхиляються електричним і магнітним полями.

Першу властивість використовують для плавлення надчистих металів, для зварювання, спаювання та різання металів у вакуумі. Другу властивість використовують у рентгенівських трубках: під час різкого гальмування електронного пучка виникають електромагнітні хвилі частотою понад  $2 \cdot 10^{17}$  Гц. Третю і четверту властивості використовують в *електронно-променевих трубках* — вакуумних пристроях з керованим електронним пучком і спеціальним екраном, який світиться в місцях потрапляння електронів (рис. 8.7). Електронно-променева трубка тривалий час була основним елементом *осцилографа* — пристрою для дослідження змінних процесів в електрических колах.



**Рис. 8.7.** Принципова будова електронно-променевої трубки з електростатичним керуванням електронним пучком



### Підбиваємо підсумки

- Електричний струм у вакуумі являє собою напрямлений рух вільних електронів. Для створення струму у вакуумі необхідно джерело електронів, у ролі якого використовують металеві провідники, нагріті до високої температури, опромінені світлом тощо.
- Енергію, яку має витратити електрон, щоб залишити поверхню металу, називають роботою виходу. Електрон може залишити метал, якщо кінетична енергія електрона буде більшою за роботу виходу або дорівнюватиме їй:  $\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$ . Процес випромінювання електронів із поверхні металів називають електронною емісією.
- Термоелектронна емісія — процес випромінювання електронів нагрітими тілами. Явище термоелектронної емісії набуло широкого застосування у вакуумних електронних пристроях, наприклад у вакуумних лампах й електронно-променевих трубках.



### Контрольні запитання

1. Що являє собою електричний струм у вакуумі? 2. У чому полягає явище електронної емісії? 3. За якої умови електрон може залишити поверхню провідника? 4. Опишіть процес утворення електронної хмари. 5. Чому вакуумний діод має однобічну провідність? 6. Де застосовують вакуумні діоди? 7. Назвіть основні властивості електронних пучків. Де їх застосовують? 8. Назвіть основні частини електронно-променевої трубки. Якими є їхні функції?

**Вправа № 8**

1. Установіть відповідність між потенціалами керувальних пластин електронно-променевої трубки та напрямком відхилення світлої точки на її екрані (рис. 1).
- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1 $\Phi_1 = \Phi_2$ , $\Phi_3 > \Phi_4$ | A Відхиляється вгору          |
| 2 $\Phi_1 > \Phi_2$ , $\Phi_3 > \Phi_4$ | B Відхиляється вниз           |
| 3 $\Phi_1 < \Phi_2$ , $\Phi_3 = \Phi_4$ | C Відхиляється ліворуч        |
|   | D Відхиляється праворуч угору |
2. Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб вилетіти з поверхні катоду, покритого барій оксидом?
3. В електронно-променевій трубці потік електронів проходить прискорювальну різницю потенціалів 10 кВ. Якої середньої швидкості набувають електрони? Вважайте, що початкова швидкість руху електронів дорівнює нулю.
4. У більшості електронно-променевих трубок керування електронним пучком відбувається за допомогою магнітного поля. На рис. 2 електронний пучок відхиляється вліво. Згадайте правило лівої руки та визначте, як направлено керувальне магнітне поле, які котушки його створюють і який напрямок струму в цих котушках.

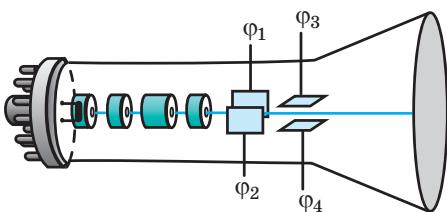


Рис. 1

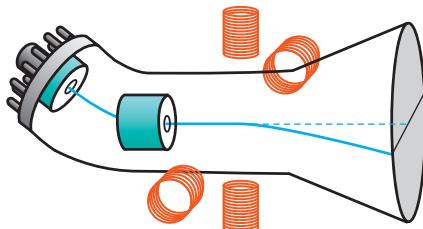


Рис. 2

5. Сучасні ТВ-панелі працюють на рідких кристалах або світлодіодах, мають товщину кілька сантиметрів й так мало важать, що кріпляться на стіні за допомогою магнітів. А якими були телевізори першого покоління? Дізнайтесься.

**Фізика і техніка в Україні**

**Вадим Євгенович Лашкар'єв** (1903–1974) — видатний український радянський науковець, із ім'ям якого пов'язані становлення та розвиток фізики і техніки напівпровідників в Україні. В. Е. Лашкар'єв — один із «батьків» транзистора. Зараз без цього пристрою не працює жоден електронний прилад.

Вадим Євгенович народився в Києві, навчався в Київському інституті народної освіти. Згодом на запрошення академіка А. Ф. Йоффе він очолив лабораторію в Ленінградському фізико-технічному інституті. Дослідження В. Е. Лашкар'єва з розподілу електронної густини в кристалах виявилися настільки значними, що в 1935 р. ученному було присуджено науковий ступінь доктора фізико-математичних наук без захисту дисертації.

У 1939 р. В. Е. Лашкар'єв повернувся до Києва і почав працювати в Інституті фізики Академії наук УРСР. У 1941 р. вчений експериментально виявив *p-n*-перехід у купрум(I) оксиді. В. Е. Лашкар'єв не тільки відкрив *p-n*-перехід і дослідив вплив домішок на це явище — в 1946 р. учений виявив біополярну дифузію нерівноважних носіїв електричного струму, а в 1948 р. побудував загальну теорію фото-ЕРС у напівпровідниках.

Визнанням видатних наукових результатів В. Е. Лашкар'єва стало створення в 1960 р. Інституту напівпровідників АН УРСР, який учений очолив. Із 2002 р. Інститут фізики напівпровідників НАНУ носить його ім'я.

## § 9. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ



Кожен із вас добре знає, як виглядає звичайна лампа розжарювання. Приблизно такий самий розмір мають і вакуумні лампи — діоди і тріоди. А тепер уявіть, що у вашому смартфоні, мікросхема процесора якого містить кілька мільярдів мікротранзисторів, замість транзисторів використали тріоди... Уявили собі розмір такого смартфона? Кілька багатоповерхових будинків! Тепер ви розумієте, чому поява в 1960-х рр. напівпровідникових пристрій спричинила справжню технічну революцію. Про напівпровідникові пристрії та електричний струм у напівпровідниках ітиметься в цьому параграфі.

### 1 Якими є особливості провідності напівпровідників

Напівпровідники, як це випливає з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провідниками і діелектриками (рис. 9.1).

У ході вивчення залежності провідності напівпровідників від зовнішніх чинників виявилось:

- 1) на відміну від металевих провідників питомий опір напівпровідників зазвичай зменшується з підвищеннем температури (рис. 9.2);
- 2) питомий опір більшості напівпровідників зменшується зі збільшенням освітленості;
- 3) різко зменшити питомий опір напівпровідників може введення домішок.

Саме ці властивості забезпечили широке застосування напівпровідників.

### 2 Власна провідність напівпровідників

Розглянемо будову чистих (без домішок) напівпровідників на прикладі силіцію (рис. 9.3). У кристалі силіцію кожен атом Силіцію має чотири валентні електрони, які «відповідають» за зв'язок між сусідніми атомами: атом Силіцію ніби «позичає» своїм сусідам по одному валентному електрону; сусідні атоми, у свою чергу, «позичають» йому свої валентні електрони. У результаті між кожними двома атомами Силіцію утворюється електронна пара «для спільногого користування». Такий зв'язок називають ковалентним.

Серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких



Рис. 9.1. Порядок питомого опору матеріалів. Стрілками показано напрямок збільшення концентрації вільних заряджених частинок (напрямок збільшення провідності)

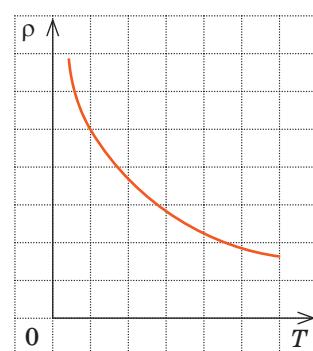
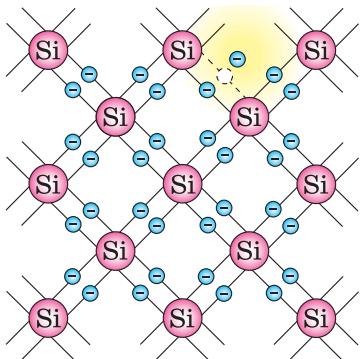
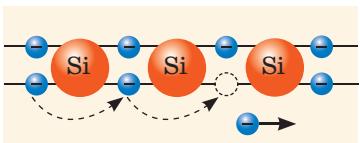


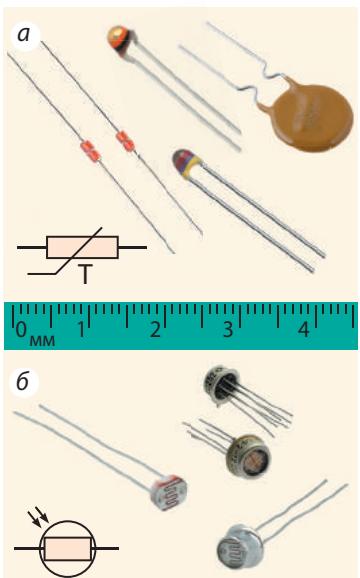
Рис. 9.2. Графік залежності питомого опору  $\rho$  напівпровідників від температури  $T$



**Рис. 9.3.** Схематичне зображення ковалентного зв'язку силіцію



**Рис. 9.4.** Механізм діркової провідності напівпровідників



**Рис. 9.5.** Вигляд і схематичне позначення: термісторів — напівпровідникових терморезисторів (а); фоторезисторів (б)

є достатньою, щоб покинути зв'язки і стати вільними. Один такий електрон показаний на жовтому полі рис. 9.3. Якщо напівпровідниковий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони почнуть рухатися до позитивного полюса джерела струму і в напівпровіднику виникне електричний струм.

Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають **електронною провідністю**.

Ще раз звернемося до рис. 9.3. Після того як електрон «залишив» валентний зв'язок, його місце виявиться «порожнім» — таке місце фізики називають **діркою**. Зрозуміло, що дірці приписують позитивний заряд. На вакантне місце (в дірку) може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку. Тоді дірка з'явиться біля сусіднього атома. Послідовність таких «стрибків» виглядає так, ніби дірка (позитивний заряд) переміщується в кристалі (рис. 9.4).

Провідність напівпровідників, зумовлену переміщенням дірок, називають **дірковою провідністю**.

У чистому напівпровіднику електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають **власною провідністю напівпровідників**.

Якщо напівпровідник нагріти або опромінити світлом, кількість вільних електронів і дірок збільшиться, відповідно збільшиться і провідність напівпровідника.

На залежності провідності напівпровідників від температури ґрунтуються дія **термісторів** (рис. 9.5, а), які застосовують для контролю та вимірювання температури, а також у колах захисту електричних пристрій від перегріву.

На залежності провідності напівпровідників від освітленості ґрунтуються дія **фоторезисторів** (рис. 9.5, б), які застосовують для вимірювання освітленості, у системах сигналізації та автоматики, для сортування виробів тощо. За допомогою фоторезисторів запобігають нещасним випадкам і аваріям, автоматично зупиняючи роботу обладнання в разі порушення процесу.

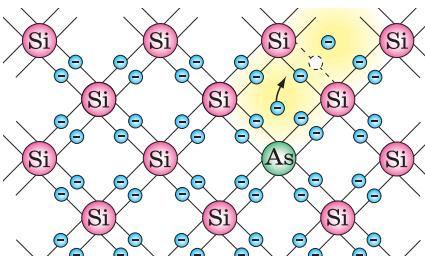
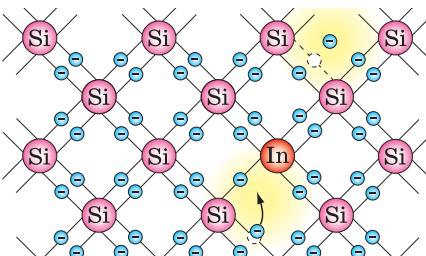


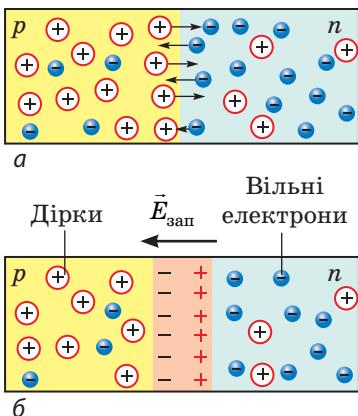
Як, на вашу думку, працює фоторезистор у пристрої для аварійного вимкнення (або ввімкнення) електричного кола? Де б ви застосували такий пристрій?

**3**

### Чому на провідність напівпровідників впливають домішки

Якщо до чистого напівпровідника додати невелику кількість певної домішки, то механізм його провідності зміниться. Це легко простежити на прикладі силіцію з невеликою кількістю домішки більшої або меншої валентності (Силіцій є чотиривалентним елементом).

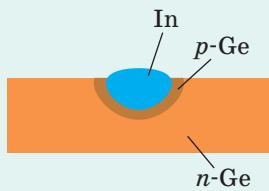
Домішкова провідність напівпровідників	
Донорні домішки	Акцепторні домішки
<p>Додамо у кристал силіцію домішку п'ятивалентного елемента, наприклад Арсену. Частина атомів Силіцію буде заміщена атомами Арсену. Чотири валентні електрони атома Арсену утворять парні електронні зв'язки із сусіднimi атомами Силіцію; п'ятому валентному електрону зв'язку не вистачить, тому він легко може стати вільним. У результаті майже кожний атом домішки дасть вільний електрон.</p> 	<p>Додамо у кристал силіцію домішку тривалентного елемента, наприклад Індію. Атом Індію має три валентні електрони, тому він може «встановити зв'язки» тільки з трьома атомами Силіцію. Щоб утримати структуру кристалічної гратки, відсутній електрон (четвертий) Індій «запозичує» в атомів Силіцію. У результаті кожний атом Індію спричиняє утворення дірки.</p> 
<p>Домішки, атоми яких відносно легко віддають електрони, називають <b>донорними домішками</b> (від латин. <i>donare</i> — дарувати, жертвувати).</p> <p>Бачимо, що донорні домішки додають до кристала тільки електрони, а додаткові дірки не утворюються, тому <i>в напівпровідниках із донорними домішками концентрація вільних електронів є значно вищою, ніж концентрація дірок.</i></p> <p>Напівпровідники з переважно електронною провідністю називають <b>напівпровідниками <i>n</i>-типу</b> (від латин. <i>negativus</i> — негативний).</p>	<p>Домішки, атоми яких «запозичують» електрони, називають <b>акцепторними домішками</b> (від латин. <i>acceptor</i> — той, що приймає).</p> <p>Бачимо, що акцепторні домішки додають до напівпровідникового кристала тільки дірки, а додаткові вільні електрони не утворюються. <i>У напівпровідниках із акцепторними домішками основні носії струму — дірки.</i></p> <p>Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають <b>напівпровідниками <i>p</i>-типу</b> (від латин. <i>positivus</i> — позитивний).</p>
<p>Оскільки за наявності домішок кількість носіїв струму збільшується (кожний атом домішки дає вільний електрон або дірку), провідність напівпровідників із домішками є набагато кращою, ніж провідність чистих напівпровідників.</p>	



**Рис. 9.6.** Формування *p-n*-перехіду

### Отримання кристалів із *p-n*-перехідом

Щоб отримати *p-n*-перехід, у напівпровідниковому кристалі слід утворити дві контактні ділянки з різними типами провідності. Сплавний метод. На пластиинку монокристала з донорною домішкою, наприклад на германій (*n*-Ge), кладуть шматочок індію і нагрівають до 500 °C. Сплавлюючись, германій та індій утворюють тонкий шар напівпровідника *p*-типу (*p*-Ge).



Дифузний метод. Кристал з акцепторною домішкою, наприклад силіцій (*p*-Si), нагрівають до температури близько 700 °C і спрямовують на його поверхню випари арсену. Атоми Арсену, дифундуючи в поверхневий шар кристалу, утворюють напівпровідник *n*-типу (*n*-Si).

### 4 Як утворюється *p-n*-перехід

Електронно-дірковий перехід (*p-n*-перехід) — це ділянка контакту двох напівпровідників із різними типами провідності — дірковою (напівпровідник *p*-типу) та електронною (напівпровідник *n*-типу).

Розглянемо процеси, які відбуваються в місці контакту. Відразу після того як відбувся контакт двох напівпровідників із різними типами провідності, починається процес дифузії електронів і дірок. Електрони дифундують у напівпровідник *p*-типу, і деякі з них рекомбінують із дірками; дірки «дифундують» у напівпровідник *n*-типу, і деякі з них рекомбінують із вільними електронами. Тобто відбуваються процеси відновлення зв'язків (рис. 9.6, а). Унаслідок цих процесів:

- 1) у прилеглих до місця контакту ділянках напівпровідників зменшується концентрація вільних носіїв струму (*n*-ділянка втрачає вільні електрони, *p*-ділянка — дірки), тому опір ділянки біля місця контакту істотно збільшується;

- 2) прилегла до місця контакту *n*-ділянка набуває позитивного заряду; прилегла до місця контакту *p*-ділянка набуває негативного заряду.

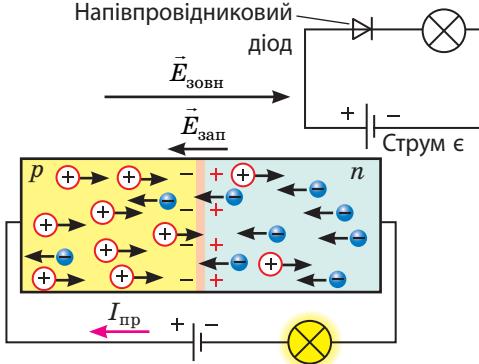
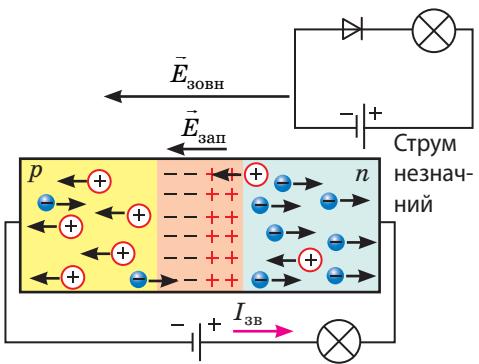
Таким чином, навколо місця контакту формується подвійний запірний шар (*p-n*-перехід), електричне поле якого ( $\vec{E}_{\text{зап}}$ ) перешкоджає подальшій дифузії електронів і дірок (рис. 9.6, б).

### 5 Чому напівпровідниковий діод має однобічну провідність

Напівпровідниковий пристрій, у внутрішній будові якого сформований один *p-n*-перехід, називають напівпровідниковим діодом.

Будь-який напівпровідниковий діод складається з двох контактних напівпровідниківих ділянок із різними типами провідності — електронною (*n*-ділянка) і дірковою (*p*-ділянка); до кожної ділянки приєднано виводи. Основна властивість напівпровідникового діода — пропускати електричний струм переважно в одному напрямку. З'ясуємо, чому *p-n*-перехід має однобічну провідність.

**Увімкнення напівпровідникового діода в електричне коло**

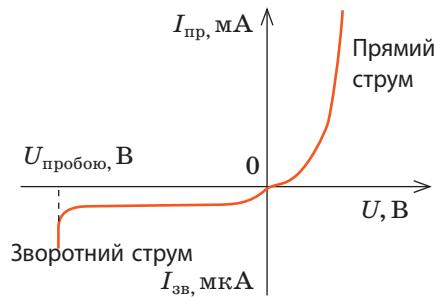
Пряме ввімкнення	Зворотне ввімкнення
<p>Підключимо кристал із сформованим у ньому <math>p</math>-<math>n</math>-переходом до джерела струму так, щоб <math>p</math>-ділянка була з'єднана з позитивним полюсом джерела, а <math>n</math>-ділянка — з негативним.</p>  <p>Напівпровідниковий діод</p> <p>Струм <math>\epsilon</math></p> <p><math>E_{\text{зовн}}</math></p> <p><math>E_{\text{зап}}</math></p> <p><math>I_{\text{пр}}</math></p> <p>Струм <math>\epsilon</math></p> <p><math>E_{\text{зовн}}</math></p> <p><math>E_{\text{зап}}</math></p> <p>Струм незначний</p> <p><math>I_{\text{зв}}</math></p>	<p>Підключимо кристал із сформованим у ньому <math>p</math>-<math>n</math>-переходом до джерела струму так, щоб <math>p</math>-ділянка була з'єднана з негативним полюсом джерела, а <math>n</math>-ділянка — з позитивним.</p>  <p>Напівпровідниковий діод</p> <p>Струм незначний</p> <p><math>E_{\text{зовн}}</math></p> <p><math>E_{\text{зап}}</math></p> <p><math>I_{\text{зв}}</math></p> <p>Струм <math>\epsilon</math></p> <p><math>E_{\text{зовн}}</math></p> <p><math>E_{\text{зап}}</math></p>

Електрони почнуть рух до позитивного полюса джерела струму, а дірки — до негативного. Запірний шар поповниться вільними електронами і дірками, тому його опір зменшиться. Оскільки через місце контакту рухаються основні носії струму (електрони з  $n$ -ділянки, дірки з  $p$ -ділянки), яких багато, то *в колі існує помітний електричний струм*.

Електрони почнуть рух до позитивного полюса джерела струму, дірки — до негативного. Запірний шар розшириться, і його опір збільшиться. Через місце контакту рухаються тільки неосновні носії струму (вільні електрони з  $p$ -ділянки, дірки з  $n$ -ділянки), яких дуже мало, тому *сила зворотного струму незрівнянно менша від прямого*.

**Зверніть увагу!**

1. Напруга запірного шару становить 0,3–0,7 В (залежно від складу напівпровідників), тому в разі прямого ввімкнення і за напруги на діоді меншої від цього значення рух основних носіїв струму через  $p$ - $n$ -переїд не відбудуватиметься.
2. Якщо при зворотному ввімкненні напруга на діоді перевищить певне максимальне значення, діод вийде з ладу (відбудеться пробій запірного шару), а його відновлення є неможливим.



*Вольт-амперна характеристика (ВАХ) напівпровідникового діода*

Оскільки напівпровідникові діоди пропускають електричний струм переважно в одному напрямку, їх, як і лампові (вакуумні) діоди, використовують для випрямлення змінного струму. Напівпровідникові діоди мають низку переваг перед ламповими: вони мініатюрні, їх легше виготовити, а отже, вони дешевші; для їх роботи не потрібно витрачати енергію на нагрівання. Тому в сучасній радіоелектроніці використовують саме напівпровідникові діоди.



## Підбиваємо підсумки

• Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних і зв'язаних електронів (електронна і діркова провідність). У чистому напівпровіднику електричний струм створюється однаковою кількістю вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників.

• У разі введення в чистий напівпровідник домішки з більшою валентністю (донорної домішки) вільних електронів стає в багато разів більше, ніж дірок. Напівпровідники з переважно електронною провідністю називають напівпровідниками *n*-типу.

• У разі введення в чистий напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає в багато разів більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p*-типу.

• Якщо напівпровідник містить дві дотичні ділянки з різними типами провідності, то на межі дотику утворюється *p-n*-перехід, який має однобічну провідність. Пристрій, у внутрішній будові якого сформований один *p-n*-перехід, називають напівпровідниковим діодом.

## Контрольні запитання



1. Якими є основні властивості напівпровідників? 2. Поясніть механізм власної провідності напівпровідників. 3. Як зміниться опір чистого напівпровідника, якщо додати домішку? 4. Яку домішку називають донорною? 5. Яку домішку потрібно ввести, щоб одержати напівпровідник *p*-типу? 6. Як можна виготовити кристал із електронно-дірковим переходом? 7. Чому напівпровідниковий кристал із *p-n*-перехідом має однобічну провідність? 8. Що таке напівпровідниковий діод? Наведіть його позначення на електричній схемі.



## Вправа № 9

1. Які з наведених тверджень є істинними?
  - А Напівпровідник з акцепторною домішкою є напівпровідником *p*-типу.
  - Б Провідність напівпровідників збільшується зі збільшенням освітленості.
  - В Опір *p-n*-переходу залежить від напрямку струму.
2. На рис. 1 наведено схему прямого ввімкнення напівпровідника з *p-n*-перехідом у коло постійного струму. Якою є полярність підключення джерела струму до клем *A* і *B*?
3. Електричне коло (рис. 2) складається з п'яти однакових резисторів опором 2 Ом, двох ідеальних діодів та ідеального джерела струму (опори діодів і джерела струму дорівнюють нулю). Визначте: 1) загальний опір кола; 2) відношення сили струму в колі до сили струму після зміни полярності підключення джерела струму.
4. Електрична схема, зображена на рис. 3, має назву *діодний міст*. Дізнайтесь, як «працює» ця схема і для чого вона призначена.

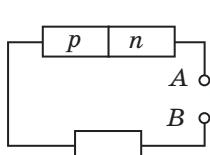


Рис. 1

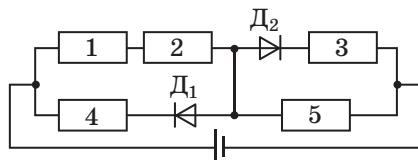


Рис. 2

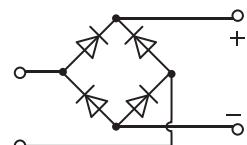


Рис. 3

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 1

**Тема.** Перевірка законів послідовного і паралельного з'єднань провідників.

**Мета:** експериментально перевірити співвідношення, які справджаються в разі послідовного та в разі паралельного з'єднань провідників.

**Обладнання:** джерело струму, вольтметр, амперметр, ключ, два резистори, з'єднувальні проводи.



## ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиць.

### ІІ Підготовка до експерименту

- Накресліть схеми двох електричних кіл. Кожне коло має містити два резистори, які через ключ з'єднані з джерелом струму: *схема 1* — резистори з'єднані послідовно; *схема 2* — резистори з'єднані паралельно.
- Біля кожної схеми запишіть співвідношення, які вам необхідно перевірити (формули для визначення загальної сили струму, загальної напруги, загального опору).

### ІІІ Експеримент

#### Дослід 1. Дослідження послідовного з'єднання провідників

- Складіть електричне коло за накресленою вами схемою 1.
- Виміряйте напругу на першому резисторі ( $U_1$ ), на другому резисторі ( $U_2$ ), на обох резисторах разом ( $U$ ). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.
- Виміряйте силу струму, увімкнувши амперметр спочатку між джерелом струму і першим резистором ( $I_1$ ), потім між першим і другим резисторами ( $I_2$ ), а потім між ключем і джерелом струму ( $I$ ). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.

Таблиця 1

Напруга, В				$\varepsilon_{U\text{посл}}, \%$	Сила струму, А			Опір, Ом				$\varepsilon_{R\text{посл}}, \%$
$U_1$	$U_2$	$U$	$U_{\text{посл}}$		$I_1$	$I_2$	$I$	$R_1$	$R_2$	$R$	$R_{\text{посл}}$	

#### Дослід 2. Дослідження паралельного з'єднання провідників

- Складіть електричне коло за накресленою вами схемою 2.
- Виміряйте напругу на кожному резисторі ( $U_1$ ,  $U_2$ ), на обох резисторах разом ( $U$ ). Накресліть схему електричного кола.
- Виміряйте силу струму в першому резисторі ( $I_1$ ), у другому резисторі ( $I_2$ ), у нерозгалуженій ділянці кола ( $I$ ). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.

Таблиця 2

Напруга, В			Сила струму, А				$\varepsilon_{I\text{парал}}, \%$	Опір, Ом				$\varepsilon_{R\text{парал}}, \%$
$U_1$	$U_2$	$U$	$I_1$	$I_2$	$I$	$I_{\text{парал}}$		$R_1$	$R_2$	$R$	$R_{\text{парал}}$	

### Опрацювання результатів експерименту

- Користуючись законом Ома для ділянки кола, для кожного досліду визначте опір першого резистора ( $R_1$ ), опір другого резистора ( $R_2$ ), загальний опір ділянки кола ( $R$ ).
- Користуючись співвідношеннями для послідовного і паралельного з'єднань споживачів, для кожного досліду визначте загальний опір ділянки кола, напругу на ділянці, силу струму в колі:

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2, \quad U_{\text{посл}} = U_1 + U_2; \quad R_{\text{парал}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_{\text{парал}} = I_1 + I_2.$$

- Оцініть відносну похибку експериментального підтвердження кожної з рівностей:

$$\varepsilon_{R_{\text{посл}}} = \left| 1 - \frac{R_{\text{посл}}}{R} \right| \cdot 100\%, \quad \varepsilon_{U_{\text{посл}}} = \left| 1 - \frac{U_{\text{посл}}}{U} \right| \cdot 100\%;$$

$$\varepsilon_{R_{\text{парал}}} = \left| 1 - \frac{R_{\text{парал}}}{R} \right| \cdot 100\%, \quad \varepsilon_{I_{\text{парал}}} = \left| 1 - \frac{I_{\text{парал}}}{I} \right| \cdot 100\%.$$

### Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулуйте і запишіть висновок, у якому зазначте: 1) які досліди ви проводили; 2) які співвідношення були підтвердженні; 3) які чинники вплинули на точність результатів експерименту.

### Творче завдання

Поміркуйте, який експеримент щодо визначення опору резистора можна провести, якщо в обладнанні до лабораторної роботи: 1) замість амперметра використати резистор відомого опору; 2) замість вольтметра використати резистор відомого опору. Запишіть план кожного експерименту, накресліть відповідні схеми. Проведіть експерименти.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 2

**Тема:** Вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму.

**Мета:** визначити ЕРС і внутрішній опір батареї гальванічних елементів на основі результатів вимірювань сили струму в колі та напруги на зовнішній ділянці кола.

**Обладнання:** джерело струму (батарея гальванічних елементів), вольтметр, амперметр, ключ, реостат, з'єднувальні проводи.



### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

## II Підготовка до експерименту

- Накресліть схему електричного кола, зображеного на рисунку.
- Запишіть закон Ома для повного кола й отримайте формулу для визначення внутрішнього опору джерела струму (візьміть до уваги, що  $IR = U$ ).

## І Експеримент

- Складіть електричне коло за накресленою вами схемою. Установіть повзунок реостата в таке положення, щоб опір реостата був максимальним.
- Виміряйте напругу на клемах джерела струму у випадку, коли ключ розімкнено (отримане значення відповідатиме ЕРС джерела струму —  $\mathcal{E}_{\text{вим}}$ ).
- Замкніть ключ і виміряйте силу струму  $I$  в колі та напругу  $U$  на зовнішній ділянці кола.
- Пересуньте повзунок реостата (тобто змініть опір реостата) і знову виміряйте силу струму  $I$  в колі та напругу  $U$  на зовнішній ділянці кола.
- Повторіть дії, описані в п. 4, ще тричі.

Номер досліду	ЕРС $\mathcal{E}_{\text{вим}}$ , В	Сила струму $I$ , А	Напруга $U$ , В	Внутрішній опір $r$ , Ом	Середнє значення внутрішнього опору $r_{\text{cep}}$ , Ом	Результати вимірювань: $r = r_{\text{cep}} \pm \Delta r$ , Ом $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{вим}} \pm \Delta \mathcal{E}$ , В

## ІІ Опрацювання результатів експерименту

- Скориставшись формuloю  $r = \frac{\mathcal{E}_{\text{вим}} - U}{I}$ , визначте внутрішній опір  $r$  джерела струму за результатом кожного досліду та середнє значення внутрішнього опору ( $r_{\text{cep}}$ ):  $r_{\text{cep}} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}{5}$ .
- Оцініть абсолютну похибку вимірювання ЕРС джерела струму:  $\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{прил}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{вип}}$ , де  $\Delta \mathcal{E}_{\text{прил}}$  — похибка вольтметра (див. Додаток 2);  $\Delta \mathcal{E}_{\text{вип}}$  — випадкова похибка (похибка відліку), яка в цьому випадку дорівнює половині ціни поділки шкали вольтметра.
- Оцініть абсолютну ( $\Delta r$ ) і відносну ( $\varepsilon_r$ ) похибки вимірювання внутрішнього опору джерела струму:
$$\Delta r = \frac{|r_{\text{cep}} - r_1| + |r_{\text{cep}} - r_2| + |r_{\text{cep}} - r_3| + |r_{\text{cep}} - r_4| + |r_{\text{cep}} - r_5|}{5}; \quad \varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_{\text{cep}}}.$$
- Округліть результати, скориставшись правилами округлення (див. Додаток 2), і подайте результати вимірювання ЕРС і внутрішнього опору у вигляді:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{вим}} \pm \Delta \mathcal{E}$ ;  $r = r_{\text{cep}} \pm \Delta r$ .

## Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулюйте і запишіть висновок, у якому зазначте: 1) які фізичні величини ви вимірювали; значення якої величини було встановлено шляхом прямих вимірювань, а якої — непрямих; 2) якими є результати вимірювань; 3) у чому причина похибок вимірювань; вимірювання якої величини дає найбільшу похибку.

## Творче завдання

1. Доведіть, що графік залежності напруги  $U$  на зовнішній ділянці кола від сили струму  $I$  в колі — відрізок прямої, який починається в точці ( $I = 0$ ;  $U = \mathcal{E}$ ) і закінчується в точці ( $I = \frac{\mathcal{E}}{r}$ ;  $U = 0$ ).
2. За отриманими в ході експерименту даними побудуйте графік залежності  $I(U)$ . (Про правила побудови графіка за експериментальними точками див. у Додатку 2.)
3. Продовживши графік до перетину з осями напруги і сили струму, визначте ЕРС джерела струму і силу струму короткого замикання.
4. Скориставшись формулою  $I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ , визначте внутрішній опір джерела струму.
5. Яке із значень ЕРС джерела струму і значень внутрішнього опору, виміряних різними методами, є найбільш точними? Поясніть чому.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 3

**Тема.** Вимірювання температурного коефіцієнта опору металу.

**Мета:** експериментально довести, що залежність електричного опору металевого провідника від температури є лінійною; визначити температурний коефіцієнт опору міді.

**Обладнання:** мультиметр, термометр, пристрій для вивчення залежності опору металів від температури, нагрівник, посудина з водою, штатив із муфтою та лапкою, лампа на підставці, міліметровий папір.



### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

## II

### Підготовка до експерименту

1. Зберіть установку, подану на рисунку.
2. Перемкніть тумблер мультиметра на вимірювання опору ( $\Omega$ ), встановивши його навпроти позначки  $10^3$  Ом.

## Експеримент

1. Виміряйте початкову температуру  $t_0$  та опір  $R$  мідного дроту за цієї температури.

*Зверніть увагу!* Торкатися клем пристрою щупами мультиметра слід тільки в момент вимірювання опору.

2. Увімкніть нагрівник і, слідкуючи за показами термометра, визначте опір дроту через кожні  $10^{\circ}\text{C}$  в інтервалі від  $30$  до  $90^{\circ}\text{C}$ . Вимкніть нагрівник.

Температура $t$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_0 =$	30	40	50	60	70	80	90
Опір $R$ , кОм	$R =$							

## Опрацювання результатів експерименту

1. За даними таблиці побудуйте на міліметровому папері графік залежності опору дроту від його температури —  $R(t)$ . (Про правила побудови графіка за експериментальними точками див. у Додатку 2.)
2. Продовживши графік залежності  $R(t)$  до перетину з віссю ординат, знайдіть опір  $R_0$  мідного дроту за температури  $0^{\circ}\text{C}$ .
3. Виберіть на графіку довільну точку та визначте для неї відповідні значення опору  $R$  і температури  $t$  мідного дроту. Скориставшись формuloю  $\alpha_{\text{sep}} = \frac{R - R_0}{R_0 t}$ , визначте середнє значення температурного коефіцієнта опору міді.
4. Оцініть відносну й абсолютну похибки експерименту, порівнявши отриманий результат із табличним значенням температурного коефіцієнта опору міді (див. Додаток 1):

$$\varepsilon_\alpha = \left| 1 - \frac{\alpha_{\text{sep}}}{\alpha_{\text{табл}}} \right|; \Delta \alpha = \alpha_{\text{sep}} \cdot \varepsilon.$$

## Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент і його результати. За результатами експерименту сформулюйте і запишіть висновок, у якому зазначте: 1) яку фізичну величину ви вимірювали; 2) яким є результат вимірювання; 3) у чому причина похибки вимірювання.

## Творче завдання

Продумайте й запишіть перелік необхідного обладнання та план проведення експерименту з визначення температури нитки лампи розжарювання в робочому стані. Вважайте, що нитка виготовлена із вольфраму. Проведіть експеримент.

# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ І «ЕЛЕКТРОДИНАМІКА».

## Частина 1. Електричний струм

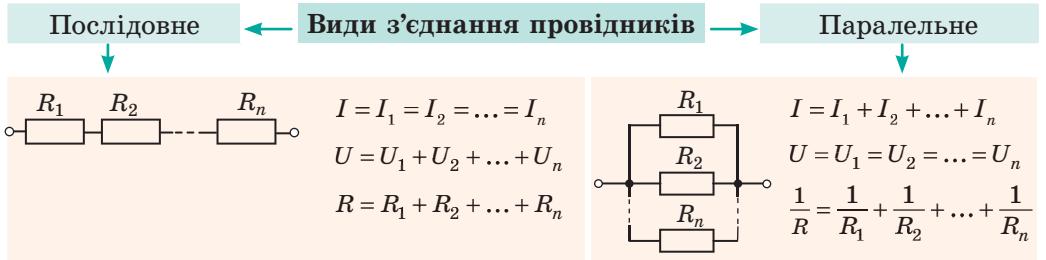
1. Ви поглибили свої знання про *електричний струм* — напрямлений рух вільних заряджених частинок.



2. Ви згадали, що дізнатися про наявність електричного струму можна *за його діями*, а електричне поле створюється *джерелами струму*.

3. Ви вивчили *фізичні величини*, які застосовують для характеристики електричного кола, і простежили *зв'язок між ними*.

4. Ви згадали *закономірності послідовного і паралельного з'єднань споживачів*.



5. Ви ознайомилися *із законом Ома для повного кола*:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ ;  
згадали закон Ома для діленки кола:  $I = \frac{U}{R}$ .

6. Ви згадали формули для визначення *роботи* і *потужності струму* та *кількості теплоти*, яка завжди виділяється під час проходження струму.

**Робота струму**

$$A = UIt$$

**Потужність струму**

$$P = UI$$

**Кількість теплоти**

$$Q = I^2 Rt$$

7. Ви дізналися про особливості *електричного струму в різних середовищах*.

### Електричний струм у різних середовищах

Метали	Рідини	Гази	Напівпровідники	Вакуум
<p>Напрямлений рух вільних електронів.</p> <p>Залежність питомого опору від температури:  <math>\rho = \rho_0(1 + \alpha t)</math> ;  <math>\alpha</math> — температурний коефіцієнт опору</p>	<p>Напрямлений рух вільних іонів.</p> <p>Закони електролізу:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>m = kq = kIt</math></li> <li><math>k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}</math></li> </ol>	<p>Напрямлений рух вільних іонів і електронів.</p> $\frac{m_e v^2}{2} \geq W_i$ <p><math>W_i</math> — енергія іонізації</p>	<p>Напрямлений рух вільних електронів і дірок (вільних і звязаних електронів)</p>	<p>Напрямлений рух електронів.</p> $\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$ <p><math>A_{\text{вих}}</math> — робота виходу електронів</p>



# ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ I

## «ЕЛЕКТРОДИНАМІКА». Частина 1. Електричний струм

**Завдання 1.** Опір кожного резистора на ділянці кола однаковий і дорівнює 20 Ом (рис. 1).

1. (2 бали) Визначте опір ділянки кола в разі, коли буде замкненим тільки ключ  $K_2$ :  
а) 20 Ом; б) 40 Ом; в) 10 Ом; г) 30 Ом.
2. (3 бали) Який ключ необхідно замкнути, щоб опір ділянки кола склав 60 Ом?
3. (3 бали) До ділянки кола прикладено напругу 120 В. Які ключі необхідно замкнути, щоб амперметр показав 12 А? Обґрунтуйте свою відповідь.

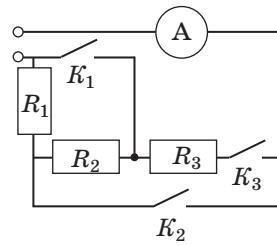


Рис. 1

**Завдання 2.** Спіраль електроплити виготовлена з ніхромового дроту перерізом  $0,15 \text{ mm}^2$  і довжиною 10 м. Плиту увімкнено в мережу напругою 220 В.

1. (2 бали) Обчисліть кількість теплоти, що виділиться в спіралі електроплити за 20 хв роботи.
2. (3 бали) Обчисліть об'єм води, узятої за температури  $15^\circ\text{C}$ , яку електроплита може довести до кипіння за 20 хв. ККД електроплити — 80 %.

**Завдання 3.** До джерела струму з ЕРС 1,5 В і внутрішнім опором 1 Ом приєднано резистор опором 4 Ом.

1. (2 бали) Якою є сила струму в колі?  
а) 0,3 А; б) 4,4 А; в) 1,5 А; г) 7,5 А.
2. (3 бали) Обчисліть опір шунта, який необхідно приєднати до міліамперметра з межею вимірювання 10 мА, щоб цим міліамперметром можна було виміряти силу струму в колі. Опір міліамперметра — 9,9 Ом.

**Завдання 4.** На рис. 2 наведено схему електричного кола, до складу якого входить дві електролітичні ванни: з розчином  $\text{CuSO}_4$  (ванна 1) і з розчином  $\text{AgNO}_3$  (ванна 2).

1. (1 бал) Які носії струму в електроліті?  
а) дірки; в) негативні йони;  
б) електрони; г) позитивні та негативні йони.
2. (3 бали) Визначте масу срібла, що виділилося на катоді ванни 2, якщо на катоді ванни 1 виділилося 0,36 г міді. Скільки часу тривав електроліз?

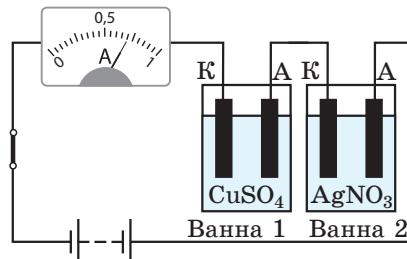


Рис. 2

**Завдання 5.** Сила струму у вольфрамовій нитці лампи розжарювання в момент увімкнення лампи у 12,5 разу перевищує силу робочого струму.

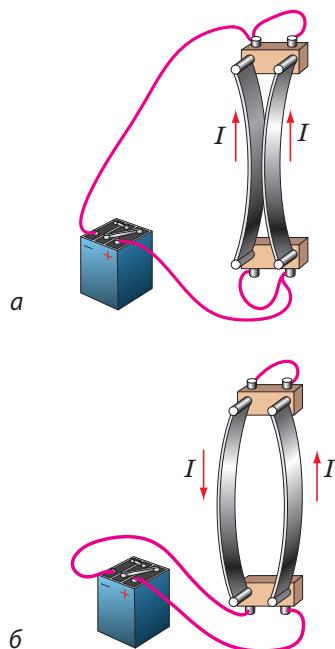
1. (1 бал) Опір нитки розжарення під час нагрівання:  
а) не змінюється; в)увесь час зменшується;  
б)увесь час збільшується; г)спочатку зменшується, а потім збільшується.
2. (2 бали) Обчисліть температуру нитки розжарення лампи в робочому стані, якщо в момент увімкнення її температура становить  $20^\circ\text{C}$ .

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Поділіть суму на два. Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

## ЧАСТИНА 2. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ



**Рис. 10.1.** Дослід Ерстеда: поблизу провідника зі струмом магнітна стрілка відхиляється від напрямку «північ — півден», намагаючись розташуватися перпендикулярно до провідника



**Рис. 10.2.** Схема досліду Ампера. Якщо в двох паралельних провідниках течуть струми одного напрямку, провідники притягуються (a); якщо течуть струми протилежних напрямків, провідники відштовхуються (б)



### § 10. МАГНІТНЕ ПОЛЕ

У 1813 р. данський фізик Ганс Крістіан Ерстед (1777–1851) писав: «Слід випробувати, чи здійснює електрика... якісі дії на магніті...». І лише взимку 1820 р. Ерстед спостерігає і досліджує явище відхилення магнітної стрілки біля провідника зі струмом (рис. 10.1). Це було першим експериментальним підтвердженням зв’язку електрики та магнетизму. Чому стрілка відхиляється? Чому розвертався, якщо змінити напрямок струму? Згадаємо.

#### 1

#### Які об’єкти створюють магнітне поле

Ви вже добре знаєте, що навколо заряджених тіл і заряджених частинок існує електричне поле, через яке між ними здійснюється електрична взаємодія; якщо заряджені частинки рухаються, то навколо них існує також і магнітне поле, через яке здійснюється магнітна взаємодія. Сучасна фізика розглядає єдину електромагнітну взаємодію. Вона відбувається через електромагнітне поле, яке має дві складові (две форми прояву) — електричне поле і магнітне поле. Розглянемо детальніше магнітне поле.

Візьмемо два тонкі гнуцькі провідники, розташуємо паралельно один одному і пропустимо в них електричний струм — провідники притягнуться або відштовхнуться один від одного незважаючи на те, що є електрично нейтральними (рис. 10.2). Уперше цей дослід продемонстрував у вересні 1820 р. французький математик і фізик Андре-Марі Ампер (1775–1836).

Ампер був прихильником теорії далекодії і вважав, що взаємодія провідників зі струмом здійснюється миттєво, а навколошній простір не бере участі в цій взаємодії.

Англійський фізик Майкл Фарадей (1791–1867) створив теорію близькодії, відповідно до якої заряджені частинки, що напрямлено рухаються в кожному із двох провідників зі струмом, створюють у навколошньому просторі магнітне поле. Магнітне поле одного провідника діє на другий провідник, і навпаки. Тобто взаємодія провідників зі струмом здійснюється з певною швидкістю через магнітне поле.

**Магнітне поле** — це форма матерії, яка створюється намагніченими тілами, провідниками зі струмом, змінними електричними полями, рухомими зарядженими тілами і частинками. Магнітне поле виявляється в дії на інші намагнічені тіла, провідники зі струмом, рухомі заряджені тіла й частинки, розташовані в цьому полі.

## 2 Силова характеристика магнітного поля

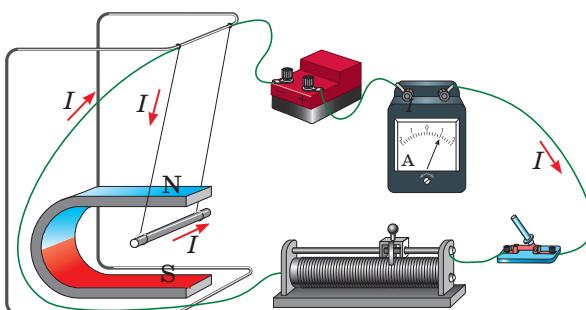
Якщо прямий провідник, виготовлений із немагнітного матеріалу, підвісити на проводах між полюсами постійного магніту і пропустити в провіднику струм, то провідник відхиливиться. Причиною такого відхилення є сила, яка діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля, — **сила Ампера**  $\vec{F}_A$  (рис. 10.3).

Змінюючи силу струму в провіднику, довжину активної частини провідника (тобто частини провідника, яка перебуває в магнітному полі), кут між провідником і лініями магнітної індукції магнітного поля, можна переконатися:

1) сила Ампера прямо пропорційна і силі струму  $I$ , і довжині  $l$  активної частини провідника, а отже, прямо пропорційна їх добутку:  $F \sim Il$ ;

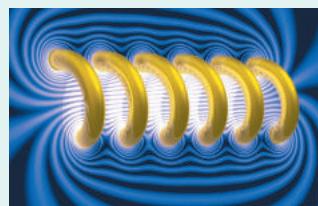
2) сила Ампера є максимальною, якщо провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції.

Оскільки  $F_{A\max} \sim Il$ , то для даної ділянки магнітного поля відношення  $\frac{F_{A\max}}{Il}$  не залежить ані від сили струму в провіднику, ані від довжини провідника, а залежить тільки



**Рис. 10.3.** Алюмінієвий провідник відхиляється в магнітному полі постійного магніту внаслідок дії сили Ампера

## Властивості магнітного поля



1. *Магнітне поле є матеріальним* — воно існує реально, незалежно від наших уявлень.

2. *Магнітне поле є складовою електромагнітного поля.*

3. *Магнітне поле створюють:*

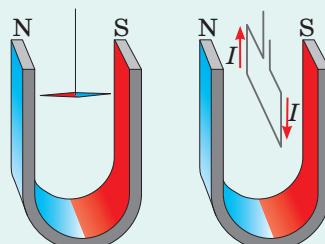
- намагнічені тіла;
- провідники зі струмом;
- рухомі заряджені частинки і тіла;
- змінне електричне поле.

4. *Магнітне поле діє з діякою силою:*

- на заряджені тіла й частинки, що рухаються в цьому полі;
- на провідники зі струмом;
- на намагнічені тіла.

5. *Магнітне поле чинить орієнтувальну дію:*

- на магнітну стрілку;
- на рамку зі струмом.



6. *Магнітне поле діє на будь-яку речовину, намагнічуєчи її певним чином.*

## Фізика в цифрах

### Найпотужніші магніти

■ Серед відомих нам джерел магнітного поля найсильніше магнітне поле у Всесвіті — до  $1 \cdot 10^{11}$  Тл — мають *магнітари* (магнітні нейтронні зорі). Для порівняння: магнітна індукція магнітного поля Сонця лише 5 мТл, Землі — у 100 разів менша.

■ У серпні 1918 р. японські фізики згенерували найпотужніше штучне магнітне поле у приміщенні — 1200 Тл. Для порівняння: магнітна індукція магнітного поля, яке створюють надпровідні електромагніти Великого адронного колайдера, — 8,3 Тл.

від властивостей магнітного поля. Тому це відношення обрали за *силову характеристику магнітного поля* — вона одержала назву *магнітна індукція*.

**Магнітна індукція**  $\vec{B}$  — векторна фізична величина, що характеризує силову дію магнітного поля і за модулем дорівнює відношенню максимальної сили, з якою магнітне поле діє на розташований у цьому полі прямий провідник зі струмом, до добутку сили струму в провіднику і довжини активної частини провідника:

$$B = \frac{F_{\text{Amax}}}{Il}$$

*Одниця магнітної індукції в СІ — тесла* (названа на честь сербського фізика *Ніколи Тесли* (1856–1943)):

$$[B] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Тл (Т)}.$$

**1 тесла** — це *магнітна індукція такого однорідного магнітного поля, яке діє з максимальною силою 1 ньютон на провідник завдовжки 1 метр, сила струму в якому 1 ампер.*



Магнітне поле діє на провідник завдовжки 10 см із максимальною силою 5 мН. Визначте магнітну індукцію цього магнітного поля, якщо сила струму в провіднику становить 2 А.

Магнітна індукція — векторна величина, тому, щоб її повністю визначити, слід знати не тільки її значення, а й напрямок. За напрямок вектора магнітної індукції в даній точці магнітного поля обрано *напрямок, у якому вказує північний полюс магнітної стрілки*, встановленої в цій точці (рис. 10.4, а).

*Напрямок вектора магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом і котушки зі струмом визначають за допомогою правила свердлиця або за допомогою правої руки:*

Якщо спрямувати великий палець правої руки за напрямком струму в провіднику, то чотири зігнуті пальці вкажуть напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля струму (рис. 10.4, б).

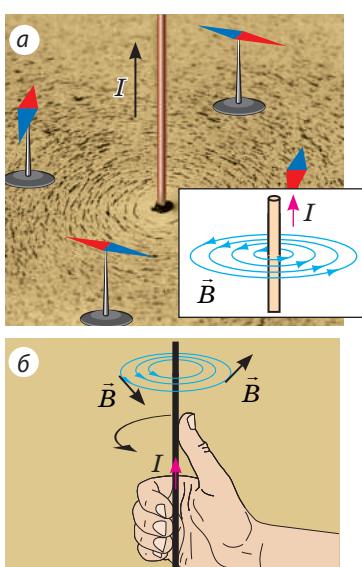


Рис. 10.4. Визначення напрямку магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом

Якщо чотири зігнуті пальці правої руки спрямувати за напрямком струму в катушці, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля всередині катушки (рис. 10.5).

### 3 Лінії магнітної індукції

Магнітні поля не сприймаються органами чуття людини. Щоб візуалізувати магнітні поля, М. Фарадей запропонував зображувати їх у вигляді *ліній магнітної індукції*.

**Лінії магнітної індукції** — умовні напрямлені лінії, у кожній точці яких дотична збігається з лінією, уздовж якої напрямлений вектор магнітної індукції.

Лінії магнітної індукції креслять таким чином, щоб їх щільність відображала значення модуля магнітної індукції на даній ділянці магнітного поля: чим більшим є модуль магнітної індукції, тим щільніше креслять лінії. *Зверніть увагу! Лінії магнітної індукції завжди замкнені: магнітне поле — це вихрове поле.*

Якщо на певній ділянці лінії магнітної індукції паралельні та розташовані на однаковій відстані одна від одної, таке магнітне поле є *однорідним* (рис. 10.6).

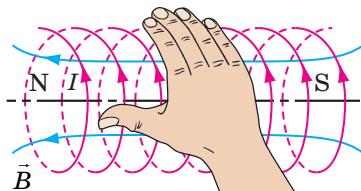
Магнітне поле в певній ділянці простору є *однорідним*, якщо в кожній точці ділянки вектори магнітної індукції однакові як за модулем, так і за напрямком.

У загальному випадку *магнітне поле є неоднорідним* — у різних його точках вектори магнітної індукції мають різні значення та напрямки, тому лінії магнітної індукції зазвичай викривлені, а їхня щільність є різною.

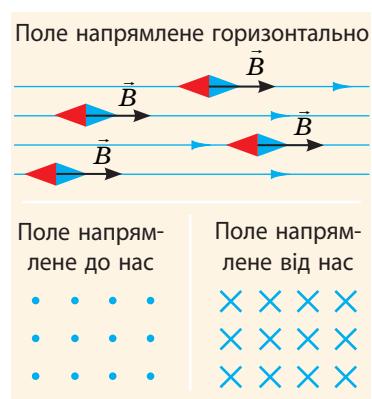
#### Магнітне поле соленоїда і штабового магніту

*Соленоїд* — циліндрична катушка, довжина якої значно більша за її діаметр. Конфігурації магнітних полів соленоїда і штабового магніту є одинаковими.

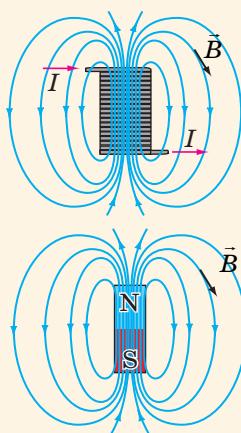
- I соленоїд, і штабовий магніт мають *два полюси* — північний N і південний S. На полюсах магнітне поле є найсильнішим, тому лінії магнітної індукції розташовані найщільніше.
- Лінії магнітної індукції магнітного поля і соленоїда, і штабового магніту *виходять із північного полюса і входять у південний*.
- Усередині і соленоїда, і магніту магнітне поле *майже однорідне*: лінії магнітної індукції паралельні та розташовані на одинакових відстанях.



**Рис. 10.5.** Визначення напрямку магнітної індукції магнітного поля катушки зі струмом



**Рис. 10.6.** Лінії магнітної індукції однорідного магнітного поля





## Підбиваємо підсумки

• Магнітне поле — це форма матерії (складова електромагнітного поля), яка створюється намагніченими тілами, провідниками зі струмом, змінними електричними полями і рухомими зарядженими тілами і частинками.

• Магнітна індукція  $\vec{B}$  — векторна фізична величина, що характеризує силову дію магнітного поля і за модулем дорівнює відношенню максимальної сили, з якою магнітне поле діє на розташований у цьому полі прямий провідник зі струмом, до добутку сили струму в провіднику і довжини активної частини провідника:  $B = \frac{F_{\text{Amax}}}{Il}$ . одиниця магнітної індукції в СІ — тесла.

• Напрямок вектора магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом і котушки зі струмом визначають за допомогою правої руки. Він збігається з напрямком, у якому вказує північний полюс магнітної стрілки.

• Лінії магнітної індукції — умовні напрямлені лінії, у кожній точці яких дотична збігається з лінією, уздовж якої напрямлений вектор магнітної індукції. Лінії магнітної індукції завжди замкнені — магнітне поле є вихровим.

## Контрольні запитання



- Опишіть досліди Г. Ерстеда і А. Ампера.
- Дайте означення магнітного поля. Які властивості має магнітне поле?
- Охарактеризуйте магнітну індукцію за планом характеристики фізичної величини.
- Як визначити напрямок вектора магнітної індукції?
- Що називають лініями магнітної індукції?
- Зіставте магнітні поля соленоїда і штабового магніту: що в них спільне?
- Яке магнітне поле називають однорідним?

## Вправа № 10



- На рис. 1 зображені лінії магнітного поля, створеного двома соленоїдами. 1) Який напрямок має вектор магнітної індукції у точці  $B$ ? у точці  $C$ ? 2) У якій точці —  $A$ ,  $B$  чи  $C$  — магнітна індукція поля є найбільшою? 3) Чи існують у цьому магнітному полі ділянки, на яких поле є однорідним? 4) Визначте полюси джерел струму, до яких підключено соленоїди.
- Як установиться магнітна стрілка після замкнення кола (рис. 2)?
- Укажіть напрямок вектора магнітної індукції в кожній із точок (рис. 3).

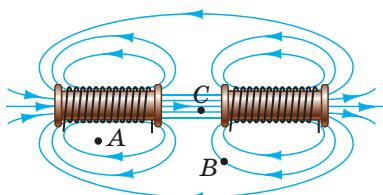


Рис. 1

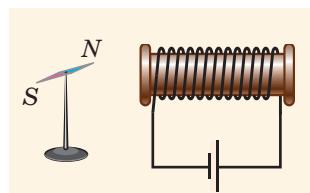


Рис. 2

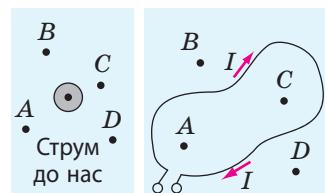


Рис. 3

- За поданими в таблиці даними складіть задачі та розв'яжіть їх.

Довжина провідника	Сила струму в провіднику	Модуль магнітної індукції	Максимальна сила Ампера
2 см		2,1 мТл	0,3 мН
5 м	20 А	50 мкТл	
10 см	15 А		45 мН

5. Чи мають лінії магнітної індукції початок? кінець? Чи можуть вони перетинатися? торкатись одна одної? мати розрив? Відповідь обґрунтуйте.
6. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь, як учені пояснюють причини існування магнітного поля Землі (рис. 4).

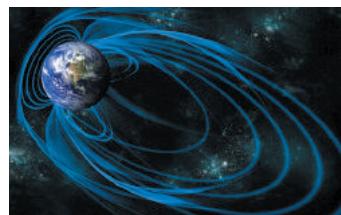


Рис. 4

## § 11. СИЛА АМПЕРА



Якщо рамку зі струмом розташувати між полюсами магнітів, рамка повернеться і встановиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля, створеного магнітами. А як змусити рамку обертатися? Як створити електричний двигун, який, до речі, був винайдений на півторіччя раніше, ніж двигун внутрішнього згоряння? Чому магнітне поле чинить на рамку зі струмом орієнтуальну дію? Згадуємо і дізнаємося нове.

### 1 Сила Ампера

Восени 1820 р. А. Ампер, досліджуючи дію магнітного поля на провідники різних форм і розмірів, отримав формулу для визначення сили, що діє на окрему невелику ділянку провідника (на елемент струму). Зараз цю силу називають **силою Ампера**.

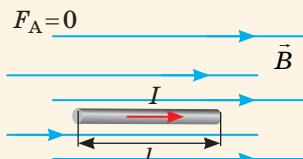
**Сила Ампера** — це сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом.

Якщо провідник прямолінійний, а магнітне поле, в якому він перебуває, однорідне, то модуль сили Ампера визначають за формулою:

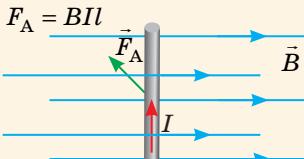
$$F_A = BIl \sin \alpha ,$$

де  $B$  — магнітна індукція поля, в якому перебуває провідник;  $I$  — сила струму в провіднику;  $l$  — довжина активної частини провідника;  $\alpha$  — кут між вектором магнітної індукції і напрямком струму (рис. 11.1).

• Провідник розташований паралельно лініям магнітної індукції — **магнітне поле на провідник не діє**:



• Провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції — **сила Ампера є максимальною**:



• У загальному випадку силу Ампера визначають за формулою:

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

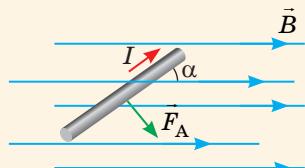
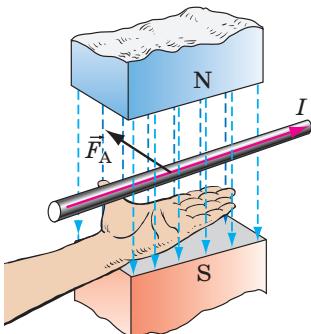


Рис. 11.1. Залежність значення сили Ампера від орієнтації провідника в магнітному полі



**Рис. 11.2.** Визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки

*Напрямок сили Ампера визначають за правилом лівої руки (рис. 11.2):*

Якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямок струму в провіднику, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок сили Ампера.

*Зверніть увагу:* якщо провідник не прямий і (або) магнітне поле неоднорідне, то можна визначити сили Ампера, які діють на невеликі ділянки провідника, а потім геометричним додаванням обчислити силу Ампера, що діє на провідник у цілому.

## 2

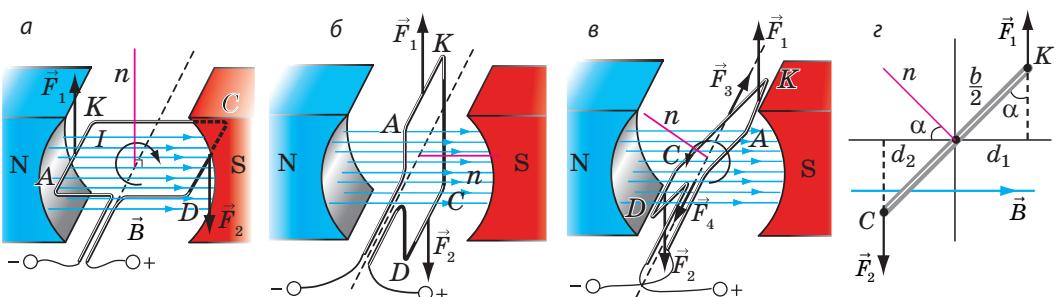
### Момент сил Ампера, які діють на рамку зі струмом

Візьмемо легку прямокутну рамку зі сторонами  $a$  і  $b$ , яка складається з одного витка дроту, помістимо її в однорідне магнітне поле так, щоб вона могла легко обертатися навколо горизонтальної осі, і пропустимо в рамці струм (рис. 11.3, а). Погойдавшись, рамка установиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції (рис. 11.3, б). Знайдемо момент сил Ампера, що діють на рамку в деякий момент часу (рис. 11.3, в). Для цього визначимо напрямок, модуль і плече кожної із сил, що діють на сторони рамки. Бачимо:

1) сили Ампера  $\vec{F}_3$  і  $\vec{F}_4$  не повертають, а лише розтягають рамку — моменти цих сил дорівнюють нулю.

2) сили Ампера  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  повертають рамку проти ходу годинникової стрілки — створюють *обертельний момент*  $M$ :  $M = M_1 + M_2 = F_1 d_1 + F_2 d_2$ . Тут  $F_1 = F_2 = B I a$ , де  $I$  — сила струму,  $a$  — довжина сторони  $AK$  (і  $CD$ );  $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \sin \alpha$ , де  $b$  — довжина сторони  $KC$ ,  $\alpha$  — кут між вектором  $\vec{B}$  магнітної індукції і нормаллю  $n$  до рамки (рис. 11.3, в).

Отже:  $M = B I a \frac{b}{2} \sin \alpha + B I a \frac{b}{2} \sin \alpha = B I S \sin \alpha$ , де  $S = ab$  — площа рамки.



**Рис. 11.3.** Дослідження дії магнітного поля на рамку зі струмом: а — сили Ампера  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  повертають рамку  $AKCD$  за ходом годинникової стрілки; б — у положенні рівноваги сили Ампера не повертають рамку, а розтягають; в — сили Ампера повертають рамку проти ходу годинникової стрілки

**Момент сил Ампера**, які діють на плоский замкнений контур, розташований в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку модуля магнітної індукції поля, сили струму в контурі, площині контуру і синуса кута  $\alpha$  між вектором магнітної індукції та нормаллю до площини контуру:

$$M = BIS \sin \alpha$$

**Зверніть увагу:**

1) якщо рамка розташована паралельно лініям магнітної індукції ( $\alpha=90^\circ$ ), то обертельний момент найбільший ( $\sin \alpha=1$ ):  $M_{\max} = BIS$  (див. рис. 11.3, а); якщо рамка розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції ( $\alpha=0$ ), то обертельний момент дорівнює нулю ( $\sin \alpha=0$ ), — це положення стійкої рівноваги рамки (див. рис. 11.3, б).

2) якщо рамка містить  $N$  витків дроту, обертельний момент розраховують за формулою:

$$M = NBIS \sin \alpha$$

### 3

### Де застосовують силу Ампера

Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в **електричних двигунах** — пристроях, в яких електрична енергія перетворюється на механічну.

Повернемося до рис. 11.3. Бачимо, що сили Ампера спочатку повертують рамку в одному напрямку (рис. 11.3, а), а після проходження положення рівноваги — в протилежному (рис. 11.3, в). Тому рамка дуже швидко зупиняється в положенні рівноваги. Щоб рамка не зупинялась і оберталась в одному напрямку, застосовують **колектор** — пристрій, який автоматично змінює напрямок струму в рамці (рис. 11.4). Півкільця колектора обертаються разом із рамкою, а щітки залишаються нерухомими, тому після проходження положення рівноваги до щіток притискаються вже інші півкільця. Напрямок струму в рамці змінюється на протилежний, а напрямок обертання рамки не змінюється.

Зрозуміло, що обертельний момент, який створюють сили Ампера в рамці, зображеній на рис. 11.4, є дуже малим, тому потужність такого «двигуна» незначна.

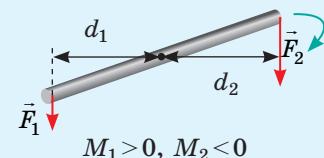
### Нагадуємо

- **Момент сили**  $M$  — це фізична величина, яка характеризує обертельний ефект сили і дорівнює добутку сили  $F$  на плече  $d$  сили:

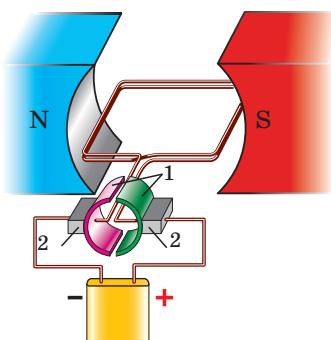
$$M = F \cdot d; [M] = \text{Н}\cdot\text{м}.$$

- **Плече сили**  $d$  — це відстань від осі обертання до лінії дії сили.

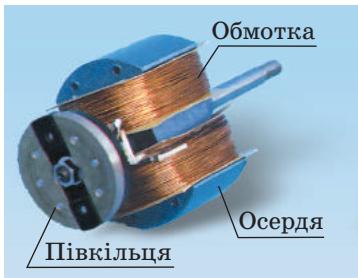
- Момент сили вважають *додатним*, якщо сила повертає (або намагається повернути) тіло проти ходу годинникової стрілки, і *від'ємним*, якщо сила повертає тіло за ходом годинникової стрілки.



$$M_1 > 0, M_2 < 0$$



**Рис. 11.4.** Колектор являє собою два провідних півкільця (1), до кожного з яких притиснута металева щітка (2); щітки з'єднані з полюсами джерела струму



**Рис. 11.5.** Ротор двигуна (від латин. *rotate* — обертатися), який містить одну обмотку

Для збільшення обертального моменту ( $M = NBIS \sin \alpha$ ) у реальних електродвигунах:

1) **обмотку** обертової частини двигуна — **ротора** (від латин. *rotate* — обертатися) — виготовляють із великої кількості витків дроту, які вкладають у спеціальні пази на бічній поверхні **осердя** — циліндра, виготовленого з листів магнітном'якої сталі (рис. 11.5);

2) використовують кілька обмоток, які намотують на одне осердя; колектор такого двигуна має низку мідних дугоподібних контактних пластин, закріплених на ізольованому барабані, і кожна обмотка з'єднана з однією парою пластин;

3) замість постійного магніту використовують електромагніт, який становить одне ціле з корпусом електродвигуна та слугує **статором** (від латин. *stator* — той, що стоїть нерухомо). Обмотка статора підключена до того самого джерела струму, що й обмотка ротора.

Як ви вважаєте, за рахунок збільшення якої фізичної величини збільшується обертальний момент у кожному випадку?

#### Електровимірювальні прилади магніто-електричної та електродинамічної систем

У цих приладах використовують залежність обертального моменту, створеного силами Ампера, від сили струму в рамці.

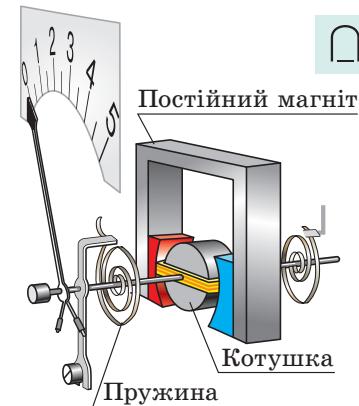
Коли прилад вмикають у коло, в рамці починає йти струм і внаслідок дії сил Ампера рамка повертається в магнітному полі магніту. Разом із рамкою повертається стрілка й одночасно закручуються спіральні пружини. Коли момент сил Ампера зрівноважується моментом сил пружності, рух стрілки припиняється, проте вона залишається відхиленою. Чим більша сила струму в рамці, тим на більший кут відхиливиться стрілка.

У приладах **електродинамічної системи** замість постійного магніту застосовують **електромагніт**.

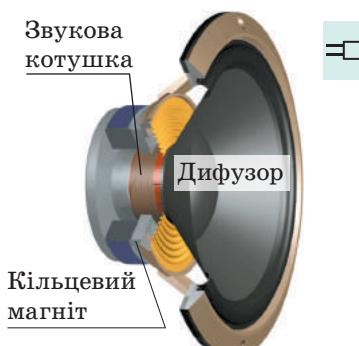
#### Електродинамічний гучномовець (динамік)

У динаміку сила Ампера, що діє на витки котушки, змушує котушку втягуватись у кільцевий магніт. Коли сила струму в котушці змінюється зі звуковою частотою, так само змінюється й сила Ампера — котушка коливається в такт зміні сили струму. Разом із котушкою коливається і прикріплений до неї дифузор, який «штовхає» повітря, створюючи звукову хвиллю, — гучномовець випромінює звук.

До речі, поширені зараз **навушники** — це саме електродинамічні випромінювачі звуку.



Вимірювальний механізм приладів магнітоелектричної системи



## 4

## Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Щоб визначити магнітну індукцію магнітного поля, створеного підковоподібним магнітом, учні за допомогою проводів підвісили між полюсами магніту алюмінієвий провідник завдовжки 8 см і масою 6 г (див. рис. 1). Коли в провіднику йшов струм силою 3 А, провідник відхилявся на кут  $45^\circ$  від вертикалі. Який результат отримали учні? Магнітне поле на ділянці, де розташований провідник, вважайте однорідним і вертикальним.

**Аналіз фізичної проблеми.** Провідник відхиляється внаслідок дії сили Ампера, напрямок якої визначимо за правилом лівої руки. Провідник горизонтальний, а магнітне поле вертикальне, тому кут  $\alpha$  між напрямком струму та вектором магнітної індукції становить  $90^\circ$ . Зважаючи на те що сили, які діють на провідник, скомпенсовані, визначимо магнітну індукцію поля.

Дано:

$$\begin{aligned} l &= 8 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ m &= 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \\ I &= 3 \text{ А} \\ \beta &= 45^\circ \\ \alpha &= 90^\circ \\ g &= 10 \text{ м/с}^2 \end{aligned}$$

$B = ?$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

На провідник діють чотири сили: сила тяжіння, дві сили натягу проводів і сила Ампера (рис. 2). Запишемо рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проекціях на осі координат:

$$\vec{F}_A + m\vec{g} + 2\vec{T} = 0;$$

$$\begin{cases} OX : F_A - 2T \sin \beta = 0, \\ OY : 2T \cos \beta - mg = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2T \sin \beta = F_A, \\ 2T \cos \beta = mg. \end{cases}$$

Поділивши перше рівняння системи на друге, маємо:  $\frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{F_A}{mg}$ , або  $\operatorname{tg} \beta = \frac{F_A}{mg}$ ,

де  $F_A = BIl \sin \alpha = BIl$ , оскільки  $\alpha = 90^\circ$ .

$$\text{Отже, } \operatorname{tg} \beta = \frac{BIl}{mg} \Rightarrow B = \frac{mg \operatorname{tg} \beta}{Il}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[B] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}; B = \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ}{3 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 0,25 \text{ (Тл)}.$$

Відповідь:  $B = 0,25 \text{ Тл}$ .

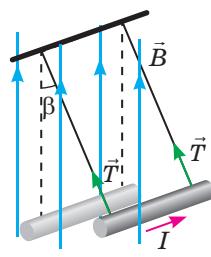


Рис. 1

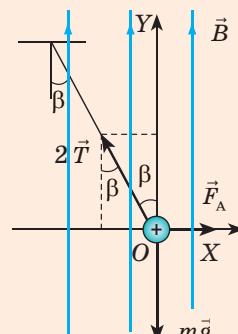


Рис. 2



## Підбиваємо підсумки

- Силу, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, називають силою Ампера. Модуль сили Ампера визначають за формулою  $F_A = BIl \sin \alpha$ , напрямок — за правилом лівої руки.
- На плоский замкнений контур зі струмом  $I$  і площею  $S$ , розташований в однорідному магнітному полі індукцією  $B$ , сили Ампера створюють обертовий момент:  $M = BIS \sin \alpha$ , де  $\alpha$  — кут між вектором магнітної індукції і нормаллю до площини контуру.
- На обертанні в магнітному полі рамки зі струмом ґрунтуються дія електричних двигунів, на повертанні — дія приладів магнітоелектричної та електродинамічної систем; на поступальному русі рамки — дія гучномовців.



### Контрольні запитання

- 1.** Дайте означення сили Ампера. За якою формулою її розраховують? Як визначають її напрямок? **2.** Виведіть формулу для визначення моменту сил Ампера, що діють на рамку зі струмом з боку магнітного поля. За якого положення рамки момент сил дорівнює нулю? є максимальним? **3.** Опишіть принцип дії електричного двигуна постійного струму. **4.** Опишіть будову та принцип дії вимірювальних пристріїв магнітоелектричної системи; електродинамічного гучномовця.



### Вправа № 11

- Сила струму в провіднику завдовжки 60 см дорівнює 1,2 А. Визначте найбільше та найменше значення сили Ампера, яка діє на провідник, за умов різних його положень в однорідному магнітному полі індукцією 15 мТл.
- На рис. 1 показано декілька ситуацій взаємодії магнітного поля і провідника зі струмом. Для кожної ситуації сформулюйте завдання та виконайте його.

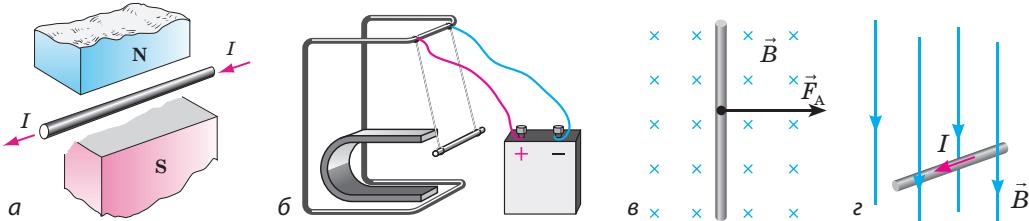


Рис. 1

- Знайдіть момент сил Ампера, що діють на рамку, розташовану в однорідному магнітному полі індукцією 0,6 Тл. Рамка містить 50 витків дроту і має площину  $20 \times 5,0$  (см). Сила струму в рамці — 2,5 А, кут між вектором магнітної індукції і площею рамки —  $60^\circ$ .
- На рис. 2 зазначені напрямок струму в рамці та напрямок, у якому повертається рамка в магнітному полі електромагніту. Визначте полюси джерела струму, до якого підключена обмотка електромагніту.
- Горизонтальний провідник масою 50 г і завдовжки 20 см тягнути із силою 0,6 Н по двох провідних стрижнях, приєднаних до джерела струму (рис. 3). Перпендикулярно до провідника діє однорідне магнітне поле індукцією 0,4 Тл. Визначте, з яким прискоренням рухається провідник, якщо сила струму в ньому дорівнює 5 А, коефіцієнт тертя — 0,2, а магнітне поле напрямлене:
  - вертикально вгору;
  - вертикально вниз;
  - горизонтально ліворуч;
  - горизонтально праворуч.

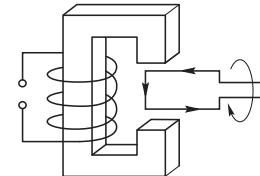


Рис. 2



Рис. 3



### Експериментальне завдання

Знайдіть у домі будь-який пристрій, що вийшов із ладу і містить електродинамічний мікрофон (трубка стаціонарного телефона, одноканальний радіоприймач (радіоточка), навушники). Знайдіть у цьому пристрої динамік, розгляньте його будову, визначте основні складники (магніт, котушки, дифузор).



## § 12. СИЛА ЛОРЕНЦА



Усі ви чули про Великий адронний колайдер, розташований на кордоні Швейцарії і Франції на глибині 100 м. Великий — тому що довжина його основного кільца становить близько 27 км; *колайдер* (англ. *collide* — зіштовхуватися) — тому що основне його завдання — розганяти адрони (а саме протони) та іони до швидкостей, які наближаються до швидкості світла, і властовувати їхні зіткнення. Як прискорити заряджені частинки, чому прискорювач має форму кільца і до чого тут магнітне поле, ви зрозумієте, ознайомившись із матеріалом цього параграфа.

### 1 Як визначити силу Лоренца

Магнітне поле діє на провідник зі струмом із певною силою — силою Ампера:  $F_A = BIl \sin \alpha$ . Оскільки електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок, виникнення сили Ампера є результатом дії магнітного поля на окремі заряджені частинки, що рухаються в провіднику.

**Силу, з якою магнітне поле діє на рухому зарядженню частинку, називають силою Лоренца.**

Ця сила названа на честь нідерландського фізика Гендріка Антона Лоренца (1853–1928), який вивів формулу для її обчислення. Для визначення модуля сили Лоренца (див. рис. 12.1) знайдемо силу Ампера, яка припадає на кожну із заряджених частинок, що створюють

$$\text{струм у провіднику: } F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl \sin \alpha}{N}.$$

Кількість  $N$  частинок дорівнює добутку їх концентрації  $n$  на об'єм  $V$  провідника:  $N = nV = nSl$ . Силу струму в провіднику можна визначити за формулою

$$I = |q|nvS \text{ (див. § 5). Отже, } F_L = \frac{B \cdot |q|nV \cdot l \cdot \sin \alpha}{nSl}. \text{ Після скорочення на } nSl \text{ отримуємо формулу для визначення модуля сили Лоренца:}$$

$$F_L = |q|Bv \sin \alpha,$$

де  $\alpha$  — кут між напрямком руху частинки та напрямком магнітної індукції магнітного поля.

Напрямок сили Лоренца визначають за **правилом лівої руки**: лінії магнітної індукції «ловимо» в долоню, чотири витягнуті пальці спрямовуємо за напрямком руху позитивно зарядженої частинки (або протилежно до руху негативно зарядженої), і тоді відігнутий на  $90^\circ$  великий палець вкаже напрямок сили Лоренца (рис. 12.2).

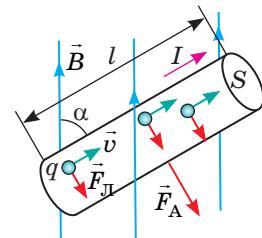


Рис. 12.1. До визначення модуля сили Лоренца:  $q$  — заряд частинки;  $v$  — швидкість руху частинки;  $\vec{F}_L$  — сила Лоренца;  $S$  — площа поперечного перерізу провідника;  $l$  — довжина провідника

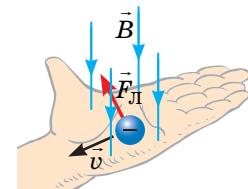
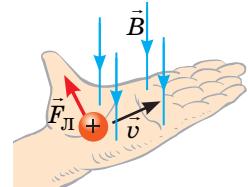


Рис. 12.2. Визначення напрямку сили Лоренца за допомогою лівої руки

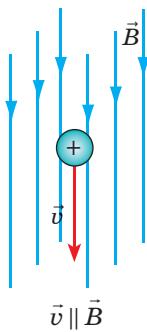
**?** Як ви вважаєте, чому чотири витягнуті пальці спрямовують за напрямком руху позитивно зарядженої частинки, але протилежно до напрямку руху негативно зарядженої частинки.

## 2 Як рухаються заряджені частинки під дією сили Лоренца

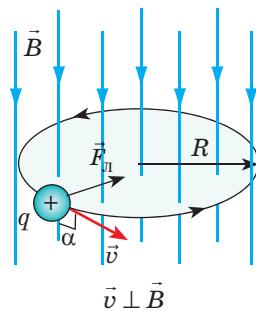
Сила Лоренца завжди перпендикулярна до швидкості руху частинки, тому вона не виконує роботу і не змінює кінетичну енергію частинки, — під дією сили Лоренца заряджена частинка рухається рівномірно. Проте траєкторія руху частинки буде різною — залежно від того, під яким кутом частинка влетіла в магнітне поле і чи є магнітне поле однорідним.

### Можливі випадки руху зарядженої частинки в однорідному магнітному полі

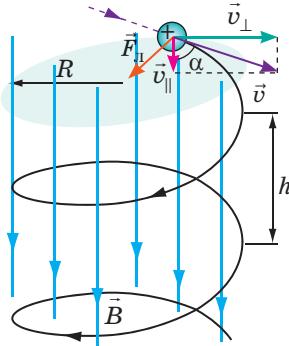
1. Частинка влітає в магнітне поле паралельно лініям магнітної індукції.



2. Частинка влітає в магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції.



3. Частинка влітає в магнітне поле під деяким кутом  $\alpha$  до ліній магнітної індукції.



У цьому випадку кут  $\alpha$  між вектором швидкості  $\vec{v}$  і вектором магнітної індукції  $\vec{B}$  дорівнює нулю (або  $180^\circ$ ).

Оскільки  $\sin \alpha = 0$ , то дорівнює нулю і сила Лоренца:

$$F_L = |q| B v \sin \alpha = 0.$$

Отже, магнітне поле не діє на частинку, тому, якщо немає інших сил, частинка рухатиметься рівномірно прямолінійно вздовж ліній магнітної індукції.

У цьому випадку  $\alpha = 90^\circ$  ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ), тому  $F_L = |q| B v$ , адже  $\sin \alpha = 1$ . Частинка рухається рівномірно по колу перпендикулярно до ліній магнітної індукції, а сила Лоренца надає частинці додаткового прискорення  $\vec{a}_{\text{дд}}$ .

За другим законом Ньютона:  $F_L = m \vec{a}_{\text{дд}}$ , тому

$$|q| B v = m \frac{v^2}{R}.$$

Звідси визначимо радіус  $R$  траєкторії руху частинки і період  $T$  її обертання:

$$R = \frac{mv}{|q|B}; T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}.$$

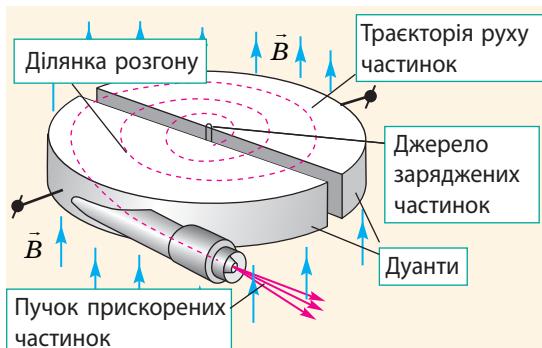
Період обертання частинки не залежить від швидкості її руху та радіуса траєкторії.

У цьому випадку швидкість  $\vec{v}$  руху частинки можна розкласти на дві складові:

перша складова  $\vec{v}_{\parallel}$  паралельна лініям магнітної індукції поля, вона забезпечує рух частинки вздовж цих ліній; друга складова  $\vec{v}_{\perp}$  перпендикулярна до ліній магнітної індукції поля, і поле змушує частинку рухатися по колу з періодом

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}.$$

Таким чином, траєкторія руху частинки — гвинтова лінія, крок  $h$  (відстань між сусіднimi витками) якої визначається складовою  $\vec{v}_{\parallel}$ :  $h = v_{\parallel} T$ , а радіус витка — складовою  $\vec{v}_{\perp}$ :  $R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$ .



**Рис. 12.3.** Будова і принцип дії циклотрона — прискорювача важких заряджених частинок (протонів, іонів)

- Частинки, які випромінює джерело, потрапляють усередину дуантів і рухаються по півколах під дією сили Лоренца.
- У проміжку між дуантами частинки розганяються електричним полем.
- Що швидше рухається частинка, то більше півколо вона описує:  $R = \frac{mv}{|q|B}$ , проте час проходження півколо  $t = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi m}{|q|B}$
- зі збільшенням швидкості не змінюється.
- Якщо періодично змінювати напругу на дуантах, то частинки, яким «пощастило» потрапити в резонанс, щоразу будуть прискорюватися.

### 3 Де застосовують силу Лоренца

Той факт, що період обертання зарядженої частинки в однорідному магнітному полі не залежить ані від швидкості її руху, ані від радіуса траєкторії, використовують у *циклотронах* (рис. 12.3). По суті циклотрон являє собою вакуумну камеру, розміщену між полюсами сильного електромагніту. У камері розташовано два порожнисті металеві півциліндри (дуанти). На дуанти подається змінна напруга, яка періодично прискорює частинки. Період зміни напруги дорівнює періоду обертання частинки в магнітному полі.

?

Ознайомтесь із принципом дії циклотрона (див. рис. 12.3). Поясніть, чому заряджена частинка прискорюється щоразу, коли рухається у проміжку між дуантами.

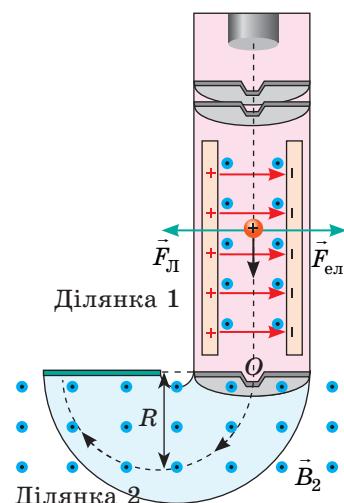
На русі зарядженої частинки в однорідному магнітному полі базується дія *мас-спектрометрів* — пристрій, за допомогою яких можна вимірюти питомий заряд частинки  $\frac{|q|}{m}$ , а потім її ідентифікувати (див. нижче приклад розв'язування задачі).

### 4 Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Вузький пучок позитивно заряджених частинок потрапляє в *селектор швидкостей*, в якому створені взаємно перпендикулярні електричне і магнітне поля (див. рисунок, ділянка 1). Напруженість електричного поля — 10 кН/Кл, магнітна індукція магнітного поля — 40 мТл.

1) З якою незмінною швидкістю повинна рухатися частинка, щоб вийти із селектора через отвір  $O$ ? Для чого, на вашу думку, призначений селектор швидкостей?

2) Потрапивши в магнітне поле *мас-спектрометра* індукцією 0,1 Тл, частинка описала коло радіусом 52 мм (ділянка 2). Яка це частинка?



*Аналіз фізичної проблеми.* 1) Щоб вийти із селектора через отвір  $O$ , частинка повинна рухатися ділянкою 1 рівномірно прямолінійно. Це відбудеться у випадку, коли сили, що діють на частинку, будуть скомпенсовані.

2) У камеру мас-спектрометра частинка влітає перпендикулярно до ліній магнітної індукції і рухається лише під дією сили Лоренца, тому траекторією руху частинки є коло, а сила Лоренца надає частинці доцентрового прискорення. Скориставшись другим законом Ньютона ( $F_{\text{Л}} = ma_{\text{дц}}$ ) і формулою для визначення сили Лоренца, знайдемо питомий заряд частинки і дізнаємося, що це за частинка (див. Додаток 1).

*Дано:*

$$\begin{aligned} E &= 10 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл} \\ B_1 &= 40 \cdot 10^{-3} \text{ Тл} \\ B_2 &= 0,1 \text{ Тл} \\ R &= 52 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \alpha &= 90^\circ \end{aligned}$$

$$v - ?$$

$$\frac{q}{m} - ?$$

$$\text{Отже, } qB_2v = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{B_2R}, \text{ де } \frac{q}{m} \text{ — питомий заряд частинки.}$$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[v] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{Н}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}, v = \frac{10 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ (м/с);}$$

$$\left[ \frac{q}{m} \right] = \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{Н}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{кг}} = \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}, \frac{q}{m} = \frac{2,5 \cdot 10^5}{0,1 \cdot 52 \cdot 10^{-3}} \approx 4,8 \cdot 10^7 \text{ (Кл/кг).}$$

За таблицею Додатку 1 бачимо, що це  $\alpha$ -частинка.

*Відповідь:* 1)  $v = 250$  км/с; 2)  $\alpha$ -частинка.



### Підбиваємо підсумки

- Силу, з якою магнітне поле діє на рухому зарядженню частинку, називають силою Лоренца. Модуль цієї сили визначають за формулою  $F_{\text{Л}} = |q|Bv \sin \alpha$ , напрямок — за правилом лівої руки.
- В однорідному магнітному полі заряджена частинка рухається рівномірно: якщо початкова швидкість руху частинки напрямлена паралельно лініям магнітної індукції поля, то частинка рухається рівномірно прямолінійно; якщо перпендикулярно до цих ліній — рівномірно по колу радіусом  $R = \frac{mv}{|q|B}$ ; якщо під кутом — рухається рівномірно гвинтовою лінією.

### Контрольні запитання

- Дайте означення сили Лоренца. За якою формулою її визначають? Виведіть цю формулу.
- Як визначити напрямок сили Лоренца, яка діє на позитивно заряджenu частинку? на негативно заряджenu частинку?
- Як рухатися заряджена частинка в магнітному полі, якщо її початкова швидкість



напрямлена паралельно лініям магнітної індукції? перпендикулярно до ліній магнітної індукції? під кутом до ліній магнітної індукції? 4. Виведіть формули для визначення радіуса траекторії руху та періоду обертання зарядженої частинки в магнітному полі, якщо швидкість її руху перпендикулярна до вектора магнітної індукції поля. 5. Наведіть приклади застосування сили Лоренца.



### Вправа № 12

- У циклотронах на заряджену частинку діють і електричне поле, і магнітне поле. Яке поле «відповідає» за збільшення швидкості руху частинки? Яке поле «керує» рухом частинки по колу?
- Визначте: напрямок руху частинки (рис. 1); знак заряду частинки (рис. 2); напрямок магнітного поля, в якому рухається частинка (рис. 3).

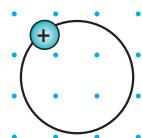


Рис. 1

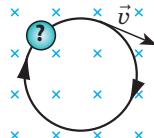


Рис. 2

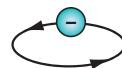


Рис. 3

- Чому дві однайменно заряджені нерухомі частинки завжди відштовхуються, а ті самі частинки, розігнані до величезних швидкостей, можуть як відштовхуватися, так і притягуватися?
- В однорідне магнітне поле індукцією  $5,6 \text{ мТл}$  протон влітає зі швидкістю  $3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$  перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля. Визначте силу, яка діє на протон, і радіус його траекторії.
- Електрон починає рух зі стану спокою, проходить прискорювальну різницю потенціалів  $125 \text{ В}$  і потрапляє в однорідне магнітне поле індукцією  $5,0 \text{ мТл}$ , де рухається по колу. Визначте радіус цього кола.
- Електрон влітає в однорідне магнітне поле під кутом  $60^\circ$  до ліній магнітної індукції і рухається гвинтовою лінією діаметром  $10 \text{ см}$ . Визначте швидкість руху електрона, магнітну індукцію поля та крок гвинтової лінії, якщо період обертання електрона  $60 \text{ мкс}$ .
- Початок космонавтики ознаменувався низкою відкриттів, одним із яких було відкриття радіаційних поясів Землі (рис. 4). Поясніть, чому магнітне поле Землі є «пасткою» для заряджених частинок — частинки ніби накручуються на магнітні лінії планети.

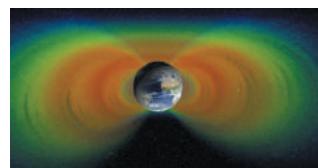


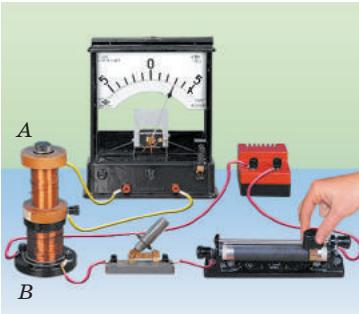
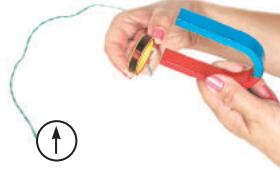
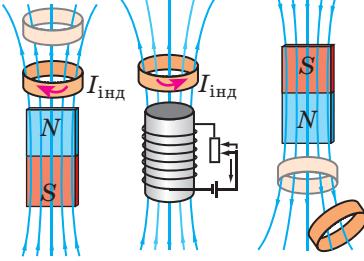
Рис. 4

### § 13. ДОСЛІДИ М. ФАРАДЕЯ. ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

У березні 1821 р. Майкл Фарадей записав у своєму щоденнику: «Перетворити магнетизм на електрику». 29 серпня 1831 р. після численних дослідів учений досяг своєї мети — він отримав електричний струм за допомогою магнітного поля. Цей струм Фарадей назвав *індукційним (наведеним) струмом*. Дізнаємось, за яких умов магнітне поле може спричинити появу електричного струму, як визначити силу та напрямок індукційного струму.

## 1 Як можна «перетворити магнетизм на електрику»

Проведемо низку дослідів, що є сучасним варіантом дослідів М. Фарадея.

Досліди Фарадея	
<p><b>Дослід 1.</b> Замкнемо котушку на гальванометр і вводитимемо в котушку постійний магніт. Під час руху магніту стрілка гальванометра відхиляється — це свідчить про наявність струму. Що швидше вводити магніт, то більша сила струму. Якщо рух магніту припинити, стрілка повернеться на нульову позначку. Виймаючи магніт із котушки, бачимо, що стрілка гальванометра відхиляється в інший бік, що свідчить про зміну напрямку струму.</p> <p>Якщо залишити магніт нерухомим, а рухати котушку, в котушці теж виникне електричний струм.</p>	
<p><b>Дослід 2.</b> Надінемо дві котушки — A і B — на спільне осердя. Котушку B (електромагніт) через реостат приєднаємо до джерела струму, котушку A замкнемо на гальванометр. Якщо розмикати чи замикати коло котушки B або за допомогою реостата змінювати в котушці B силу струму, то в котушці A виникне струм.</p> <p>Струм у котушці A виникатиме як під час збільшення, так і під час зменшення сили струму в котушці B, при цьому напрямок струму буде різним.</p>	
<p><b>Досліди 3, 4.</b> Розташуємо котушку, замкнену на гальванометр, поблизу полюса потужного магніту і швидко повернемо котушку — гальванометр за- свідчить появи електричного струму.</p> <p>Струм виникатиме і в разі зміни площи котушки (таке можливо, якщо котушка намотана на гумовий каркас).</p>	
<p>Проаналізувавши досліди 1–4, можна помітити, що індукційний струм у замкненому провідному контурі (у даному випадку — в котушці) виникає тоді, коли змінюється кількість ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену контуром.</p>	

## 2 Потік магнітної індукції

Кількість ліній магнітної індукції, що пронизують певну поверхню, характеризує фізична величина, яку називають *потік магнітної індукції* або *магнітний потік*. Розглянемо плоский замкнений контур, розташований у магнітному полі. Нормаль  $n$ , проведена до поверхні, що обмежує контур, утворює кут  $\alpha$  з вектором магнітної індукції  $\vec{B}$  (рис. 13.1, a).

**Потік магнітної індукції (магнітний потік)  $\Phi$**  — це фізична величина, яка дорівнює добуткові магнітної індукції  $B$  на площину  $S$  поверхні та на косинус кута  $\alpha$  між вектором магнітної індукції і нормаллю до поверхні:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

*Одиниця магнітного потоку в СІ — вебер (названа на честь німецького фізика В. Вебера (рис. 13.2)):*

$$[\Phi] = 1 \text{ Вб (Wb).}$$

**1 вебер** — це максимальний магнітний потік, який створюється магнітним полем індукцією 1 тесла через поверхню площею 1 метр квадратний:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

*Зверніть увагу!*

- Магнітний потік буде максимальним, якщо поверхня перпендикулярна до ліній магнітної індукції (рис. 13.1, а), і дорівнюватиме нулю, якщо поверхня паралельна цим лініям (рис. 13.1, в).

- Якщо магнітне поле неоднорідне і (або) поверхня не є плоскою, можна знайти магнітні потоки через невеликі ділянки  $\Delta S$  поверхні та їх алгебраїчним додаванням визначити загальний магнітний потік (рис. 13.1, г).

### 3

### Закон електромагнітної індукції

Зважаючи на означення магнітного потоку, виділимо в дослідах Фарадея деякі загальні закономірності.

1. Електричний струм у замкненому провідному контурі індукується тільки тоді, коли змінюється магнітний потік через поверхню, обмежену контуром.

2. Чим швидше змінюється магнітний потік, тим більшою є сила індукційного струму в контурі.

3. Напрямок індукційного струму в контурі залежить від того, збільшується чи зменшується магнітний потік через поверхню, обмежену контуром.

Однак чому в контурі взагалі є електричний струм, адже контур не приєднаний до джерела живлення? Поява струму може означати тільки одне: під час зміни магнітного потоку виникають сторонні (не кулонівські) сили, які й «працюють» у контурі, переміщуючи в ньому електричні заряди.

Роботу сторонніх сил  $A_{\text{ст}}$  із переміщення одиничного позитивного заряду називають **електрорушійною силою індукції (ЕРС індукції)**  $\mathcal{E}_i$ :

$$\mathcal{E}_i = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$

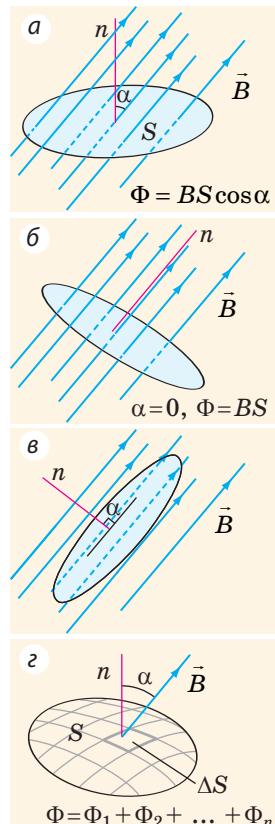


Рис. 13.1. До визначення магнітного потоку



Рис. 13.2. Вільгельм Едуард Вебер (1804–1891) — видатний німецький фізик. Розробив теорію електродинамічних явищ, створив велику кількість надточних електромагнітних приладів

**Зверніть увагу!**

- Якщо магнітний потік змінюється нерівномірно, слід розглядати його зміну за дуже малий інтервал часу  $\Delta t \rightarrow 0$ ; у такому випадку закон електромагнітної індукції набуває вигляду:

$$\mathcal{E}_i = -\Phi'(t)$$

- Якщо контур містить  $N$  витків проводу, то ЕРС індукції дорівнює:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N\Phi'(t)$$

- $\Phi = BS \cos \alpha$ , тому:
- якщо змінюється магнітне поле, в якому перебуває контур, маємо:

$$\mathcal{E}_i = \frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha = B' S \cos \alpha ;$$

- якщо змінюється площа, обмежена контуром, маємо:

$$\mathcal{E}_i = B \frac{\Delta S}{\Delta t} \cos \alpha = BS' \cos \alpha ;$$

- якщо контур повертався в магнітному полі, маємо:

$$\mathcal{E}_i = BS \frac{\Delta \cos \alpha}{\Delta t} = BS \cos' \alpha$$

Силу індукційного струму  $I_i$  в контурі опором  $R$  визначають за законом Ома:  $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$ .

Закон, що встановлює залежність ЕРС індукції від швидкості зміни магнітного потоку, експериментально вивів М. Фарадей.

**Закон електромагнітної індукції:**

Електрорушійна сила індукції дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену контуром:

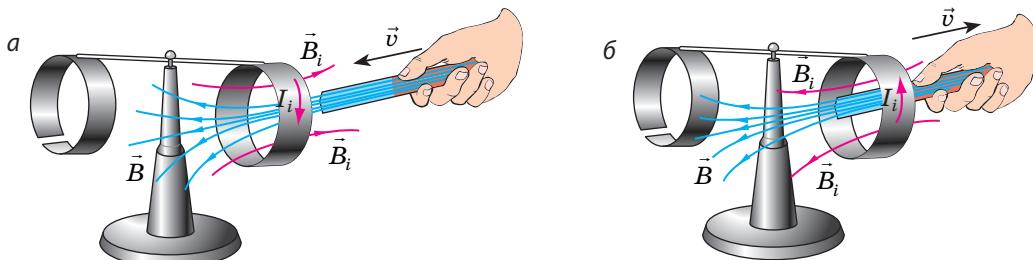
$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Знак «мінус» відображає *правило Ленца*.

**Правило Ленца**

Правило для визначення напрямку індукційного струму сформулював російський учений Генріх Ленц (1804–1865). Це правило носить його ім’я — **правило Ленца**: *індукційний струм, який виникає в замкненому провідному контурі, має такий напрямок, що створений цим струмом магнітний потік перешкоджає зміні магнітного потоку, який спричинив появу індукційного струму*.

Для демонстрації правила Ленца зручно скористатися пристроям конструкції самого Ленца. Пристрій являє собою два алюмінієвих кільця (суцільне та розрізане), закріплених на коромислі, яке може легко обертатися навколо вертикальної осі (рис. 13.3).



**Рис. 13.3.** «Кільця Ленца». Якщо магніт наближати до суцільного кільця, то в кільці виникне індукційний струм  $I_i$ . Цей струм створить біля кільця магнітне поле  $\vec{B}_i$ , напрямлене проти зовнішнього поля  $\vec{B}$ , тому кільце відштовхнеться від магніту (а). Якщо магніт віддаляти від суцільного кільця, то кільце притягуватиметься до магніту (б). Рухаючи магніт відносно розрізаного кільця, жодних ефектів не спостерігатимемо

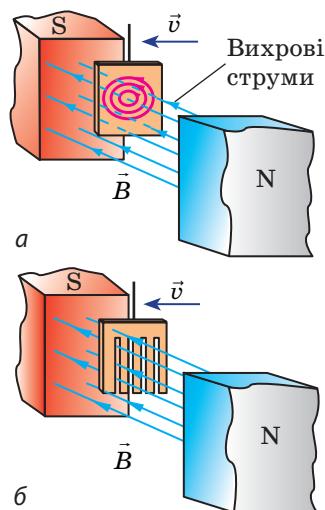
Правило Ленца має глибокий фізичний зміст — воно відображає закон збереження енергії. Справді, на створення індукційного струму потрібна енергія, тому має бути виконана робота. Під час наближення магніту до контуру або під час його віддалення завжди виникає сила, що перешкоджає рухові. Щоб подолати цю протидію, й виконується робота.

### 5 Які причини виникнення ЕРС індукції

Звідки беруться сторонні сили, що діють на заряди в провіднику?

Причини виникнення ЕРС індукції	
Провідник рухається в магнітному полі	Магнітне поле, в якому перебуває нерухомий провідник, змінюється
<p>У цьому випадку на вільні електрони, що рухаються разом із провідником, діє сила Лоренца: <math>F_L =  q Bv \sin \alpha</math>. Під дією цієї сили електрони відповідно до правила лівої руки зміщуються вздовж провідника. У результаті <b>проводник поляризується</b>: один його кінець набуває <b>негативного заряду</b> (туди «прийшли» електрони), а другий кінець — <b>позитивного</b>.</p> <p>Якщо провідник замкнути, то в колі виникне індукційний струм. Джерелом струму в колі буде <b>рухомий провідник, а сторонньою силою, що виконує роботу всередині джерела, — сила Лоренца</b>: <math>A_{\text{ст}} = F_L \cdot l =  q Bv \sin \alpha \cdot l</math>.</p> <p>Оскільки <math>\mathcal{E}_i = \frac{A_{\text{ст}}}{ q }</math>, маємо формулу для розрахунку ЕРС індукції в рухомому провіднику:</p> $\mathcal{E}_i = Bvls \sin \alpha$ <p>Отже, у випадку з рухомим провідником <b>сторонні сили мають магнітну природу</b>.</p>	<p>У цьому випадку <b>сторонні сили мають електричну природу</b>, адже змінне магнітне поле завжди супроводжується появою вихрового електричного поля. Саме вихрове електричне поле діє на вільні заряджені частинки в провіднику та надає їм напрямленого руху, створюючи індукційний струм.</p> <p>На відміну від електростатичного поля (поля, створеного нерухомими електричними зарядами) вихрове електричне поле <b>має такі властивості</b>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Лінії напруженості вихрового електричного поля є замкненими. Напрямок цих ліній можна визначити за допомогою <b>правої руки</b>: якщо магнітна індукція магнітного поля, яке є причиною створення вихрового поля, збільшується, то великий палець спрямовуємо протилежно до напрямку <math>\vec{B}</math>; якщо магнітна індукція магнітного поля зменшується, то великий палець спрямовуємо за напрямком <math>\vec{B}</math>.</li> <li>Робота вихрового електричного поля на замкненій траєкторії зазвичай не дорівнює нулю.</li> </ul>

Явище виникнення вихрового електричного поля або електричної поляризації провідника під час зміни магнітного поля або під час руху провідника в магнітному полі називають **явищем електромагнітної індукції**.



**Рис. 13.4.** У магнітному полі коливальний рух суцільної мідної пластини швидко припиняється (а); рух мідного гребінця майже не сповільнюється (б)



**Рис. 13.5.** Індукційне плавлення металу

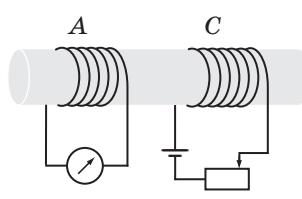


Рис. 1

## 6 Де застосовують струми Фуко

Якщо суцільній мідній пластині, підвішенній між полюсами магніту, надати коливального руху, то цей рух швидко припиниться (рис. 13.4, а). Це відбувається через збудження в пластині *вихрових струмів*, які (за правилом Ленца) створюють магнітне поле, що перешкоджає рухові пластини. Зрозуміло: чим більший електричний опір тіла, яке коливається, тим меншою є сила цих струмів (рис. 13.4, б).

Вихрові струми ретельно дослідив французький фізик Леон Фуко (1819–1868), тому їх називають *струмами Фуко*.

**Струми Фуко** — вихрові індукційні струми, які виникають у провіднику під час зміни магнітного потоку через поверхню провідника.

Сповоільнення коливань унаслідок виникнення струмів Фуко застосовують для *демпфування* — примусового гасіння коливань рухливих частин гальванометрів, сейсмографів тощо.

Будь-який струм чинить *теплову дію*. Теплову дію чинять і струми Фуко: якщо масивний суцільний зразок металу помістити в змінне магнітне поле, зразок нагріється. Теплову дію струмів Фуко використовують в індукційних печах для нагрівання і плавлення металів (рис. 13.5). Метал поміщують усередину котушки, по якій пропускають змінний струм високої частоти (500–800 Гц). Змінний струм спричиняє виникнення змінного магнітного поля, яке, у свою чергу, спричиняє появу в металі струмів Фуко і нагрівання металу.

Струми Фуко в осердях трансформаторів, електричних генераторів і двигунів викликають нагрівання та призводять до суттєвих втрат енергії. Щоб послабити вихрові струми, опір таких деталей збільшують: їх виготовляють із листів сталі, розділених тонкими шарами діелектрика, або із феритів (*ферити* — це матеріали, які значно посилюють магнітне поле, проте мають низьку електропровідність).

## 7 Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Котушки А і С наділи на спільне осердя (рис. 1). Визначте напрямок індукційного струму в котушці А під час переміщення повзунка реостата ліворуч.

**Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.**

1. Покажемо напрямок електричного струму  $I$  в котушці  $C$  (від позитивного полюса джерела струму до негативного) і за допомогою правої руки визначимо напрямок ліній магнітної індукції  $\vec{B}$  поля, створеного цим струмом, тобто напрямок зовнішнього для котушки  $A$  магнітного поля (рис. 2).

2. Повзунок реостата переміщують ліворуч, тому опір реостата зменшується. Згідно із законом Ома сила струму в колі котушки  $C$  збільшується, тому збільшується й магнітна індукція  $B$  магнітного поля, створеного цим струмом. Оскільки  $B \uparrow$ , то магнітний потік через котушку теж збільшується ( $\Phi \uparrow$ ) ( $R \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow B \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$ ).

3.  $\Phi \uparrow$ , тому магнітне поле, створене індукційним струмом у котушці  $A$ , направлене протилежно зовнішньому магнітному полю:  $\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$ .

4. За допомогою правої руки визначимо напрямок індукційного струму  $I_i$  у котушці  $A$ .

*Відповідь:* індукційний струм у котушці  $A$  направлений таким чином, що він іде по передній стінці котушки вгору.

**Задача 2.** За допомогою гнучких проводів прямий провідник завдовжки 60 см приєднаний до джерела постійного струму, що має ЕРС 12 В і внутрішній опір 0,5 Ом (рис. 3). Провідник рухається зі швидкістю 12,5 м/с в однорідному магнітному полі індукцією 1,6 Тл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначте ЕРС індукції і силу струму в провіднику, якщо опір зовнішнього кола — 2,5 Ом.

**Дано:**

$l=0,6$  м

$\mathcal{E}_{\text{дж}}=12$  В

$r=0,5$  Ом

$v=12,5$  м/с

$T=1,6$  Тл

$\alpha=90^\circ$

$R=2,5$  Ом

$\mathcal{E}_i = ?$

$I = ?$

**Розв'язання.** Провідник рухається в магнітному полі, тому на заряди в провіднику

діє сила Лоренца  $\vec{F}_L$ , напрямок якої визначимо за правилом лівої руки.

На заряди в провіднику також діє сила  $\vec{F}_{\text{ел}}$  з боку електричного поля джерела струму. Обидві сили «штовхають» заряди в одному напрямку (див. рис. 3), тому повна ЕРС кола  $\mathcal{E}=\mathcal{E}_i+\mathcal{E}_{\text{дж}}$ .

У рухомому провіднику  $\mathcal{E}_i=Bvl\sin\alpha$ .

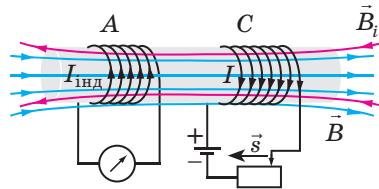


Рис. 2

**Алгоритм визначення напрямку індукційного струму**

1. Визначаємо напрямок ліній магнітної індукції  $\vec{B}$  зовнішнього магнітного поля.

2. З'ясовуємо, збільшується чи зменшується магнітний потік через поверхню, обмежену контуром.

3. Визначаємо напрямок ліній магнітної індукції  $\vec{B}_i$  магнітного поля індукційного струму:  
 $\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$ , якщо магнітний потік збільшується;  
 $\vec{B}_i \uparrow \uparrow \vec{B}$ , якщо магнітний потік зменшується.

4. Скориставшись правилом правої руки, визначаємо напрямок індукційного струму  $I_i$ .

*Зверніть увагу:* в разі розв'язання обернених задач дії, зазначені в алгоритмі, залишаються тими самими, але їх послідовність змінюється.

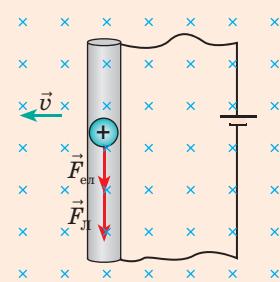


Рис. 3

За законом Ома для повного кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}_i + \mathcal{E}_{дж}}{R+r}$ .

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[\mathcal{E}_i] = \text{Tл} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}, \quad \mathcal{E}_i = 1,6 \cdot 12,5 \cdot 0,6 = 12 \text{ (В)}.$$

$$[I] = \frac{\text{В} + \text{В}}{\text{Ом} + \text{Ом}} = \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{А}, \quad I = \frac{12 + 12}{2,5 + 0,5} = 8 \text{ (А)}.$$

*Відповідь:*  $\mathcal{E}_i = 12 \text{ В}; I = 8 \text{ А}$ .



Якою буде сила струму, якщо провідник рухатиметься в протилежному напрямку?



### Підбиваємо підсумки

• Фізичну величину, яка дорівнює добуткові магнітної індукції  $B$  на площині поверхні й на косинус кута  $\alpha$  між вектором магнітної індукції і нормальню до поверхні, називають потоком магнітної індукції  $\Phi$ :  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Одиниця магнітного потоку в СІ — вебер:  $[\Phi] = 1 \text{ Вб}$ .

• Явище виникнення вихрового електричного поля або електричної поляризації провідника під час зміни магнітного поля або під час руху провідника в магнітному полі називають явищем електромагнітної індукції.

• Закон електромагнітної індукції: ЕРС індукції дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром:  $\mathcal{E} = -\Delta \Phi / \Delta t$ . Якщо провідник рухається в магнітному полі, то ЕРС індукції можна обчислити за формулою:  $\mathcal{E} = Bv \sin \alpha$ .

• Струм, який виникає внаслідок явища електромагнітної індукції, називають індукційним (наведеним) струмом. Індукційний струм має такий напрямок, що створений цим струмом магнітний потік перешкоджає зміні магнітного потоку, який спричинив появу індукційного струму.

### Контрольні запитання



1. Опишіть досліди Фарадея. Коли виникає індукційний струм? 2. Дайте означення магнітного потоку. Якою є його одиниця в СІ? 3. Сформулюйте закон електромагнітної індукції. Якого вигляду набуде цей закон, якщо контур містить  $N$  витків проводу? 4. Що визначають за правилом Ленца? 5. Чому правило Ленца є наслідком закону збереження енергії? 6. Дайте означення електромагнітної індукції. 7. Якою є природа ЕРС індукції в таких випадках: провідник рухається в магнітному полі; нерухомий провідник перебуває у змінному магнітному полі? 8. Назвіть основні властивості вихрового електричного поля. 9. Де, коли і чому виникають струми Фуко?

### Вправа № 13



1. Провідник завдовжки 20 см рухається зі швидкістю 2 м/с в однорідному магнітному полі індукцією 25 мТл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Знайдіть ЕРС індукції в провіднику.
2. Провідний контур обмежує поверхню площею 0,1 м<sup>2</sup>, має опір 0,24 Ом і розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції магнітного поля. Магнітна індукція поля рівномірно змінилася від 2 до 4 мТл за 0,1 с. Визначте: а) зміну магнітного потоку за цей час; б) ЕРС індукції в контурі; в) силу індукційного струму в контурі.

3. Чому від удару блискавки іноді перегоряють за- побіжники навіть вимкненого з розетки елек- тричного приладу?
4. Для кожного випадку (рис. 1) визначте напрямок індукційного струму в замкненому провідному кільці.
5. Контури *A* і *B* надіто на спільне осердя (рис. 2). Визначте напрямок індукційного струму в контурі *A*, розміщеному в магнітному полі контуру *B*, у разі: а) замкнення ключа; б) розімкнення ключа; в) переміщення повзунка реостата праворуч.
6. У вертикальну мідну трубу по черзі опустили алюмінієвий брусков і смуговий постійний магніт. Який предмет падатиме довше? Чому?
7. Замкненому мідному проводу, який має довжину 2 м і площину поперечного перерізу  $17 \text{ mm}^2$ , надали форму квадрата і помістили в однорідне магнітне поле індукцією 50 мТл перпендикулярно до ліній індукції поля. Людина, взявши за два протилежні кути квадрата, різко (за 0,2 с) випрямила провід, не розірвавши його. Визначте середню силу струму, яка при цьому виникла в проводі.

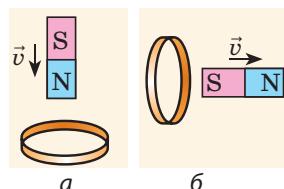


Рис. 1

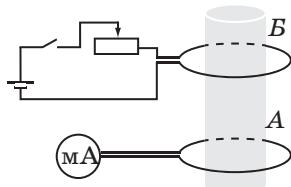


Рис. 2



### **Експериментальне завдання**

Знайдіть в Інтернеті відео, яке ілюструє, що відбувається, якщо в мідну трубу кинути магніт. Обґрунтуйте результат експерименту. Якщо є можливість, проведіть подібний експеримент.

## **§ 14. САМОІНДУКЦІЯ. ІНДУКТИВНІСТЬ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ**

Вихрове електричне поле виникає в провіднику в разі зміни магнітного поля, в якому розташований провідник. Таке поле може бути створене й змінним струмом самого провідника, причому провідник не може «відрізнати» «своє» поле від «чужого». З'ясуємо, які виникають ефекти, якщо провідник перебуває у «своєму» змінному магнітному полі.

### **1 У чому полягає явище самоіндукції**

Складемо електричне коло (рис. 14.1).

Після замкнення кола лампа 1 спалахне практично відразу, а лампа 2 — з помітним запізненням. Якщо коло розімкнути, то обидві лампи згаснуть одночасно, однак у момент розімкнення їхня яскравість на мить збільшиться. Чому так відбувається?

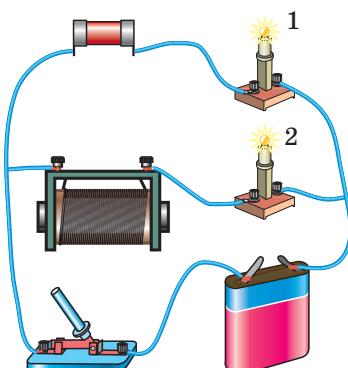
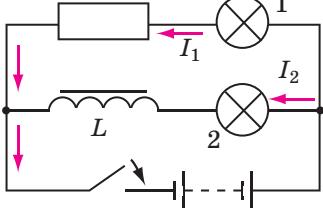
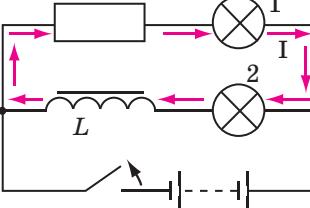
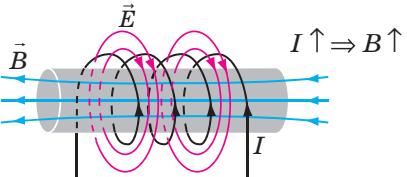
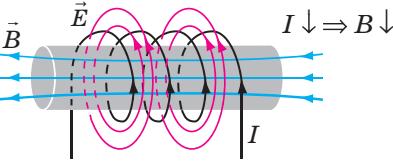


Рис. 14.1. Спостереження явища самоіндукції

Коло замикають	Коло розмикають
Відразу після замкнення кола сила струму $I$ в колі збільшується.	Відразу після розімкнення кола сила струму $I$ в колі зменшується.
	
Усередині катушки виникає змінне магнітне поле, магнітна індукція $\vec{B}$ якого теж збільшується. Змінне магнітне поле створює <i>вихрове електричне поле</i> $\vec{E}$ , яке в цьому випадку буде <i>протидіяти струму</i> в катушці (правило Ленца).  	Магнітна індукція $\vec{B}$ поля, створеного струмом, теж зменшується. Змінне магнітне поле створює <i>вихрове електричне поле</i> $\vec{E}$ , яке в цьому випадку <i>підтримуватиме струм</i> у катушці (правило Ленца).  
Саме тому сила струму в колі катушки (а отже, і в лампі 2) зростатиме не відразу, а поступово. Зрозуміло, що в провідниках, які підводять струм до лампи 1, також виникає вихрове електричне поле, але створена ним ЕРС є незначною.	Здається, що лампа 2 повинна згаснути пізніше, ніж лампа 1, але обидві гаснуть одночасно! Річ у тім, що коло, яке складається із двох ламп, катушки і резистора, залишається замкненим. <i>Котушка</i> в цьому колі слугує джерелом струму: вихрове електричне поле, що виникло в катушці, підтримує в колі струм. Струм через катушку і лампу 2 продовжує йти в тому самому напрямку, а напрямок струму в лампі 1 і резисторі змінюється на протилежний.

Явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм, називають **явищем самоіндукції**.

## 2

### ЕРС самоіндукції. Індуктивність

Електрорушійну силу індукції, що створюється в провіднику внаслідок зміни його власного магнітного поля, називають **електрорушійною силою самоіндукції**  $\mathcal{E}_{is}$ .

За законом Фарадея ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:  $\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ . Оскільки магнітний потік прямо пропорційний магнітній індукції магнітного поля струму ( $\Phi \sim B$ ), а магнітна індукція прямо пропорційна силі струму в провіднику ( $B \sim I$ ), то **магнітний потік прямо пропорційний силі струму в провіднику**:  $\Phi = LI$  ( $L$  — коефіцієнт пропорційності). Відповідно зміна магнітного потоку прямо пропорційна зміні сили струму:  $\Delta \Phi = L \Delta I$ .

Отже, закон самоіндукції:

ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ або } \mathcal{E}_{is} = -LI'(t)$$

Коефіцієнт пропорційності  $L$  називають **індуктивністю провідника**.

**Індуктивність  $L$**  — фізична величина, яка характеризує провідник і чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає в провіднику в разі зміни сили струму на 1 ампер за 1 секунду:

$$L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{|\Delta I|/\Delta t}$$

*Одиниця індуктивності в СІ — генрі:*

$[L] = 1 \text{ Гн (Н)}$ ; названа на честь американського фізика Джозефа Генрі (1797–1878), який у 1831 р. відкрив явище самоіндукції.

*Індуктивність провідника дорівнює 1 генрі, якщо в ньому виникає ЕРС самоіндукції 1 В у разі зміни сили струму на 1 А за 1 с:*

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А/с}}.$$

Велику індуктивність мають обмотки генераторів і двигунів, тому під час розімкнення кола, коли сила струму швидко змінюється, ЕРС самоіндукції може сягнути такого значення, що відбудеться пробій ізоляції.

### 3

### Як обчислити енергію магнітного поля

З'ясуємо, за рахунок якої енергії вихрове електричне поле підтримує струм у колі після відключення джерела живлення. Прості міркування приводять до висновку: *енергія була накопичена в магнітному полі провідника (котушки) раніше*. Дійсно (див. рис. 14.2):

1) джерело живлення починає працювати відразу після замикання кола, але струм у колі сягає максимального значення не миттєво. Це означає, що протягом інтервалу часу  $0 - t_1$  енергія джерела витрачається ще на щось;

2) протягом інтервалу часу  $t_1 - t_2$  біля котушки створюється досить помітне магнітне

**Зверніть увагу!**

**Індуктивність** — це характеристика провідника, тому вона не залежить ані від сили струму в провіднику, ані від ЕРС самоіндукції, що виникає в провіднику внаслідок зміни струму.

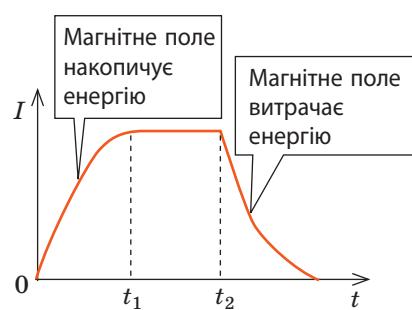
**Індуктивність залежить:**

- від магнітних властивостей середовища, в якому розташований провідник;
- розмірів і форми провідника (так, індуктивність прямого проводу набагато менша, ніж індуктивність того самого проводу, намотаного на олівець);
- наявності та форми осердя.

Наприклад, індуктивність соленоїда обчислюють за формулою:

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2 S}{l},$$

де  $\mu$  — магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлено осердя (див. § 15);  $\mu_0$  — магнітна стала;  $N$  — кількість витків у соленоїді;  $l$  і  $S$  — відповідно довжина і площа поперечного перерізу соленоїда.



**Рис. 14.2.** Графік залежності сили струму в колі котушки від часу:  
 $t = 0$  — момент замикнення кола;  
 $t = t_2$  — момент розімкнення кола

**Зверніть увагу!**

*Індуктивність подібна до маси в механіці.*

- Щоб зрушити тіло (надати йому швидкості), потрібно виконати роботу:

$$A = E_k = \frac{mv^2}{2};$$

чим більша маса тіла, тим більшу роботу треба виконати; під час гальмування тіло саме виконує роботу.

- Аналогічно для створення струму потрібно виконати роботу проти сил вихрового поля:

$$A = W_m = \frac{LI^2}{2};$$

чим більша індуктивність провідника, тим більшу роботу треба виконати; під час зменшення струму вихрове електричне поле саме виконує роботу.

поле їй окрім цього жодних змін не відбувається. Тобто енергія витрачається саме на створення магнітного поля.

Очевидно: чим більшої сили досяг струм у котушці (проводнику), тим більшою буде накопичена енергія. Енергія магнітного поля буде більшою і в разі більшої індуктивності  $L$  котушки, адже в такому випадку струм повільніше досягатиме максимального значення. Точні розрахунки із застосуванням інтегрування дають таку **формулу для визначення енергії ( $W_m$ ) магнітного поля:**

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

**Енергія магнітного поля провідника зі струмом дорівнює половині добутку індуктивності провідника на квадрат сили струму в провіднику.**

**4****Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** Надпровідну котушку індуктивністю 5,0 Гн замикають на джерело струму з ЕРС 20 В і нехтовно малим внутрішнім опором. Вважаючи, що сила струму в котушці збільшується рівномірно, визначте час, за який сила струму досягне 10 А.

**Дано:**

$$R = 0$$

$$L = 5,0 \text{ Гн}$$

$$I_0 = 0$$

$$\mathcal{E}_{\text{дж}} = 20 \text{ В}$$

$$r = 0$$

$$I = 10 \text{ А}$$

$$t = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання.**

Сила струму в котушці зростає поступово внаслідок явища самоіндукції.

Для розв'язання задачі скористаємося законом Ома для повного кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , або  $I(R+r) = \mathcal{E}$ . Тут  $\mathcal{E}$  — повна ЕРС кола, яка в цьому випадку складається з ЕРС джерела та ЕРС самоіндукції:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{дж}} + \mathcal{E}_{\text{іс}}$ , де  $\mathcal{E}_{\text{іс}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

Маємо:  $I(R+r) = \mathcal{E}_{\text{дж}} - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

$(R+r) = 0$ , тому  $\mathcal{E}_{\text{дж}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ , звідки  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}}}{L}$ , де  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  — швидкість зміни сили струму.

Струм у котушці змінюється рівномірно, тому час, за який він досягне значення 10 А, дорівнює:  $t = \frac{I}{\Delta I / \Delta t} = \frac{I}{\mathcal{E}_{\text{дж}} / L} = \frac{IL}{\mathcal{E}_{\text{дж}}}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[t] = \frac{\text{А} \cdot \text{Гн}}{\text{В}} = \frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{А} / \text{с} \cdot \text{В}} = \text{с}; \quad t = \frac{10 \cdot 5,0}{20} = 2,5 \text{ (с)}.$$

**Відповідь:**  $t = 2,5 \text{ с.}$



## Підбиваємо підсумки

- Явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм, називають явищем самоіндукції.
- Електрорушійну силу індукції, яка створюється в провіднику внаслідок зміни його власного магнітного поля, називають електрорушійною силою самоіндукції. ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:  $\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ;  $\mathcal{E}_{is} = -LI'(t)$ .
- Фізичну величину, яка характеризує провідник і чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає в провіднику в разі зміни сили струму на 1 А за 1 с, називають індуктивністю провідника:  $L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{|\Delta I|/\Delta t}$ . Одиниця індуктивності в СІ — генрі (Гн).
- Енергія магнітного поля провідника зі струмом дорівнює половині добутку індуктивності провідника на квадрат сили струму в провіднику:  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ .



## Контрольні запитання

1. Опишіть дослід, який демонструє, що після замкнення кола, яке містить катушку індуктивності, струм у колі зростає поступово. Чим зумовлене це явище?
2. Дайте означення самоіндукції.
3. Сформулюйте закон самоіндукції.
4. Дайте означення індуктивності. Назвіть її одиницю в СІ.
5. Доведіть, що магнітне поле має енергію. За якою формулою її обчислюють?
6. Проведіть аналогію між масою та індуктивністю.



## Вправа № 14

1. Ключі в колі (рис. 1) одночасно замикають. Чи одночасно спалахують лампи 1 і 2? Якщо ні, то яка лампа спалахує раніше? Чи одночасно погаснуть лампи 1 і 2 після одночасного розімкнення ключів?
2. За 0,1 с сила струму в катушці рівномірно збільшилась від 0 до 1,5 А. Якою є індуктивність катушки, якщо ЕРС самоіндукції в ній — 2 В?
3. Чому в момент розімкнення кола (див. рис. 14.1) яскравість світіння ламп на мить збільшується?
4. Чому для розімкнення кола з великою індуктивністю не користуються рубильником, а зменшують силу струму в колі поступово, використовуючи реостат?
5. Унаслідок зменшення сили струму в катушці від 10 до 4 А енергія її магнітного поля зменшилася на 16 Дж. Якою є індуктивність катушки?
6. Провідне кільце радіуса 2 см розташоване перпендикулярно до ліній магнітного поля електромагніту. Магнітна індукція поля всередині кільця 0,32 Тл. Кільце перевели в надпровідний стан. Визначте індуктивність кільця, якщо після вимкнення електромагніту в кільці виник струм силою 12 А.
7. На явищі самоіндукції заснована дія багатьох електричних пристрій. Дізнайтесь про такі пристрої. Підготуйте короткі презентації про їх застосування, об'єднавшись у групи.

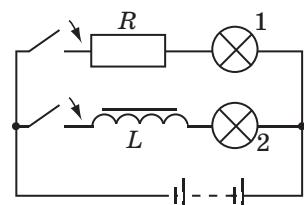
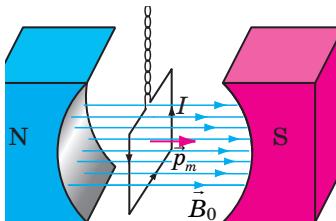


Рис. 1

## § 15. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИН. ДІА-, ПАРА- І ФЕРОМАГНЕТИКИ



**Рис. 15.1.** Орієнтація витка зі струмом у магнітному полі постійного магніту

### Нагадуємо

Фізичну величину, яка показує, у скільки разів напруженість  $\bar{E}$  електричного поля в речовині слабкіша від напруженості  $\bar{E}_0$  електричного поля у вакуумі, називають **діелектричною проникністю середовища**  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

Діелектрична проникність середовища завжди більша за одиницю. Так, вода послаблює електричне поле у 81 раз ( $\epsilon=81$ ), гас — у 2,7 разу, слюда — у 5–7 разів.

Якщо невеликий виток зі струмом помістити в магнітне поле, то виток установиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля (рис. 15.1), поводячись так само, як магнітна стрілка. Але чому створює магнітне поле постійний магніт? Засновник теорії магнетизму А. Ампер вважав, що це пояснюється замкненими електричними струмами всередині магніту. Чи так це?

### 1 Вплив середовища на магнітне поле

Якщо будь-яке тіло внести в зовнішнє електричне поле, під впливом цього поля всередині тіла відбудеться перерозподіл електричних зарядів — у тілі утвориться власне електричне поле, напрямлене протилежно зовнішньому. Саме тому *електричне поле в речовині завжди слабкіше, ніж електричне поле у вакуумі*.

Середовище чинить вплив і на магнітне поле: будь-яка речовина, поміщена в зовнішнє магнітне поле, намагнічується, створюючи *власне магнітне поле*, яке в одних речовинах напрямлене так само, як і зовнішнє магнітне поле, а в інших — протилежно зовнішньому полю. Отже, *речовини можуть як посилювати, так і послаблювати зовнішнє магнітне поле*.

Фізичну величину, яка характеризує магнітні властивості середовища і дорівнює відношенню магнітної індукції  $B$  магнітного поля в середовищі до магнітної індукції  $B_0$  магнітного поля у вакуумі, називають **відносною магнітною проникністю середовища**  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

### 2 Чому різні речовини намагнічуються по-різному

Одна з основних властивостей частинок, з яких складається атом, — наявність у них **власного магнітного поля**. Це поле характеризує фізична величина, яку називають **власним магнітним моментом** (за аналогією з магнітним моментом контуру зі струмом).

Для плоского контуру зі струмом **магнітний момент**  $\vec{p}_m$  — це векторна величина, напрямок якої визначається за допомогою правої руки (див. § 10; див. [рис. 15.1](#)), а модуль дорівнює добуткові сили струму  $I$  в контурі на площину  $S$ , обмежену контуром:

$$p_m = IS$$

На відміну від магнітного моменту контуру *власні магнітні моменти*  $\vec{p}_m$  частинок не зумовлені наявністю струму, а є характеристикою частинки (так само, як маса є електричний заряд). Найбільший магнітний момент має електрон, магнітні моменти протона і нейтрона приблизно в тисячу разів менші. Власні магнітні моменти частинок додаються й створюють *власний магнітний момент атома і молекули*. Магнітні моменти атомів і молекул, у свою чергу, створюють магнітне поле всередині речовини. Розташування та склад атомів і молекул у різних речовин є різними, тому речовини мають різні магнітні властивості. За значенням відносної магнітної проникності розрізняють *слабо- і сильномагнітні речовини*.

### 3 Слабомагнітні речовини

*Слабомагнітні речовини*, намагнічуясь, створюють *слабке власне магнітне поле*, яке відразу зникає, якщо речовину вилучити із зовнішнього магнітного поля. Відносна магнітна проникність слабомагнітних речовин незначно відрізняється від одиниці:  $\mu \approx 1$ . До слабомагнітних речовин належать *діамагнетики і парамагнетики*.

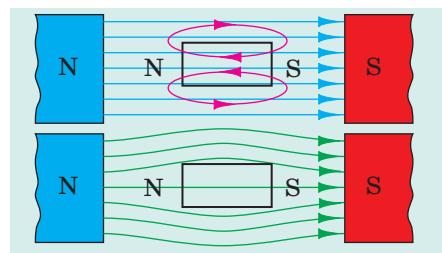
**Діамагнетики** (грец. *dia* — розбіжність) *намагнічуються, створюючи слабке магнітне поле, напрямлене протилежно до зовнішнього* (рис. 15.3).

До діамагнетиків належать інертні гази (гелій, неон тощо), багато металів (золото, мідь, ртуть, срібло), вісмут, вода, ацетон, кухонна сіль та ін.

*Атоми і молекули діамагнітних речовин не мають власних магнітних моментів.* Намагніченість діамагнетиків пояснюється наведеними (індукційними) магнітними моментами, які створюються в атомах під час потрапляння діамагнетиків у зовнішнє магнітне поле. Наведені магнітні моменти завжди напрямлені проти магнітної індукції зовнішнього магнітного поля:  $\vec{p}_m \uparrow\downarrow \vec{B}_0$ , саме тому *діамагнетики мають такі магнітні властивості*.

- Діамагнетики незначно послаблюють зовнішнє магнітне поле: магнітна індукція магнітного поля всередині діамагнетика ( $B_d$ ) трохи менша від магнітної індукції зовнішнього магнітного поля ( $B_0$ ):

$$B_d \leq B_0; \mu_d \leq 1; 0,99983 < \mu < 1$$



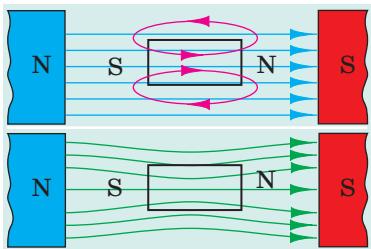
**Рис. 15.3.** Зразок із діамагнетика в зовнішньому магнітному полі: сині лінії — магнітні лінії зовнішнього магнітного поля; червоні лінії — лінії магнітного поля, створеного зразком; зелені лінії — лінії результатуючого магнітного поля

### Діамагнітна левітация

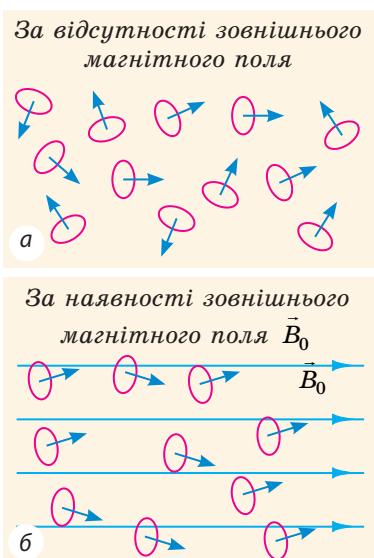
Якщо пластинку з піролітичного графіту, який є діамагнетиком, помістити над полюсами потужних неодимових магнітів, то пластинка, виштовхуючись із магнітного поля, буде левітувати в повітрі.



У 2000 р. британські фізики *Андрій Гейм* і *Майкл Беррі* отримали Шнобелівську премію з фізики, зокрема за те, що змусили левітувати в дуже потужному магнітному полі ( $B \sim 16$  Тл) жабу.



**Рис. 15.4.** Зразок із парамагнетиком у зовнішньому магнітному полі: сині лінії — магнітні лінії зовнішнього магнітного поля; червоні лінії — лінії магнітного поля, створеного зразком; зелені лінії — лінії результуючого магнітного поля



**Рис. 15.5.** Орієнтація магнітних моментів молекул парамагнітного газу:

а — за відсутності зовнішнього магнітного поля власні магнітні моменти молекул парамагнетика орієнтовані хаотично;  
б — за наявності зовнішнього магнітного поля власні магнітні моменти молекул переважно зорієнтовані в напрямку ліній магнітної індукції зовнішнього магнітного поля

- Діамагнітна речовина виштовхується з магнітного поля. Цікаво, що людина в магнітному полі поводиться як діамагнетик, бо майже на 70 % складається з води.

- Відносна магнітна проникність діамагнетиків не залежить від температури.



Чому може бути так, що складові атома мають власні магнітні моменти, а сам атом магнітного моменту не має?

**Зверніть увагу:** поява магнітного поля спричиняє виникнення наведених магнітних моментів в атомах будь-яких речовин; наведені магнітні моменти набагато менші за власні магнітні моменти атомів.

**Парамагнетики** (грец. *para* — поряд) *намагнічуються, створюючи слабке магнітне поле, направлене в той самий бік, що й зовнішнє магнітне поле* (рис. 15.4).

До парамагнетиків належать кисень, повітря, платина, алюміній, еbonіт, вольфрам, магній, літій тощо.

**Атоми** (або молекули) *парамагнітних речовин мають власні магнітні моменти, які за відсутності зовнішнього магнітного поля орієнтовані хаотично* (рис. 15.5, а). Якщо парамагнетик помістити в магнітне поле, його частинки починають орієнтуватися так, що їхні власні магнітні моменти спрямовуються в напрямку зовнішнього магнітного поля (рис. 15.5, б), аналогічно тому, як орієнтуються в електричному полі молекули полярного діелектрика. Внаслідок цієї орієнтації *парамагнетики мають такі магнітні властивості*.

- Парамагнетики незначно посилюють зовнішнє магнітне поле:

$$B_{\text{п}} \geq B_0; \mu_{\text{п}} \geq 1; 1 < \mu < 1,0003$$

- Якщо парамагнітну речовину помістити в магнітне поле, вона буде втягуватися в поле, тобто рухатися в бік збільшення магнітної індукції.

- Відносна магнітна проникність парамагнетиків зменшується зі збільшенням температури, оскільки збільшується швидкість теплового руху атомів (або молекул) і їхня орієнтація частково порушується.

## 4 Магнітні властивості феромагнетиків

**Феромагнетики** (від латин. *ferrum* — залізо) — речовини або матеріали, які, *намагнічуєчись, створюють сильне магнітне поле, напрямлене в той самий бік, що й зовнішнє магнітне поле* (рис. 15.6); феромагнетики залишаються *намагніченими й у разі відсутності зовнішнього магнітного поля*.

До феромагнетиків належить невелика група речовин: залізо, нікель, кобальт, рідкоземельні речовини та низка сплавів.

Йони феромагнітних речовин мають власні магнітні моменти. Будь-яке феромагнітне тіло складається з **доменів** — макроскопічних ділянок із лінійними розмірами 1–10 мкм, в яких власні магнітні моменти сусідніх іонів співнапрямлені, а отже, домени мають власну намагніченість. За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти окремих доменів орієнтовані хаотично, тому зразки феромагнітного матеріалу зазвичай розмагнічені (рис. 15.7, а).

Коли феромагнітний зразок поміщають у зовнішнє магнітне поле, то домени, магнітні моменти яких зорієнтовані за напрямком цього поля, збільшуються за рахунок зменшення доменів з іншою орієнтацією магнітних моментів; також відбувається частковий поворот магнітного моменту в кожному домені. Ці процеси приводять до намагнічування зразка (рис. 15.7, б). Доменна структура зумовлює такі *магнітні властивості феромагнетиків*.

- Магнітна індукція магнітного поля всередині феромагнетиків у сотні й тисячі разів більша, ніж магнітна індукція зовнішнього магнітного поля, тобто поля, яке спричинило намагнічування:  $B_\Phi \gg B_0$ ,  $\mu_\Phi \gg 1$ .

- Феромагнетики, як і парамагнетики, втягуються в магнітне поле.

- При досягненні певної температури — *температури Кюрі* (див. таблицю на с. 88) — феромагнітні властивості речовини зникають і вона стає парамагнетиком.

- Феромагнітні матеріали умовно поділяють на два типи. Матеріали, які після

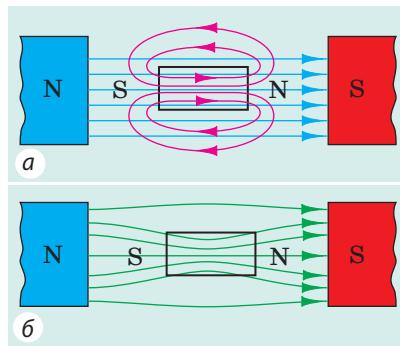


Рис. 15.6. Зразок із феромагнетика в зовнішньому магнітному полі (а). Лінії магнітної індукції результуючого поля ніби втягуються в зразок (б)

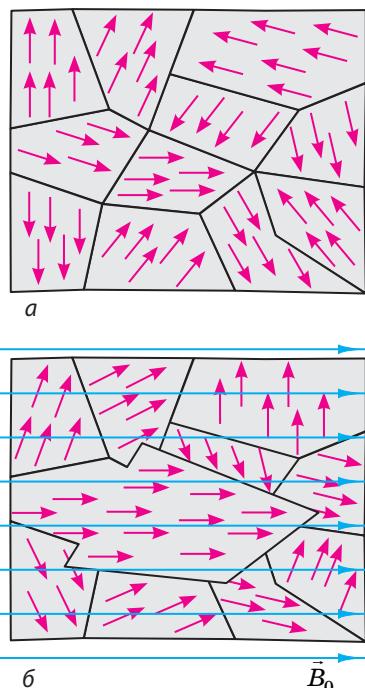


Рис. 15.7. Орієнтація доменів феромагнітного зразка у розмагніченному (а) і намагніченому (б) станах

*Температура Кюрі ( $T_C$ )  
деяких металів*

Метал	$T_C$ , К
Кобальт	1403
Залізо	1043
Нікель	631
Гадоліній	289
Тербій	223
Диспрозій	87
Гольмій	20

припинення дії зовнішнього магнітного поля залишаються намагніченими довгий час, називають *магнітноожорсткими феромагнетиками*. Їх застосовують для виготовлення постійних магнітів.

Феромагнітні матеріали, які легко намагнічуються і швидко розмагнічуються, називають *магнітном'якими феромагнетиками*. Їх застосовують для виготовлення осердь електромагнітів, двигунів, трансформаторів, електромеханічних генераторів тощо.



### Підбиваємо підсумки

- Будь-яка речовина намагнічується в магнітному полі. Фізичну величину, яка характеризує магнітні властивості середовища, називають відносною магнітною проникністю середовища:  $\mu = \frac{B}{B_0}$ .

• За значенням відносної магнітної проникності ( $\mu$ ) речовини поділяють на слабо- та сильномагнітні. У слабомагнітних речовин (діамагнетиків і парамагнетиків)  $\mu$  незначно відрізняється від одиниці.

• Атоми (молекули) діамагнетиків не мають власного магнітного моменту, але під впливом зовнішнього магнітного поля створюється наведений магнітний момент, направлений проти магнітної індукції зовнішнього магнітного поля. Магнітна проникність діамагнетиків ледь менша за одиницю:  $\mu \leq 1$ .

• Речовини є парамагнетиками, якщо їхня магнітна проникність  $\mu \geq 1$ . Атоми (молекули) парамагнітної речовини мають власний магнітний момент.

• У сильномагнітних речовин (феромагнетиків)  $\mu$  значно більша за одиницю ( $\mu \gg 1$ ). Феромагнітні речовини складаються з доменів — макроскопічних ділянок, в яких власні магнітні моменти іонів розташовані паралельно один одному.

### Контрольні запитання



1. Чому речовина змінює магнітне поле? 2. Дайте означення відносної магнітної проникності середовища. 3. Які особливості діамагнетиків? Як відбувається їх намагнічування? Якими є їхні магнітні властивості? 4. Якими є особливості парамагнетиків? Як відбувається їхні намагнічування? Якими є їхні магнітні властивості? 5. Якими є особливості феромагнетиків? Як відбувається їх намагнічування? Якими є їхні магнітні властивості? 6. Де застосовують магнітні матеріали?



### Вправа № 15

1. Установіть відповідність між речовою та значенням її відносної магнітної проникності.
 

1 Мідь	2 Нікель	3 Платина	
А 0,576	Б 0,999 994	В 1,000 265	Г 600
2. Мідний і алюмінієвий циліндри однакової маси по черзі підвішують на пружині та розташовують між полюсами сильного електромагніту. У якому випадку пружина розтягнеться сильніше?

3. Чому осердя електромагнітів виготовляють з магнітном'якої сталі?
4. Чому, на вашу думку, для характеристики магнітного поля атома використовують поняття магнітного моменту, адже жодних струмів усередині атома немає?
5. Останнім часом широко застосовують, зокрема в радіотехніці й автоматиці, *ферити* — магнітном'які неметалеві матеріали, які мають низку переваг перед металевими. Дізнайтесь, що це за матеріали і в чому їхні переваги.

### Фізика і техніка в Україні



Гіпотезу щодо існування доменів було висунуто ще в 1907 р., але довгий час її не було доведено теоретично. Повну теорію доменної структури побудували радянські вчені *Лев Давидович Ландау* (1908–1968) (на фото — праворуч) та *Ілля Михайлович Ліфшиц* (1916–1982), які деякий час разом працювали в Харківському фізико-технічному інституті. У 1935 р. вийшла їхня робота «Домenna структура феромагнетиків і феромагнітний резонанс», де вчені подали рівняння руху магнітного моменту (*рівняння Ландау — Ліфшица*), визначили форму та розміри доменів за ліза, передбачили явище феромагнітного резонансу. Тоді ж учени починають працювати над «Курсом теоретичної фізики», перший том якої («Механіка») вийшов у 1938 р. Цей фундаментальний 10-томний труд став класичним, він перевидався кілька разів різними мовами світу, за ним навчалися кілька поколінь фізиків.

## § 16. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ

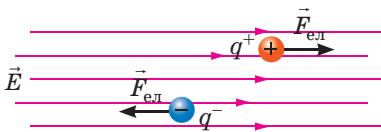
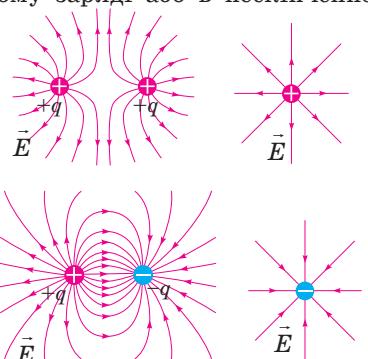
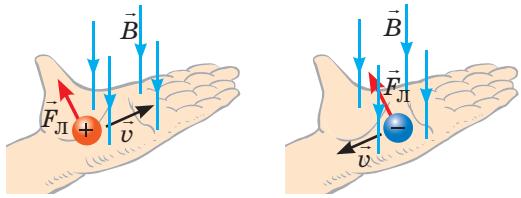
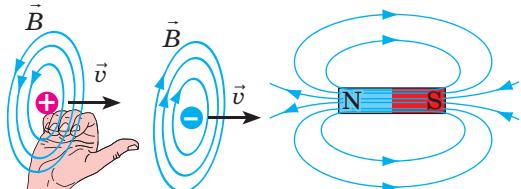
Електромагнітна взаємодія належить до чотирьох фундаментальних видів взаємодій, що існують у природі. Вона виявляється між частинками, які мають електричний заряд, і визначає структуру речовини (зв'язує електрони та ядра в атомах і атоми в молекулах), хімічні й біологічні процеси. Різні агрегатні стани речовини, сили пружності, тертя тощо так само визначаються електромагнітною взаємодією. Електромагнітна взаємодія здійснюється за допомогою електромагнітного поля.



### 1 Що таке електромагнітне поле

**Електромагнітне поле** — вид матерії, за допомогою якого відбувається взаємодія між зарядженими тілами, зарядженими частинками, намагніченими тілами.

Умовно прийнято, що електромагнітне поле має дві складові (две форми прояву): *електричну* і *магнітну*. Згадаємо основні властивості складових електромагнітного поля.

Складові електромагнітного поля	
Електричне поле	Магнітне поле
<p><b>Електричне поле</b> — складова електромагнітного поля, основною властивістю якої є дія на рухомі та нерухомі заряджені частинки.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Силова характеристика електричного поля — <i>вектор напруженості</i> <math>\vec{E}</math>.</li> <li>Сила <math>\vec{F}_{\text{ел}}</math>, з якою електричне поле діє на частинку, прямо пропорційна заряду <math>q</math> частинки і не залежить від швидкості руху частинки: <math>\vec{F}_{\text{ел}} = q\vec{E}</math>.</li> </ul> <p>Напрямок сили <math>\vec{F}_{\text{ел}}</math> збігається з напрямком вектора <math>\vec{E}</math>, якщо заряд <math>q</math> позитивний, і є протилежним напрямку вектора <math>\vec{E}</math>, якщо заряд <math>q</math> негативний:</p>  <p>• <b>Джерела електричного (електростатичного) поля:</b> заряджені частинки, заряджені тіла.</p> <p><b>Лінії напруженості електричного поля, створеного зарядами,</b> починаються на позитивному заряді або в нескінченості й закінчуються на негативному заряді або в нескінченості.</p>  <p>• <b>Джерелами електричних полів є також змінні магнітні поля.</b> Такого висновку в 1831 р. дійшов М. Фарадей. <b>Лінії напруженості електричного поля, створеного змінним магнітним полем, замкнені</b> — електричне поле, створене змінним магнітним полем, є вихровим.</p>	<p><b>Магнітне поле</b> — складова електромагнітного поля, основною властивістю якої є дія на рухомі заряджені частинки.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Силова характеристика магнітного поля — <i>вектор магнітної індукції</i> <math>\vec{B}</math>.</li> <li>Сила, з якою магнітне поле діє на частинку (сила Лоренца <math>\vec{F}_L</math>), прямо пропорційна заряду <math>q</math> і швидкості <math>v</math> руху частинки:</li> </ul> $F_L =  q Bv \sin \alpha.$ <p>Напрямок сили Лоренца визначають за <i>правилом лівої руки</i>:</p>  <p>• <b>Джерела магнітного поля:</b> рухомі заряджені тіла, рухомі заряджені частинки, провідники зі струмом, намагнічені тіла.</p> <p>• <b>Лінії магнітної індукції магнітного поля</b> завжди замкнені — магнітне поле є вихровим. Напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля, створеного провідником зі струмом або рухомим зарядом, визначають за допомогою <i>правої руки</i>: великий палець спрямовують у напрямку струму в провіднику або в напрямку руху позитивного заряду (протилежно напрямку руху негативного заряду); чотири зігнуті пальці вказують напрямок ліній магнітної індукції.</p> <p><b>Лінії магнітної індукції поля, створеного намагніченим тілом,</b> виходять із його північного полюса і входять у південний.</p>  <p>• <b>Джерелами магнітних полів є також змінні електричні поля.</b> Такого висновку в 1867 р. дійшов Дж. Максвелл.</p>

У 1867 р. британський фізик Дж. Максвелл висунув гіпотезу про те, що *електричне і магнітне поля не існують окремо*, незалежно одне від одного: якщо змінне магнітне поле створює електричне поле, то відповідно до принципу симетрії змінне електричне поле має створювати магнітне поле, тобто в просторі існує єдине електромагнітне поле. Через 21 рік після висунення цієї гіпотези електромагнітне поле було відкрито експериментально (див. § 22).

На частинку, яка має заряд  $q$  і рухається в електромагнітному полі зі швидкістю  $\vec{v}$ , діє зведенна сила Лоренца  $\vec{F}$ , яку можна визначити за формулою:  $\vec{F} = \vec{F}_{\text{ел}} + \vec{F}_{\text{Л}}$ , де  $\vec{F}_{\text{ел}} = q\vec{E}$  — електрична складова зведененої сили Лоренца;  $F_{\text{Л}} = |q|Bv \sin \alpha$  — магнітна складова зведененої сили Лоренца.

Електромагнітне поле поширюється в просторі зі скінченною швидкістю, яка у вакуумі становить близько  $3 \cdot 10^8$  м/с, тобто дорівнює швидкості поширення світла.

## 2 У чому відносність електричного і магнітного полів

Дехто з вас може не погодитися з висновком Максвелла про те, що електричне і магнітне поля завжди існують разом, адже добре знає, що, наприклад, біля нерухомого зарядженого тіла існує тільки електричне поле, а біля нерухомого постійного магніту — тільки магнітне поле. Проте згадайте: *рух і спокій залежать від вибору системи відліку*.

Уявіть, що ви, тримаючи в руках магніт, ідете від свого товариша. Якби людина мала здатність завжди виявляти електромагнітне поле, то в цьому випадку ви «бачили» б тільки одну його складову — магнітне поле, оскільки відносно вас магніт є нерухомим. Водночас ваш товариш «бачив» би як магнітне поле, так і електричне, тому що відносно нього магніт рухається і магнітне поле змінюється (див. рис. 16.1).



Якщо ваш товариш візьме заряджену кульку і понесе її до вас (див. рис. 16.2), хто з вас «виявить» тільки електричне поле, а хто — і магнітне, і електричне? Обґрунтуйте свою відповідь.

Таким чином, твердження, що в даній точці існує тільки електричне (чи тільки магнітне) поле, не має сенсу, адже не зазначено систему відліку. Разом із тим ми *николи* не знайдемо систему відліку, відносно якої «зникли» б обидві складові електромагнітного поля, адже *електромагнітне поле є матеріальним*.



**Рис. 16.1.** У системі відліку, пов'язаній із дівчинкою, виявляється лише магнітна складова електромагнітного поля. У системі відліку, пов'язаній із хлопчиком, виявляються обидві складові — й електрична, і магнітна



**Рис. 16.2.** До завдання в § 16



## Підбиваємо підсумки

Електромагнітна взаємодія здійснюється через електромагнітне поле. Електромагнітне поле — вид матерії, за допомогою якого здійснюється взаємодія між зарядженими тілами та частинками і намагніченими тілами.

• Умовно прийнято, що електромагнітне поле має дві складові (две форми прояву) — електричну (електричне поле), яка характеризується впливом поля як на рухомі, так і на нерухомі заряджені частинки, і магнітну (магнітне поле), яка характеризується впливом тільки на рухомі заряджені частинки.

• Електричне і магнітне поля не існують окремо, незалежно одне від одного: магнітне поле, що змінюється, створює електричне поле, а електричне поле, що змінюється, створює магнітне поле.

## Контрольні запитання

1. Дайте означення електромагнітного поля, назвіть його складові. 2. Дайте означення електричного поля. Яка фізична величина є його силовою характеристикою? 3. Назвіть джерела електричного поля. Що являють собою лінії напруженості поля, створеного кожним типом джерел? 4. Дайте означення магнітного поля. Яка фізична величина є його силовою характеристикою?
5. Назвіть джерела магнітного поля. Що собою являють лінії магнітної індукції магнітного поля, створеного кожним типом джерел? 6. У чому полягає гіпотеза Дж. Максвелла? 7. Назвіть основні властивості електромагнітного поля.



## Вправа № 16

1. Заряд на пластинах повітряного конденсатора (рис. 1) зменшується. Чи існують між пластинами конденсатора і електрична, і магнітна складові електромагнітного поля?
2. Чи будуть навколо провідника зі струмом у системі відліку, пов'язаній із цим провідником, існувати і електричне, і магнітне поля, якщо: а) сила струму в провіднику не змінюється? б) сила струму в провіднику збільшується?
3. Електрон рухається в електромагнітному полі. У деякий момент електрон потрапляє в точку, де швидкість його руху становить 80 км/с і направлена вертикально вгору (рис. 2). Визначте силу, що діє на електрон з боку поля, якщо магнітна індукція  $\vec{B}$  поля в цій точці дорівнює 0,05 Тл і направлена від нас, а напруженість  $\vec{E}$  поля дорівнює 3 кН/Кл і направлена вертикально вниз. Визначте прискорення руху електрона в цій точці.
4. Коли в металевому провіднику тече постійний електричний струм, вільні електрони рухаються в певному напрямку і тому біля провідника існує магнітне поле. Електричне поле відсутнє, адже в цілому провідник є електрично нейтральним. Тепер уявіть, що ви рухаетесь уздовж провідника зі швидкістю, яка дорівнює швидкості направленого руху електронів у провіднику. Відносно вас електрони не рухаються, а отже, і не створюють магнітне поле. При цьому провідник залишається нейтральним. Виходить, що в пов'язаній із вами системі відліку обидві складові електромагнітного поля зникли! Чи так це? Якщо ні, то де помилка?



Рис. 1

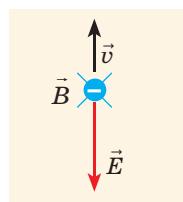


Рис. 2

# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ І «ЕЛЕКТРОДИНАМІКА».

## Частина 2. Електромагнетизм

1. Ви поглибили свої знання про *магнітне поле*.

**Магнітне поле** — це складова електромагнітного поля, завдяки якій здійснюється взаємодія між зарядженими частинками або тілами, що рухаються, та намагніченими тілами.

### Фізичні величини, які характеризують магнітне поле

#### Магнітна індукція

$$\text{Модуль } B = \frac{F_{A \max}}{\pi l}$$

$[B] = 1 \text{ Тл}$  (тесла)

#### Магнітний момент

**Напрямок**  
Правило свердліка;  
правила правої руки

**Модуль**  
 $p_m = IS$  —  
для плоского контуру зі струмом

#### Магнітний потік

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

$[\Phi] = 1 \text{ Вб}$   
(вебер)

### Сили, які діють з боку магнітного поля

**Сила Ампера** — сила, що діє на провідник зі струмом

$$\text{Модуль } F_A = BIl \sin \alpha$$

- електродвигун
- електровимірювальні прилади
- гучномовець

**Сила Лоренца** — сила, що діє на заряджену частинку

$$\text{Напрямок}\text{ Правило лівої руки}$$

- мас-спектрометр
- циклотрон (прискорювач важких заряджених частинок)

2. Ви повторили досліди Фарадея, вивчили явище електромагнітної індукції та його окремий випадок — явище самоіндукції.

**Явище електромагнітної індукції** — це явище виникнення вихрового електричного поля або електричної поляризації провідника під час зміни магнітного поля або під час руху провідника в магнітному полі.

**Закон Фарадея:**  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ ,

де  $\Delta \Phi / \Delta t$  — швидкість зміни магнітного потоку

**Закон самоіндукції:**  $\mathcal{E}_{\text{is}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ,

де  $L$  — індуктивність;  $[L] = \text{Гн}$  (генрі)

3. Ви дізналися, що напрямок індукційного струму визначають за *правилом Ленца*.

4. Ви встановили, що магнітне поле має енергію і що *енергія магнітного поля провідника зі струмом дорівнює*:  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ .

5. Ви згадали, що електричне і магнітне поля — це *две форми* прояву єдиного електромагнітного поля.

**Електромагнітне поле** — вид матерії, за допомогою якого відбувається взаємодія між зарядженими тілами, зарядженими частинками, намагніченими тілами.



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ I «ЕЛЕКТРОДИНАМІКА». ЧАСТИНА 2. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**Завдання 1.** Коли в провіднику (рис. 1) пропустили електричний струм, магнітна стрілка відхилилась.

- (2 бали). Яким є напрямок струму, якщо магнітна стрілка повернулася північним полюсом до нас?
- (3 бали) Доведіть, що коли в двох паралельних провідниках течуть струми протилежних напрямків, то провідники відштовхуються.



Рис. 1

**Завдання 2.** Електрон пролітає крізь плоский конденсатор, відстань між пластинами якого 2,4 см (рис. 2). Початкова швидкість руху електрона паралельна пластинам. Усередині конденсатора створено магнітне поле з індукцією  $5,0 \cdot 10^{-4}$  Тл, напрямленою до спостерігача (до нас).

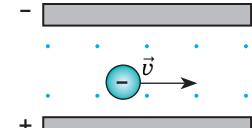


Рис. 2

- (1 бал) На електрон з боку магнітного поля діє:  
а) сила Кулона; б) сила Ампера; в) сила Лоренца; г) сила тертя.
- (2 бали) Якщо на конденсаторі створюється напруга 36 В, то електрон буде рухатися прямолінійно та паралельно пластинам конденсатора. Визначте швидкість руху електрона.
- (3 бали) Зобразіть траекторію руху електрона та визначте період його обертання, якщо напруга на пластинах конденсатора відсутня.

**Завдання 3.** На рис. 3 зображене конструкцію, що складається з товстих провідних паралельних рейок (відстань між рейками 0,2 м), які з'єднані провідною перемичкою  $MN$  і конденсатором  $C$ . Уся конструкція розташована в постійному магнітному полі індукцією 0,8 Тл.

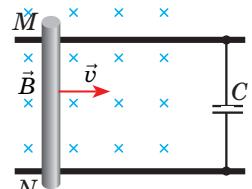


Рис. 3

- (2 бали) Обчисліть значення ЕРС індукції, яка виникає в перемичці, що рухається зі швидкістю 0,1 м/с.  
а) 16 мВ; б) 25 мВ; в) 100 мВ; г) 400 мВ.
- (2 бали) З якою швидкістю має рухатися перемичка, щоб на її кінцях виникла різниця потенціалів 0,24 В?
- (3 бали) Обчисліть заряд, який накопичується на конденсаторі, якщо перемичка рухається зі швидкістю 0,1 м/с. Ємність конденсатора 1000 мкФ.

**Завдання 4.** Надпровідну катушку індуктивністю 30 мГн приєднали до джерела струму. Через деякий інтервал часу сила струму в катушці сягнула 50 А.

- (1 бал) Індуктивність катушки *не* залежить...  
а) від кількості витків у катушці; в) матеріалу, з якого виготовлено осердя;  
б) форми осердя; г) сили струму в катушці.
- (2 бали) У той момент, коли сила струму в катушці збільшилася до вказаного значення, магнітний потік через катушку дорівнює:  
а) 0; б) 0,6 Вб; в) 1,5 Вб; г) 1500 Вб.
- (3 бали) Через який інтервал часу сила струму в катушці досягне вказаного значення, якщо ЕРС джерела струму 15 В, а його опір нехтово малий? Вважайте, що сила струму змінюється рівномірно.

*Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Поділіть суму на два. Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.*

## РОЗДІЛ II. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

### § 17. КОЛИВАННЯ. ВІДИ КОЛИВАНЬ. ФІЗІЧНІ ВЕЛИЧИННІ, ЯКІ ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ КОЛИВАННЯ



У курсі фізики 10-го класу ви ознайомилися з одним із найпоширеніших видів рухів у природі — механічними коливаннями. Існують також коливання зовсім іншої природи — електромагнітні.Хоча ці два процеси — механічні й електромагнітні коливання — є різними за своєю природою, вони мають низку спільних характерних ознак і описуються однаковими математичними законами.

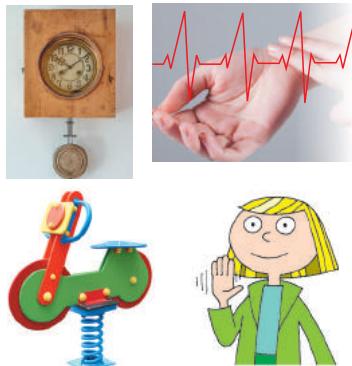
#### 1

#### Віди коливань та умови їх виникнення

Коливання — це зміни стану системи біля певної точки рівноваги, які точно або приблизно повторюються з часом.

За характером взаємодії з навколошніми тілами та полями розрізняють *вільні коливання, вимушені коливання, автоколивання*.

Вільні коливання	Вимушені коливання	Автоколивання
<p>Вільні коливання — це коливання, які відбуваються під дією внутрішніх сил системи і виникають після того, як систему виведено зі стану рівноваги.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>Системи, в яких можуть виникнути вільні коливання, називають <b>коливальними системами</b>.</li><li>Щоб у коливальній системі виникли вільні коливання, необхідне виконання двох умов:<ol style="list-style-type: none"><li>системі має бути передано енергію;</li><li>втрати енергії в системі мають бути незначними.</li></ol>Вільними, наприклад, є механічні коливання тягарця на пружині, які виникають, якщо тягарець відхилити від положення рівноваги й відпустити; електромагнітні коливання в коливальному контурі (див. § 18).</li><li>Амплітуда вільних коливань визначається початковими умовами.</li></ul>	<p>Вимушені коливання — це коливання, які відбуваються в системі тільки під дією зовнішнього періодичного впливу.</p> <p>Вимушеними, наприклад, є коливання шарів повітря під час поширення звукової хвилі, періодична зміна сили струму в електричній мережі (див. § 19).</p> <ul style="list-style-type: none"><li>Під час вимушених коливань може виникнути явище <b>резонансу</b> — різке збільшення амплітуди коливань у разі, якщо частота зовнішнього періодичного впливу збігається з власною частотою коливань системи.</li><li>Амплітуда вимушених коливань визначається інтенсивністю зовнішнього періодичного впливу.</li></ul>	<p>Автоколивання — це незгасаючі коливання, які відбуваються внаслідок здатності системи самостійно регулювати надходження енергії від постійного джерела.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>Системи, в яких можуть виникнути автоколивання, називають <b>автоколивальними системами</b>.</li><li>До автоколивальних систем можна віднести, наприклад, механічний годинник або генератор високочастотних електромагнітних коливань (див. § 23).</li><li>Амплітуда автоколивань визначається властивостями автоколивальної системи.</li></ul>



**Рис. 17.1.** Різні види механічних коливань

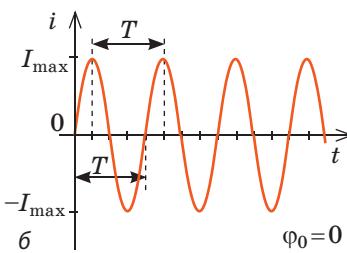
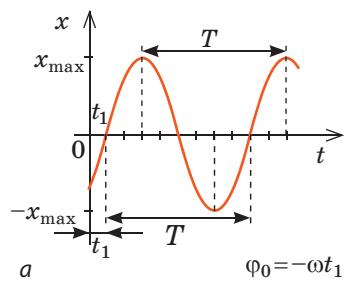
Якщо в коливальній системі немає жодних втрат енергії, то коливання триватимуть як завгодно довго — їхня амплітуда із часом не змінюватиметься. Такі коливання називають **незгасаючими**.

Однак у будь-якій реальній коливальній системі завжди є втрати енергії: під час механічних коливань енергія витрачається на долання сил тертя, деформацію; під час електромагнітних коливань — на нагрівання провідників, випромінювання електромагнітних хвиль тощо. У результаті амплітуда коливань із часом зменшується, і через певний інтервал часу, якщо немає надходжень енергії від зовнішнього джерела, коливання припиняються (згасають). Тому вільні коливання завжди є **згасаючими**.



На рис. 17.1 подано різні приклади механічних коливань. Які ці коливання: вільні, вимушенні? згасаючі, незгасаючі?

Коли тіло здійснює механічні коливання, змінюються його положення в просторі (координата), швидкість і прискорення руху. У випадку електромагнітних коливань змінюються сила струму в колі, заряд і напруга на обкладках конденсатора, електрорушійна сила (ЕРС). Загальні закони коливань є досить складними й виходять за межі шкільного курсу фізики, тому ми розглянемо лише окремий випадок — **гармонічні коливання**.



**Рис. 17.2.** Графіки гармонічних коливань: а — графік залежності координати тіла від часу:  $x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \phi_0)$ ; б — графік залежності сили струму від часу:  $i(t) = I_{\max} \sin \omega t$ .  $x_{\max}$ ,  $I_{\max}$  — амплітуди коливань;  $T$  — період коливань;  $\phi_0$  — початкова фаза коливань

**Гармонічні коливання** — це коливання, за яких значення змінної величини змінюється з часом за гармонічним законом.

Рівняння гармонічних коливань має вигляд:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi_0), \text{ або } x(t) = A \sin(\omega t + \phi_0),$$

де  $x$  — значення змінної величини в даний момент часу  $t$ ;  $A$  — амплітуда коливань;  $\omega$  — циклічна частота;  $\phi_0$  — початкова фаза коливань.

*Графік залежності значення змінної величини від часу називають **графіком коливань**.*

Графік гармонічних коливань має вигляд кривої, яку в математиці називають синусоїдою або косинусоїдою. За графіком коливань, як і за рівнянням коливань, легко визначити основні характеристики коливань (рис. 17.2).

2

## Які фізичні величини характеризують коливання

**Амплітуда коливань**  $A$  — це фізична величина, яка характеризує коливання і дорівнює максимальному значенню змінної величини.

Одниця амплітуди коливань визначається одиницею змінної величини. Так, у разі механічних коливань амплітуду розуміють як максимальне зміщення:  $A = x_{\max}$  ( $[x_{\max}] = 1 \text{ м}$ ); можна говорити також про амплітуду швидкості ( $[v_{\max}] = 1 \text{ м/с}$ ) й амплітуду прискорення ( $[a_{\max}] = 1 \text{ м/с}^2$ ). У разі електромагнітних коливань говорять про амплітуду сили струму ( $[I_{\max}] = 1 \text{ А}$ ), амплітуду напруги ( $[U_{\max}] = 1 \text{ В}$ ), амплітуду ЕРС ( $[E_{\max}] = 1 \text{ В}$ ) тощо.

**Період коливань**  $T$  — фізична величина, яка характеризує коливання і дорівнює мінімальному інтервалу часу, через який значення змінної величини повторюється, тобто часу, за який здійснюється одне повне коливання:

$$T = \frac{t}{N},$$

де  $t$  — час коливань;  $N$  — кількість повних коливань за цей час.

Одниця періоду коливань у СІ — секунда (с) (s).

**Частота коливань**  $v$  — фізична величина, яка характеризує коливання і чисельно дорівнює кількості повних коливань, які здійснюються за одиницю часу:  $v = \frac{N}{t}$ .

Одниця частоти коливань у СІ — герц (Гц) (Hz).

**Циклічна частота**  $\omega$  — фізична величина, яка характеризує коливання і чисельно дорівнює кількості повних коливань, які здійснюються за  $2\pi$  секунд:  $\omega = 2\pi v = \frac{2\pi}{T}$ .

Одниця циклічної частоти в СІ — радіан за секунду (рад/с, або  $\text{s}^{-1}$ ) (rad/s,  $\text{s}^{-1}$ ).

**Фаза коливань**  $\phi$  — фізична величина, яка характеризує стан коливальної системи в даний момент часу:  $\phi = \omega t + \phi_0$ .

Фаза коливань визначається періодом коливань (оскільки  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ), моментом часу  $t$ , у який фіксується значення змінної величини, та початковою фазою коливань  $\phi_0$  — фазою коливань у момент початку відліку часу.

### Фізика в цифрах

Середньостатистичні періоди циклічних процесів в організмі людини

Ритми мозку — електричні коливання мозку



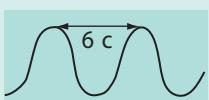
Ковтальні рухи стравоходу



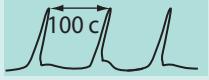
Серцевий ритм



Легеневе дихання (вдих — видих)



Моторика шлунка

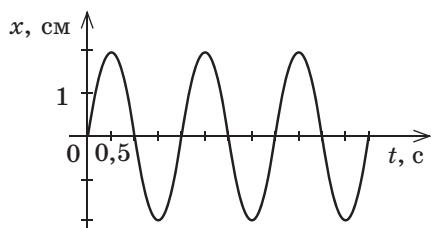


«Голодна» моторика шлунка



**3****Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** За графіком коливань тіла на пружині (див. рисунок): 1) визначте амплітуду, період, частоту, циклічну частоту коливань; 2) запишіть рівняння коливань і рівняння швидкості руху тіла; 3) знайдіть зміщення та швидкість руху тіла у фазі  $\frac{\pi}{6}$  рад.

**Розв'язання.**

1) Амплітуду коливань (максимальне зміщення тіла) і період коливань (час, за який тіло здійснює одне коливання) визначимо за графіком:

$$x_{\max} = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}; T = 2 \text{ с.}$$

Частоту і циклічну частоту коливань визначимо за відповідними формулами:

$$v = \frac{1}{T} = \frac{1}{2} \text{ с}^{-1} = 0,5 \text{ Гц}; \omega = 2\pi v = 2\pi \cdot 0,5 \frac{1}{\text{с}} = \pi \text{ с}^{-1}.$$

2) У момент початку спостереження ( $t = 0$ ) тіло перебувало у стані рівноваги ( $x_0 = 0$ ), тому рівняння коливань має вигляд:  $x = x_{\max} \sin \omega t$ . Підставивши значення  $x_{\max} = 0,02 \text{ м}$  і  $\omega = \pi \text{ с}^{-1}$  у рівняння коливань, маємо:

$$x = 0,02 \sin \pi t \text{ (м).}$$

Швидкість руху тіла дорівнює швидкості зміни його координати:

$$v(t) = x'(t) = (0,02 \sin \pi t)' = 0,02\pi \cos \pi t \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

3) Якщо  $\phi = \frac{\pi}{6}$ , то  $x(t) = x_{\max} \sin \phi = 0,02 \sin \frac{\pi}{6} = 0,01 \text{ (м)}; v(t) = 0,02\pi \cos \frac{\pi}{6} \approx 0,054 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ .

*Відповідь:* 1)  $x_{\max} = 0,02 \text{ м}; T = 2 \text{ с}; v = 0,5 \text{ Гц}; \omega = \pi \text{ с}^{-1}$ ; 2)  $x = 0,02 \sin \pi t \text{ (м)}$ ;  $v = 0,02\pi \cos \pi t \text{ (м/с)}$ ; 3)  $x = 1 \text{ см}; v = 5,4 \text{ см/с.}$

**Підбиваємо підсумки**

- Коливання — це зміни стану системи біля певної точки рівноваги, які точно чи приблизно повторюються з часом.
- За характером взаємодії з навколошніми тілами та полями розрізняють вільні, вимушенні та автоколивання: вільні коливання відбуваються під дією внутрішніх сил системи; вимушенні — під дією зовнішньої сили, що періодично змінюється; автоколивання існують у системі за рахунок надходження енергії від постійного джерела за умови, що надходження енергії регулюється самою системою.
- Коливання, амплітуда яких не змінюється з часом, називають незгасаючими; коливання, амплітуда яких із часом зменшується, — згасаючими.
- Коливання, за яких значення змінної величини змінюється з часом за гармонічним законом (законом косинуса або синуса), називають гармонічними коливаннями. Рівняння гармонічних коливань має вигляд:  $x(t) = A \cos(\omega t + \phi_0)$ , або  $x(t) = A \sin(\omega t + \phi_0)$ , де  $x$  — значення змінної величини в даний момент часу  $t$ ;  $A$  — амплітуда коливань;  $\omega = 2\pi v = \frac{2\pi}{T}$  — циклічна частота;  $\omega t + \phi_0$  — фаза коливань;  $\phi_0$  — початкова фаза.



## Контрольні запитання

- Дайте означення коливань.
- Які коливання називають вільними? вимушеними? автоколиваннями? Наведіть приклади.
- Які умови необхідні для виникнення вільних коливань?
- Які коливання називають згасаючими? незгасаючими? Наведіть приклади.
- Назвіть основні фізичні величини, які характеризують коливання. Дайте їх означення.
- Які коливання називають гармонічними? Запишіть рівняння гармонічних коливань.
- Який вигляд має графік гармонічних коливань?



## Вправа № 17

- Тіло на пружині здійснює три коливання за секунду. Максимальне відхилення тіла від положення рівноваги — 0,8 см. 1) Визначте період і циклічну частоту коливань. 2) Запишіть рівняння гармонічних коливань, якщо в момент початку відліку часу тіло перебувало в положенні рівноваги.
- Запишіть рівняння гармонічних коливань сили струму в електричній лампі, якщо амплітуда коливань становить 0,5 А, а період коливань — 0,02 с. У момент початку відліку часу сила струму в лампі максимальна.
- Рівняння коливань тіла має вигляд:  $x(t) = 0,02 \cos\left(\frac{\pi}{12}t + \frac{\pi}{6}\right)$  (м). Визначте: а) амплітуду, період і частоту коливань; б) фазу коливань, координату і швидкість руху тіла через 2 с після початку спостереження.
- На рис. 1 і рис. 2 наведено графіки гармонічних коливань. Для кожного випадку: а) визначте амплітуду, період і частоту коливань; б) запишіть рівняння коливань.

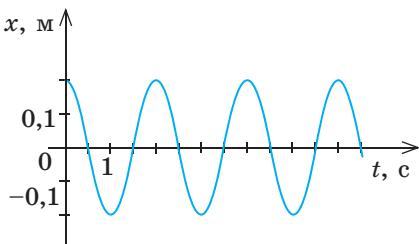


Рис. 1

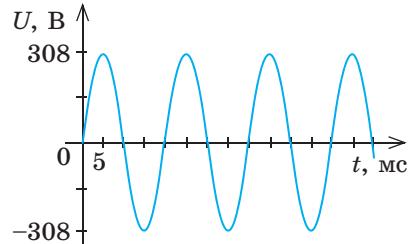


Рис. 2



## Експериментальне завдання

Складіть пристрій (див. рис. 3). На паперову смужку нанесіть шар клейстера (його можна виготовити з борошна й води) або шпалерного клею. Закрійте пальцем нижній отвір підвішеного конуса, насипіть в конус сухий річковий пісок (або дрібну сіль, пшено).

Відведіть конус від положення рівноваги та відпустіть. Одночасно почніть переміщувати паперову смужку так, як показано на рис. 3. Висипаючись, пісок залишить на смужці слід у вигляді хвилястої лінії. На одержаному «графіку гармонічних коливань» зазначте амплітуду коливань і виміряйте її. Виміряйте кількість коливань конуса за деякий час  $t$ , визначте період коливань і швидкість, із якою ви тягнули смужку. Запишіть рівняння коливань.

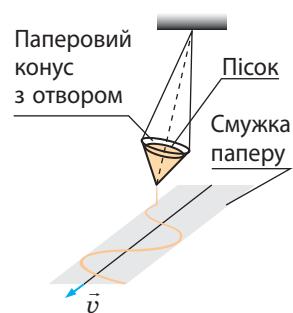


Рис. 3



## § 18. ВІЛЬНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛІВАННЯ В ІДЕАЛЬНОМУ КОЛІВАЛЬНОМУ КОНТУРІ. ФОРМУЛА В. ТОМСОНА



Сучасне суспільство неможливо уявити без швидкого обміну інформацією, тобто без мобільних телефонів, Інтернету. Хоча не так давно — понад століття тому — винайшли радіо і менш ніж століття як почалися перші регулярні телетрансляції. Усі ці досягнення техніки ґрунтуються на передаванні та прийманні радіосигналів. Сьогодні ви ознайомитеся з фізичним пристроєм, що є обов'язковою складовою більшості радіопередавачів і радіоприймачів.

### Нагадуємо

■ Конденсатор — це пристрій для накопичення електричного заряду, який складається з двох провідних обкладок, розділених шаром діелектрика.

■ Фізична величина, яка характеризує конденсатор, називається **електроємністю**:

$$C = \frac{q}{U},$$

де  $q$  — заряд конденсатора (модуль заряду однієї з різноїменно заряджених обкладок);  $U$  — напруга між обкладками.

■ Одиція **електроємності** в СІ — **фарад** (Ф) (F).

■ Ємність плоского конденсатора розраховують за формулою:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

де  $\epsilon_0$  — електрична стала;  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика;  $S$  — площа однієї обкладки;  $d$  — відстань між обкладками.

■ Між обкладками зарядженого конденсатора існує **електричне поле**, енергію якого можна визначити за формулами:

$$W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

### 1

### Як відбуваються електромагнітні коливання в коливальному контурі

Коливальний контур — це фізичний пристрій, який складається з послідовно з'єднаних конденсатора і катушки індуктивності (рис. 18.1).

Коливальний контур є коливальною системою, тобто в ньому можуть виникати вільні електромагнітні коливання.

Щоб у коливальному контурі виникли вільні коливання, системі необхідно передати енергію, наприклад зарядити конденсатор. З'єднаємо конденсатор із джерелом незмінного струму з вихідною напругою  $U_{\text{max}}$ . На обкладках конденсатора накопичиться деякий електричний заряд  $q_{\text{max}}$ , а між обкладками виникне електричне поле, енергія якого дорівнює:

$$W_{\text{ел. max}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2} = \frac{q_{\text{max}}^2}{2C}.$$

Якщо після зарядки конденсатор замкнути на катушку індуктивності (рис. 18.2, а), то під дією електричного поля конденсатора вільні заряджені частинки в контурі почнуть рухатись напрямлено. У контурі виникне електричний струм  $i$ , а конденсатор почне розряжатися (рис. 18.2, б).



**Рис. 18.1.** Модель (а) та електрична схема (б) коливального контуру: 1 — катушка індуктивності; 2 — конденсатор

Електричний струм завжди створює магнітне поле. Особливо сильним воно є всередині котушки. Сила струму в котушці зростає, тому магнітна індукція створеного струмом магнітного поля зростає теж. Змінне магнітне поле породжує вихрове електричне поле  $\vec{E}$ , яке в цьому випадку напрямлене протилежно струму, тому сила струму зростає поступово. Поступово зменшується й заряд  $q$  на обкладках конденсатора. Отже, протягом першої чверті періоду (рис. 18.2, а–в) енергія електричного поля конденсатора перетворюється на енергію магнітного поля котушки. Повна енергія коливального контуру дорівнюватиме:

$$W = W_{\text{ел}} + W_m = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2},$$

де  $q$  — заряд конденсатора в деякий момент часу;  $C$  — ємність конденсатора;  $L$  — індуктивність котушки;  $i$  — сила струму в котушці.

У той момент, коли конденсатор повністю розрядиться (рис. 18.2, в), енергія електричного поля дорівнюватиме нулю ( $W_{\text{ел}} = 0$ ), сила струму сягне максимального значення  $I_{\max}$ , а повна енергія контуру становитиме:

$$W = W_{m, \max} = \frac{LI_{\max}^2}{2}.$$

Заряд на обкладках конденсатора перетворився на нуль, проте струм одразу не припиниться й не змінить свого напрямку. Щойно сила струму в котушці почне зменшуватися, почне зменшуватися і магнітна індукція поля, створеного цим струмом, — виникне вихрове електричне поле, яке в цьому випадку підтримує струм. Заряджені частинки продовжують рух у тому самому напрямку, і конденсатор *перезаряджується* — заряд на його обкладках змінюється на протилежний (рис. 18.2, г). Отже, протягом другої чверті періоду (рис. 18.2, в–г) енергія магнітного поля котушки перетворюється на енергію

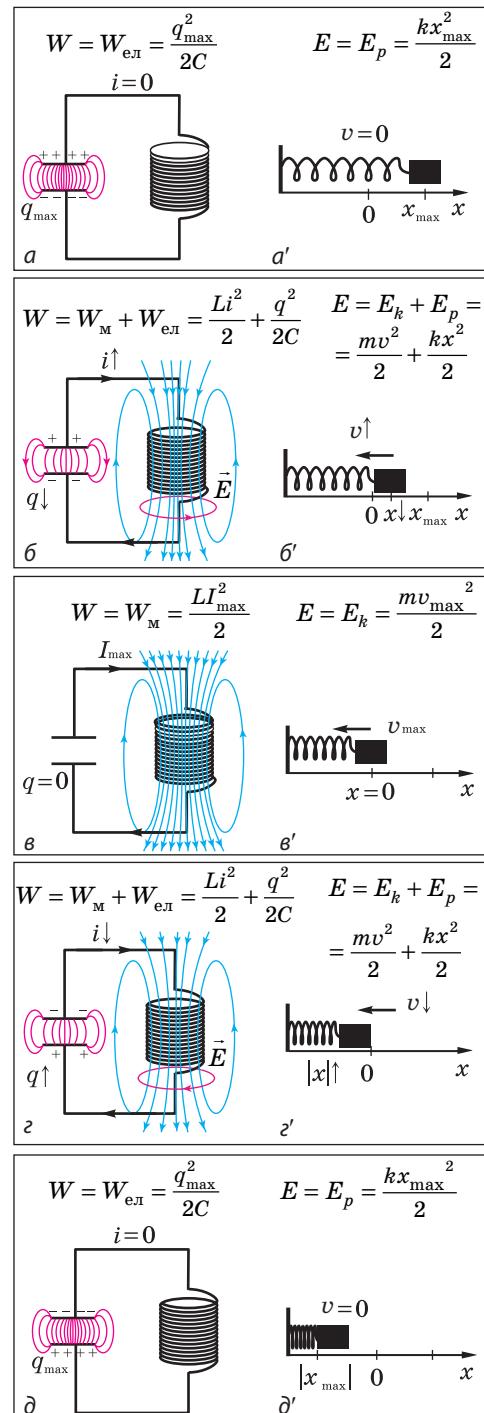


Рис. 18.2. Механізм вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі (а–д) і механізм вільних механічних коливань тягарця на пружині (а'–д')

електричного поля конденсатора. Конденсатор перезаряджатиметься, доки сила струму не досягне нуля ( $i = 0$ ). Енергія магнітного поля котушки в цей момент теж дорівнюватиме нулю ( $W_m = 0$ ), а енергія електричного поля конденсатора набуде максимального значення (рис. 18.2,  $\partial$ ).

Наступну половину періоду характер зміни електричного заряду на обкладках конденсатора та характер зміни сили струму в контурі будуть такими самими, тільки у зворотному напрямку. Коли заряд на обкладках конденсатора досягне максимального значення (див. рис. 18.2,  $a$ ), завершиться одне повне коливання.

 Розгляньте рис. 18.2. Які спільні риси мають механічні коливання пружинного маятника й електромагнітні коливання в коливальному контурі? Як ви вважаєте, чи будуть ці коливання згасаючими?

## 2 Аналогія між вільними електромагнітними і вільними механічними коливаннями

Якщо зіставити електромагнітні коливання (див. рис. 18.2,  $a-\partial$ ) і механічні коливання (див. рис. 18.2,  $a'-\partial'$ ), можна помітити, що коливання різної природи підпорядковуються схожим закономірностям.

Механічні коливання пружинного маятника	Електромагнітні коливання в коливальному контурі
■ Під час коливань відбувається <i>періодичне перетворення енергії</i> .	
Потенціальна енергія $\leftrightarrow$ Кінетична енергія	Енергія електричного поля $\leftrightarrow$ Енергія магнітного поля
■ У будь-якій коливальній системі завжди є втрати енергії, тому <i>реальні коливання є згасаючими</i> .	
Енергія витрачається на подолання сил опору рухові і нагрівання пружини під час деформації.	Енергія витрачається на нагрівання підвідних проводів, обмотки котушки, на поляризацію діелектрика, тощо.
■ Якби не було втрат енергії (коливальна система була б ідеальною), коливання були б незгасаючими (амплітуда коливань залишалася б незмінною), а повна енергія коливальної системи зберігалася б.	
Закон збереження енергії для ідеального пружинного маятника: $E_{p\max} = E_p + E_k = E_{k\max},$ $\text{або } \frac{kx_{\max}^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2}.$	Закон збереження енергії для ідеального коливального контуру: $W_{\text{ел.}\max} = W_{\text{ел}} + W_m = W_{m,\max},$ $\text{або } \frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}.$
■ Коливання в ідеальній коливальній системі називають <i>власними коливаннями</i> , а <i>період власних коливань визначається параметрами коливальної системи</i> і не залежить від амплітуди коливань, тобто від енергії, яку передано системі під час виведення її з положення рівноваги.	
Період власних механічних коливань тіла на пружині визначають за формулою: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$	Період власних електромагнітних коливань у коливальному контурі визначають за <i>формулою Томсона</i> : $T = 2\pi\sqrt{LC}.$

Формулу Томсона можна отримати, використавши аналогію між вільними електромагнітними коливаннями в коливальному контурі та механічними коливаннями тіла на пружині. Маса  $m$  тіла в механічній коливальній системі аналогічна індуктивності  $L$  катушки. Жорсткість  $k$  пружини аналогічна величині, оберненій до ємності конденсатора, тобто  $1/C$ . Чим менша жорсткість пружини, тим повільніше коливається тіло, і чим більша ємність конденсатора, тим довше він заряджається і розряджається.

*Зверніть увагу! Механічні й електромагнітні коливання схожі за закономірностями, а не за природою.* Наприклад, якщо однією із причин механічних коливань є інертність тіла, яка характеризується його масою, то однією із причин електромагнітних коливань є вихрове електричне поле, яке характеризується ЕРС самоіндукції. Саме завдяки вихровому полю, а не інертності електрони продовжують рух у початковому напрямку і «перезаряджають» конденсатор. Маса і вільний пробіг електронів є настільки малими, що без ЕРС самоіндукції струм практично миттєво припинився б і конденсатор ніколи б не перезарядився.

### 3 Чому формула Томсона є наслідком закону збереження енергії

Дovedемо формулу Томсона, спираючись на закон збереження енергії. Скористаємося такими фактами.

1. За означенням сила струму дорівнює заряду, який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:  $I = \frac{q}{t}$ . Сила струму в коливальному контурі безперервно змінюється, тому в даний момент часу сила струму дорівнює:  $i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'(t)$ . Відповідно швидкість зміни сили струму дорівнює:  $i'(t) = q''(t)$ .

2. Повна енергія коливального контуру в будь-який момент часу дорівнює сумі енергій магнітного і електричного полів:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}.$$

Ця енергія не змінюється з часом (коливальний контур є ідеальним), тому похідна повної енергії за часом дорівнює нулю:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0, \text{ або } \left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'.$$

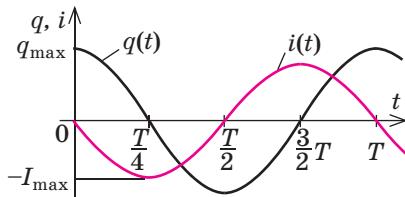
Остання формула означає, що швидкість зміни енергії магнітного поля дорівнює за модулем швидкості зміни енергії електричного поля; знак «-» означає, що в той час, коли енергія електричного поля збільшується, енергія магнітного поля зменшується, і навпаки.

Скориставшись правилами знаходження похідних, отримаємо:

$$\frac{L}{2} \cdot 2ii' = -\frac{1}{2C} \cdot 2qq', \text{ або } Lii' = -\frac{1}{C} \cdot qq'.$$

Урахувавши, що  $i = q'$ , а  $i' = q''$ , маємо:  $Lq'q'' = -\frac{1}{C} \cdot qq'$ . Звідси:

$$q'' = -\frac{1}{LC} \cdot q. \quad (1)$$



**Рис. 18.3.** Графіки електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі:  $q(t)$  — графік залежності заряду на обкладках конденсатора від часу;  $i(t)$  — графік залежності сили струму в контурі від часу

#### Зверніть увагу!

За означенням період коливань дорівнює часу одного коливання і визначається за формулою:

$$T = \frac{t}{N}$$

Але і в електромагнітних, і в механічних коливальних системах період власних коливань не залежить ані від кількості  $N$  і часу  $t$  коливань, ані від того, яку енергію і в який спосіб передано системі. **Період власних коливань визначається лише параметрами системи:**

■ період коливань математичного маятника визначається довжиною  $l$  нитки і прискоренням вільного падіння  $g$  у тому гравітаційному полі, в якому розташований маятник, і не залежить від маси маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

■ період коливань пружинного маятника визначається масою  $m$  тягаря і жорсткістю  $k$  пружини:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

■ період коливань у коливальному контурі визначається ємністю  $C$  конденсатора та індуктивністю  $L$  катушки:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Рівняння (1) є диференціальним рівнянням другого порядку, розв'язком якого, як відомо з математики, є функція косинуса (синуса). Дійсно, якщо  $q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ , то  $q' = -q_{\max} \omega \sin(\omega t + \varphi_0)$ ,  $q'' = -q_{\max} \omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ , тобто:

$$q'' = -\omega^2 q. \quad (2)$$

Таким чином, заряд на обкладках конденсатора ідеального коливального контуру змінюється за гармонічним законом, і рівняння коливань заряду має вигляд:

$$q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

де  $q_{\max}$  — амплітудне значення заряду на обкладках конденсатора;  $\omega$  — циклічна частота коливань;  $\varphi_0$  — початкова фаза коливань.

Зважаючи на формули (1) і (2), отримаємо:  $\omega^2 = \frac{1}{LC}$ , тобто  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Оскільки період коливань  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , маємо формулу Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

#### Зверніть увагу:

1) якщо в момент початку спостереження заряд на обкладках конденсатора є максимальним, то **рівняння коливань заряду має вигляд  $q = q_{\max} \cos \omega t$ , а графік коливань заряду являє собою косинусоїду** (рис. 18.3);

2) сила струму пов'язана із зарядом на обкладках конденсатора співвідношенням:  $i(t) = q'(t) = -q_{\max} \omega \sin \omega t = -I_{\max} \sin \omega t = I_{\max} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ , де  $I_{\max} = q_{\max} \omega$  — амплітудне значення сили струму в контурі.

*Коливання сили струму в контурі випереджають коливання заряду на обкладках конденсатора на фазу  $\frac{\pi}{2}$ , тобто на чверть періоду*  $\left(\varphi = \omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}\right)$  (див. рис. 18.3).

**4****Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** Максимальна напруга на обкладках конденсатора ідеального коливального контуру досягає 1,0 кВ. Яким є період електромагнітних коливань у контурі, якщо за амплітудного значення сили струму 1,0 А енергія магнітного поля в контурі 1,0 мДж?

*Дано:*

$$U_{\max} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$I_{\max} = 1,0 \text{ А}$$

$$W_{m. \max} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$$

$$T = ?$$

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Для визначення періоду електромагнітних коливань скористаємося формулою Томсона  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  і законом збереження енергії:

$$W_{el. \max} = W_{m. \max}.$$

$$1) \text{ Оскільки } W_{m. \max} = \frac{LI_{\max}^2}{2}, \text{ то } L = \frac{2W_{m. \max}}{I_{\max}^2}.$$

$$2) \text{ Оскільки } W_{el. \max} = \frac{CU_{\max}^2}{2}, \text{ то } C = \frac{2W_{el. \max}}{U_{\max}^2} = \frac{2W_{m. \max}}{U_{\max}^2} \text{ (адже } W_{el. \max} = W_{m. \max}).$$

$$3) \text{ За формулою Томсона: } T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{\frac{2W_{m. \max}}{I_{\max}^2} \cdot \frac{2W_{m. \max}}{U_{\max}^2}} = 4\pi \frac{W_{m. \max}}{I_{\max} U_{\max}}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[T] = \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{В}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{Кл}}{\text{А} \cdot \text{Дж}} = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{с}; \quad T = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 1,0 \cdot 10^3} \approx 13 \cdot 10^{-6} (\text{с}).$$

*Відповідь:*  $T \approx 13 \text{ мкс.}$

**Підбиваємо підсумки**

- Коливальний контур — це фізичний пристрій, який складається з послідовно з'єднаних конденсатора і катушки індуктивності.
- Якщо обкладкам конденсатора коливального контуру передати електричний заряд, у контурі виникнуть вільні електромагнітні коливання — періодичні зміни заряду на обкладках конденсатора й періодичні зміни сили струму в катушці. Під час вільних електромагнітних коливань енергія електричного поля конденсатора перетворюється на енергію магнітного поля катушки і навпаки.
- Фізичну модель, що являє собою коливальний контур, у якому відсутні втрати енергії, називають ідеальним коливальним контуром. Для ідеального коливального контуру:
  - вільні електромагнітні коливання є незгасаючими;
  - період власних коливань визначають за формулою Томсона:  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ;
  - закон збереження енергії має вигляд:  $W_{el. \max} = W_{el} + W_m = W_{m. \max}$ .

**Контрольні запитання**

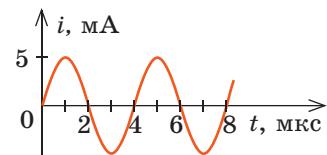
1. Назвіть основні елементи коливального контуру.
2. Опишіть процес вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі.
3. Чому після повного розрядження конденсатора струм через його катушку не припиняється?
4. Які перетворення енергії відбуваються під час електромагнітних коливань у коливальному контурі?
5. Який коливальний контур називають ідеальним?

- 6.** Запишіть закон збереження енергії для ідеального коливального контуру.  
**7.** Отримайте формулу Томсона, скориставшись методом аналогій; законом збереження енергії. **8.** Який вигляд має графік коливань заряду на обкладках конденсатора? графік коливань сили струму в контурі?



### Вправа № 18

- Чи зміняться, і якщо зміняться, то як, період і частота вільних електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі, якщо: а) максимальний заряд на обкладках конденсатора збільшити в 2 рази; б) ємність конденсатора зменшити в 4 рази; в) індуктивність катушки збільшити в 9 разів?
- На рисунку наведено графік гармонічних коливань сили струму в коливальному контурі. Якщо катушку в цьому коливальному контурі замінити на катушку, індуктивність якої в 4 рази менша, то період коливань дорівнюватиме:  
 А 1 мкс    Б 2 мкс    В 4 мкс    Г 8 мкс
- Чому дорівнює період власних електромагнітних коливань у коливальному контурі, індуктивність якого дорівнює 1,5 мГн, а ємність — 15 мкФ? Яким буде результат, якщо до контуру приєднати ще три такі самі конденсатори: а) паралельно даному конденсатору; б) послідовно з даним конденсатором?
- Електричний заряд на обкладках конденсатора коливального контуру змінюється за законом:  $q(t) = 0,01 \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot 10^6 t\right)$  (мКл). Ємність конденсатора — 144 пФ. Визначте: а) початкову фазу і циклічну частоту коливань; б) період і частоту коливань; в) амплітудні значення заряду та сили струму; г) індуктивність катушки; д) енергію електричного поля конденсатора та енергію магнітного поля катушки через  $t = 2$  мкс після початку спостереження.
- Ідеальний коливальний контур складається з конденсатора ємністю 1,0 мкФ і катушки індуктивністю 10 мГн. Яким є максимальний заряд на обкладках конденсатора, якщо максимальна сила струму в катушці становить 100 мА? Розв'яжіть задачу у два способи.



### Фізика і техніка в Україні



**Антоніна Федорівна Прихόдько** (1906–1995) — видатна українська вчена-фізик. Вона розпочала наукові дослідження в галузі низькотемпературної спектроскопії твердого тіла та оптики молекулярних кристалів у Харківському фізико-технічному інституті (ХФТІ) під керівництвом першого директора інституту І. В. Обрєймова. Саме за видатні результати в цій галузі вчена отримала міжнародне визнання, нагороджена найвищими відзнаками Радянського Союзу, була обрана академіком Національної академії наук України.

Антоніна Федорівна Прихόдько досліджувала фізику твердого тіла та спектроскопію, стала засновницею школи низькотемпературної спектроскопії молекулярних кристалів. Вона першою експериментально виявила колективні стани збудження молекулярних кристалів (молекулярні екситони) і започаткувала фізику екситонних станів. Президією НАН України засновано премію імені А. Ф. Прихόдько.

## § 19. ЗМІННИЙ СТРУМ. ГЕНЕРАТОРИ ЗМІННОГО СТРУМУ



Коли ви вмикате вдома світло, кімната осяюється рівним яскравим світлом, тобто світіння ламп не змінюється. Чому ж струм, який іде в лампі, ми називаємо змінним?

1

### Змінний електричний струм

**Вимушенні електромагнітні коливання** — це незгасаючі коливання заряду, напруги та сили струму, які спричинені електрорушійною силою, що періодично змінюється:

$$e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де  $e$  — значення ЕРС у даний момент часу (миттєве значення ЕРС);  $\mathcal{E}_{\max}$  — амплітудне значення ЕРС;  $\omega$  — циклічна частота змінної ЕРС (рис. 19.1).

Яскравим прикладом вимушених коливань є **змінний електричний струм**.

**Змінний електричний струм** — електричний струм, сила якого змінюється за гармонічним законом:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \phi_0),$$

де  $i$  — миттєве значення сили струму;  $I_{\max}$  — амплітудне значення сили струму;  $\omega$  — циклічна частота змінного струму, що збігається із частотою змінної ЕРС;  $\phi_0$  — зсув фаз між коливаннями струму та коливаннями ЕРС.

На відміну від постійного струму змінний струм увесь час періодично змінює свої значення й напрямок (див. рис. 19.1).

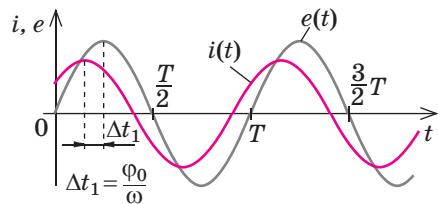
2

### Як одержати змінну ЕРС

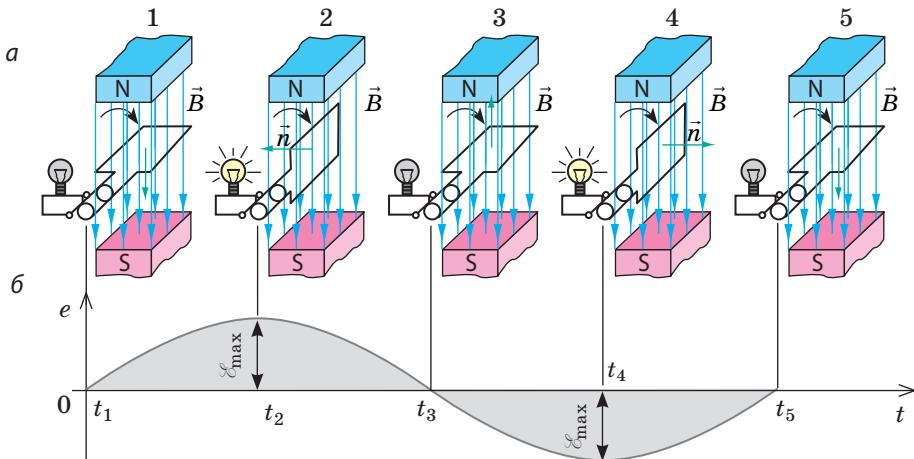
Джерело електричної енергії, яке створює ЕРС, що періодично змінюється, називають **генератором змінного струму**.

Генератором змінного струму може слугувати дротяна рамка, яка обертається з деякою незмінною кутовою швидкістю  $\omega$  в однорідному магнітному полі індукцією  $\vec{B}$  (рис. 19.2, a). Доведемо, що за цих умов у рамці індукується змінна ЕРС, яка змінюється за гармонічним законом.

За означенням магнітний потік  $\Phi$ , що пронизує рамку, обчислюється за формулою:  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Нехай у момент початку відліку часу  $t_1$  площа рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції (рис. 19.2, a, положення 1), тобто кут між нормаллю  $\vec{n}$  до площини рамки та вектором магнітної індукції дорівнює нулю ( $\alpha_0 = 0$ ). Якщо рамку обертати в магнітному полі, кут  $\alpha$  буде змінюватися за законом:  $\alpha = \omega t$ . Отже, відповідно змінюватиметься і магнітний потік:  $\Phi = BS \cos \omega t$ .



**Рис. 19.1.** Графіки залежності від часу змінної ЕРС  $e(t)$  і сили змінного струму  $i(t)$ ;  $\phi_0$  — зсув фаз між коливаннями сили струму та коливаннями ЕРС



**Рис. 19.2.** Створення змінної ЕРС індукції в рамці, яка обертається в магнітному полі постійного магніту: а — зміна магнітного потоку, який пронизує рамку; б — графік  $e(t)$  — графік залежності ЕРС від часу

Згідно із законом Фарадея, в рамці виникне ЕРС індукції:

$$e(t) = -\Phi'(t) = -(BS \cos \omega t)' = -(-BS \omega \sin \omega t) = BS \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де  $\mathcal{E}_{\max} = BS\omega$  — амплітудне значення ЕРС індукції.

ЕРС індукції сягатиме максимального значення в моменти часу  $t_2$  і  $t_4$ , коли рамка буде розташована вздовж ліній магнітної індукції, тобто коли  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 19.2, а, положення 2 і 4), і перетворюватиметься на нуль у моменти часу  $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_5$ , коли рамка буде розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції, тобто коли  $\alpha = 0$  або коли  $\alpha = 180^\circ$  (рис. 19.2, а, положення 1, 3, 5).

Якщо рамка містить не один, а  $N$  витків дроту, то ЕРС індукції дорівнюватиме:

$$e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де  $\mathcal{E}_{\max} = NBS\omega$  — амплітудне значення ЕРС.

### 3

### Як одержати змінний струм

Якщо до дротяної рамки, що обертається в магнітному полі, за допомогою спеціальних ковзних контактів підключити активне навантаження (наприклад, лампу розжарювання), то електричне коло буде замкненим і в колі виникне змінний електричний струм. Джерелом струму в колі слугуватиме обертова рамка, а споживачем — лампа.

Згідно із законом Ома для повного кола сила струму в лампі визначається за формулою:

$$i(t) = \frac{e}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max} \sin \omega t}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t,$$

де  $R$  — опір активного навантаження;  $r$  — опір джерела (рамки);

$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r}$  — амплітудне значення сили струму.

Оскільки струм змінний, яскравість світіння лампи має періодично змінюватися. Однак, якщо частота зміни струму є досить великою, зміни яскравості не спостерігаються.

**Зверніть увагу:** в колах, які мають емність та індуктивність, фази коливань сили струму та ЕРС не збігаються (див. рис. 19.1), тому в загальному випадку миттєве значення сили струму обчислюють за формулою:

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \phi_0).$$

#### 4 Генератори змінного струму

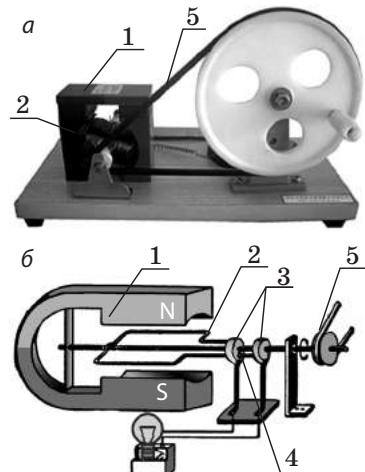
Найпростіший індукційний генератор змінного струму (див. рис. 19.3) складається з металевого осердя, в пазі якого вкладено обмотку (на рис. 19.3, б цю складову замінено рамкою); кінці обмотки з'єднані з кільцями, до кожного з яких притиснута щітка для відведення напруги до споживача; осердя з обмоткою обертається в магнітному полі нерухомого постійного магніту або електромагніту. Обертову частину генератора називають *ротором*, нерухому частину — *статором*.

Утім генератор такої конструкції має низку суттєвих недоліків:

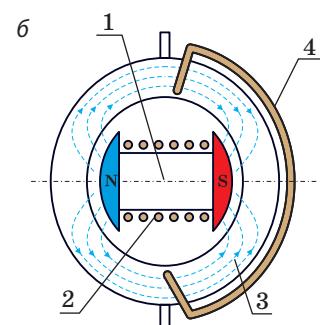
1) у разі зняття струмів високої напруги виникає сильне іскріння в ковзних контактах (кільце — щітка), що призводить до значних втрат енергії та передчасного зношення;

2) частота змінного струму є досить великою (для споживачів у більшості країн світу  $v=50$  Гц), отже, ротор має обертатися із частотою 50 об/с, що важко здійснити технічно.

Для одержання ЕРС індукції не має значення, що слугуватиме ротором — рамка, яка обертається в магнітному полі нерухомого електромагніту, чи електромагніт, який обертається всередині нерухомої рамки. І в тому, і в іншому випадках магнітний потік, що проходить рамку, змінюється. Проте сила струму в обмотках електромагніту значно менша від сили струму, який віддає генератор у зовнішнє коло. Тому в сучасних потужних генераторах (рис. 19.4) ротором є електромагніт, що являє собою великий циліндр, у пазі якого вкладено обмотку. До обмотки електромагніту



**Рис. 19.3.** Вигляд (а) і принципова будова (б) найпростішого генератора змінного струму:  
1 — нерухомий магніт; 2 — осердя з обмоткою (дротяна рамка), що обертається за допомогою пасової передачі;  
3 — кільця; 4 — щітки;  
5 — привідний пас



**Рис. 19.4.** Вигляд турбогенератора (а) і структурна схема двополюсного генератора (б):  
1 — осердя ротора; 2 — обмотка ротора; 3 — осердя статора; 4 — обмотка статора

через колектор подається напруга від джерела постійного струму — збуджувача. Обмотки статора, в яких створюється ЕРС індукції, вкладають у пази нерухомого порожністого важкого металевого циліндра, виготовленого, як і осердя електромагніту, з листової сталі (для зменшення струмів Фуко). Обмотку статора легко ізолювати, від неї простіше відвести значний струм у зовнішнє коло.

Швидкість обертання ротора можна зменшити, якщо використати електромагніт, що має декілька пар магнітних полюсів. Частота  $v$  у змінного струму, який виробляє генератор, пов'язана з обертовою частотою  $n$  ротора генератора співвідношенням:

$$v = pn,$$

де  $p$  — кількість пар магнітних полюсів генератора.

## 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Рамка площею  $100 \text{ см}^2$  містить 60 витків проводу. Рамка рівномірно обертається з частотою 120 об/хв в однорідному магнітному полі індукцією  $0,025 \text{ Тл}$ . У момент початку відліку часу площа рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Запишіть рівняння залежності магнітного потоку, який пронизує рамку, від часу. Визначте значення ЕРС індукції в рамці через  $\frac{1}{24}$  с після початку спостереження. Знайдіть максимальну силу струму в рамці, якщо рамка приєднана до активного навантаження опором  $25 \text{ Ом}$ , а опір рамки —  $5 \text{ Ом}$ .

Дано:

$$S=0,01 \text{ м}^2$$

$$N=60$$

$$n=120 \text{ об/хв}=2 \text{ об/с}$$

$$B=0,025 \text{ Тл}$$

$$t=\frac{1}{24} \text{ с}$$

$$R=25 \text{ Ом}$$

$$r=5 \text{ Ом}$$

$$\Phi(t) = ?$$

$$e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = ?$$

$$I_{\max} = ?$$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.

1) Під час обертання рамки магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом:  $\Phi(t)=BS \cos \omega t$ , де  $\omega = 2\pi n$  — кутова швидкість обертання рамки.

2) Унаслідок зміни магнітного потоку виникає ЕРС індукції:  $e(t)=-N\Phi'(t)$ . Миттєве значення ЕРС можна знайти, підставивши в рівняння залежності  $e(t)$  відповідне значення  $t$ .

3) Згідно із законом Ома максимальне значення сили індукційного струму дорівнює:  $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r}$ .

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:  $[\omega] = \text{с}^{-1}$ ;  $\omega = 2\pi \cdot 2 = 4\pi \text{ (с}^{-1})$ ;

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб},$$

$$\Phi(t) = 0,025 \cdot 0,01 \cos 4\pi t = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Вб);}$$

$$e(t) = -60 \cdot \left(2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t\right)' = 60 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4\pi \cdot \sin 4\pi t \approx 0,19 \sin 4\pi t \text{ (В);}$$

$$e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = 0,19 \sin\left(4\pi \cdot \frac{1}{24}\right) = 0,19 \sin \frac{\pi}{6} = 0,19 \cdot 0,5 = 0,095 \text{ (В),}$$

$$\mathcal{E}_{\max} = 0,19 \text{ В;}$$

$$[I_{\max}] = \frac{\mathcal{E}}{O_M + O_m} = \frac{B \cdot A}{B} = A; I_{\max} = \frac{0,19}{25+5} \approx 0,006 \text{ (А).}$$

$$Відповідь: \Phi(t) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Вб); } e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = 95 \text{ мВ; } I_{\max} \approx 6 \text{ мА.}$$



## Підбиваємо підсумки

Вимушеними електромагнітними коливаннями називають незгасаючі коливання заряду, напруги та сили струму, які спричинені ЕРС, що періодично змінюються:  $e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$ . Прикладом вимушених електромагнітних коливань є змінний електричний струм, сила якого змінюється за гармонічним законом:  $i = I_{\max} \sin(\omega t + \phi_0)$ .

- У провідній рамці площею  $S$ , яка обертається в однорідному магнітному полі індукцією  $B$  з деякою незмінною кутовою швидкістю  $\omega$ , індукується змінна ЕРС:  $e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$ , де  $N$  — кількість витків у рамці.
- Якщо до рамки, що обертається, приєднати активне навантаження опором  $R$ , то в колі виникне змінний електричний струм:  $i(t) = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t$ , де  $r$  — опір рамки.
- Змінний електричний струм виробляють генератори змінного струму — джерела електричної енергії, які створюють ЕРС, що періодично змінюються.



## Контрольні запитання

- Дайте означення вимушених електромагнітних коливань.
- Який струм називають змінним?
- Чому в рамці, що обертається в магнітному полі, виникає змінна ЕРС?
- Чи залежить, і якщо залежить, то як, максимальне значення змінної ЕРС від кутової швидкості обертання рамки? площи рамки? кількості витків у рамці? опору рамки?
- Чому в рамці, якщо її замкнути, виникає струм? Від яких чинників залежить сила цього струму? Що в такому колі є джерелом струму?
- Опишіть будову найпростішого генератора змінного струму. Чому такі типи генераторів не набули широкого застосування?
- Опишіть будову й основні особливості сучасних генераторів змінного струму.



## Вправа № 19

- Визначте, скільки пар магнітних полюсів мають ротори генераторів Дніпрогесу, якщо, здійснюючи 83,3 об/хв, вони виробляють струм частотою 50 Гц (стандартна частота змінного струму у споживчих мережах).
- У рамці, що має 50 витків дроту й рівномірно обертається в магнітному полі, потік магнітної індукції змінюється за законом:  $\Phi(t) = 2,0 \cdot 10^{-3} \cos 100\pi t$ . Рамка має опір 2 Ом і замкнена на активний опір 10 Ом. Запишіть рівняння залежностей  $e(t)$  та  $i(t)$ . Знайдіть: а) значення ЕРС в рамці через 5,0 мс після початку спостереження; б) максимальну силу струму в рамці; в) силу струму через 1,0 мс після початку спостереження.
- У момент часу, коли площа рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції, магнітний потік, що пронизує рамку, є максимальним. Чому ж у цей момент ЕРС індукції дорівнює нулью?
- Дротяна прямокутна рамка розміром  $20 \times 30$  см, що має 20 витків мідного дроту діаметром 1 мм, розташована в однорідному магнітному полі індукцією 0,5 Тл. Рамку замикають на резистор опором 6,6 Ом і надають обертання із частотою 10 об/с. Визначте максимальну силу струму в рамці, якщо вісь обертання рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції поля, в якому обертається рамка зі струмом.
- Складіть план проведення експерименту з визначення магнітної індукції поля, в якому обертається рамка зі струмом.

## § 20. АКТИВНИЙ, ЄМНІСНИЙ ТА ІНДУКТИВНИЙ ОПОРИ В КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ



Миттєві значення напруги та сили змінного струму безперервно змінюються — періодично перетворюються на нуль, періодично досягають максимуму. Чому ж тоді ми кажемо, наприклад: «Сила струму в спіралі електричної лампи 0,27 А», «Напруга на нагрівальному елементі праски 220 В»? З'ясуємо, про які значення напруги та сили змінного струму йдеться.

### 1 Який опір називають активним

Вивчаючи постійний струм, ви дізналися, що всі провідники (за винятком надпровідників) мають електричний опір. Провідники чинять опір і змінному струмові, однак, на відміну від кіл постійного струму, в колах змінного струму існують різні види опорів, які можна поділити на дві групи — *активні опори* і *реактивні опори*.

Елемент електричного кола має **активний опір**  $R$ , якщо під час проходження в цьому елементі струму частина електричної енергії витрачається на нагрівання:  $Q = I^2 R t$ .

Будь-який елемент електричного кола як постійного, так і змінного струму (з'єднувальні проводи, нагрівальні елементи, обмотки двигунів, генераторів тощо) має активний опір (ми називаємо його просто опір).

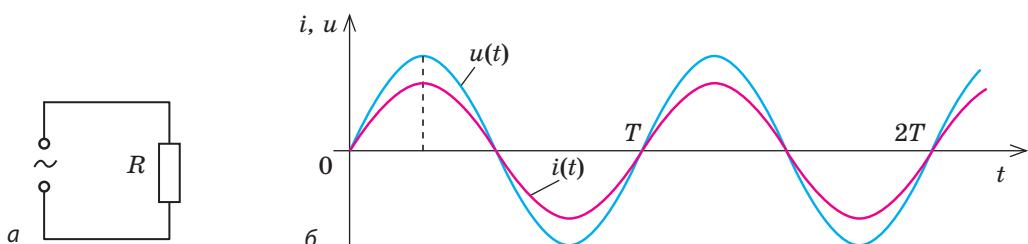
Нехай електричне коло (рис. 20.1, а) складається зі з'єднувальних проводів; навантаження з малою індуктивністю і значним активним опором  $R$ ; джерела змінного струму, напруга на виході якого змінюється за гармонічним законом:

$$u(t) = U_{\max} \sin \omega t.$$

Згідно із законом Ома сила струму в колі теж змінюється гармонічно:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U_{\max} \sin \omega t}{R} = I_{\max} \sin \omega t, \text{ де } I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}.$$

*В елементах електричного кола, що мають тільки активний опір, коливання сили струму і напруги збігаються за фазою* (рис. 20.1, б).



**Рис. 20.1.** Активний опір у колі змінного струму: а — електрична схема кола; б — графіки залежностей від часу сили струму  $i(t)$  і напруги  $u(t)$ . Сила струму і напруга одночасно досягають максимальних значень і одночасно стають рівними нулю

**2**

## Як визначити діючі значення сили струму і напруги

Оцінювати дію змінного струму за миттєвим значенням сили струму незручно — це значення безперервно змінюється. Не можна для цього використати середнє значення, оскільки середнє за період значення сили струму дорівнює нулю (див. рис. 20.1, б). Дію змінного струму прийнято оцінювати за *діючим (ефективним) значенням сили струму*.

Припустимо, що ми маємо дві однакові лампи опором  $R$  кожна. Одну з ламп приєднали до джерела постійного струму, другу — до джерела змінного струму (рис. 20.2). Пересуваючи повзунок реостата, слід домогтися, щоб яскравість світіння обох ламп була однаковою. Це означає, що *середнє значення потужності змінного струму дорівнює середній потужності постійного струму*:  $p_{\text{cep}} = P$ .

**Діюче значення сили змінного струму**  $I_d$  дорівнює силі такого постійного струму  $I$ , за якого в тому самому активному опорі виділяється потужність  $P$ , що дорівнює середній потужності  $p_{\text{cep}}$  змінного струму: якщо  $I_d = I$ , то  $p_{\text{cep}} = P$ .

Потужність постійного струму, яку споживає лампа активним опором  $R$ , можна обчислити за формулою:  $P = I^2 R$ .

Знайдемо середнє значення потужності змінного струму. На нескінченно малому інтервалі часу силу струму можна вважати незмінною, тому миттєву потужність також можна обчислити за формулою:  $p = i^2 R$ , де  $i = I_{\text{max}} \sin \omega t$  — миттєве значення сили струму. Звідси:

$$p = I_{\text{max}}^2 R \sin^2 \omega t = I_{\text{max}}^2 R \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2} - \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2} \cos 2\omega t.$$

Із графіка залежності миттєвої потужності змінного струму від часу (рис. 20.3) бачимо, що середнє за період значення потужності дорівнює:

$$p_{\text{cep}} = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2}.$$

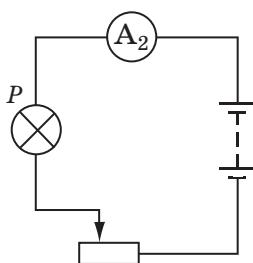
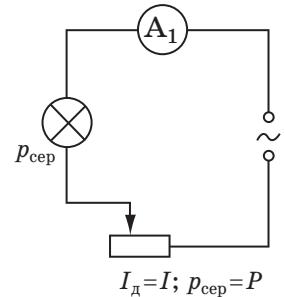
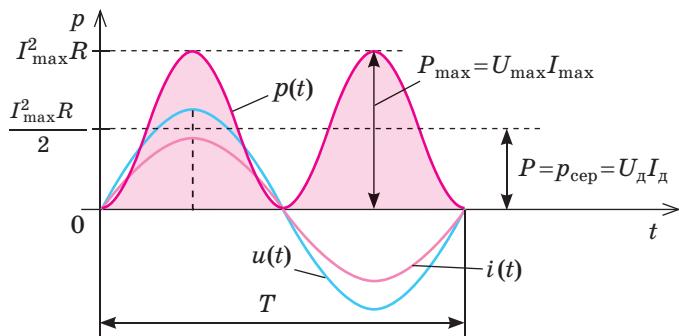


Рис. 20.2. До введення поняття «діюче значення сили струму»

Рис. 20.3. Активний опір у колі змінного струму: графік  $p(t)$  — графік залежності потужності (активної) від часу

**Зверніть увагу!**

■ Якщо коло змінного струму містить тільки активний опір або якщо реактивний опір кола дорівнює нулю, то кількість теплоти  $Q$ , що виділяється під час проходження струму, роботу  $A$  і потужність  $P$  змінного струму розраховують за відповідними формулами для постійного струму:

$$Q = I_{\text{д}}^2 R t, \quad A = U_{\text{д}} I_{\text{д}} t,$$

$$P = U_{\text{д}} I_{\text{д}},$$

де  $I_{\text{д}}$  і  $U_{\text{д}}$  — діючі значення сили струму і напруги.

■ Якщо реактивний опір кола не дорівнює нулю, то сила струму і напруга не збігаються за фазою (мають певний зсув фаз  $\varphi$ ). У такому випадку роботу і потужність змінного струму визначають за формулами:

$$A = U_{\text{д}} I_{\text{д}} t \cos \varphi;$$

$$P = U_{\text{д}} I_{\text{д}} \cos \varphi,$$

де  $\cos \varphi = R / Z$  — коефіцієнт потужності,  $R$  і  $Z$  — активний і повний опори кола відповідно.

Оскільки  $P = p_{\text{сер}}$ , маємо:  $I^2 R = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2}$ .

Звідси діюче значення сили змінного струму дорівнює:

$$I_{\text{д}} = I = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

Аналогічно діюче значення змінної напруги дорівнює:

$$U_{\text{д}} = U = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

На практиці для характеристики параметрів змінного струму використовують саме діючі значення сили струму і напруги. Наприклад, коли кажуть, що напруга в мережі змінного струму становить 220 В, а сила струму в колі — 25 А, це означає, що діюче значення напруги в мережі — 220 В, а діюче значення сили струму — 25 А. Амперметри і вольтметри змінного струму вимірюють саме діючі значення сили струму і напруги.

### 3 Реактивний опір у колі змінного струму

Конденсатор і катушка індуктивності, введені в коло змінного струму, чинять додатковий опір струмові. Цей опір називають *реактивним*, оскільки на його долання не витрачається енергія джерела живлення. Чверть періоду катушки або конденсатор забирають енергію від джерела, наступну чверть періоду вони повертають енергію джерелу.

**Види реактивного опору**

**Індуктивний опір провідника**  $X_L$  — фізична величина, яка характеризує опір провідника електричному струмові, викликаний дією ЕСС самоіндукції:

$$X_L = \omega L,$$

де  $\omega$  — циклічна частота змінного струму;  $L$  — індуктивність провідника.

**Повний опір кола**, яке містить активний, індуктивний і ємнісний опори, обчислюють за формулою:

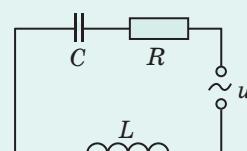
$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Різницю  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$  називають **реактивним опором**.

**Ємнісний опір**  $X_C$  — фізична величина, яка характеризує здатність конденсатора протидіяти змінному струмові:

$$X_C = \frac{1}{\omega C},$$

де  $\omega$  — циклічна частота змінного струму;  $C$  — ємність конденсатора.





## Підбиваємо підсумки

- Елемент електричного кола має активний опір  $R$ , якщо під час проходження в цьому елементі електричного струму частина електричної енергії витрачається на нагрівання:  $Q = I^2 R t$ .
- Якщо електричне коло має тільки активний опір  $R$ , а напруга на виході джерела струму змінюється за гармонічним законом  $u = U_{\max} \sin \omega t$ , то сила струму в колі теж змінюється за гармонічним законом:  $i = I_{\max} \sin \omega t$ , де  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}$ . При цьому коливання сили струму і напруги збігаються за фазою.
- Оцінювати дію змінного струму прийнято за діючими (ефективними) значеннями сили струму і напруги:  $I_d = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$ ;  $U_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$ .



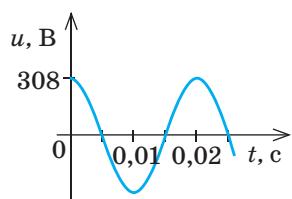
## Контрольні запитання

1. Які основні види опорів існують у колах змінного струму? Наведіть їх означення.
2. Як пов'язані сила струму і напруга в колі з активним опором?
3. Що називають діючим значенням сили струму?
4. Як розрахувати діючі значення сили струму й напруги?
5. Наведіть формулу для розрахунку індуктивного опору. Від яких чинників він залежить?
6. Дайте означення ємнісного опору. Від яких чинників він залежить?
7. Чому дорівнює повний опір кола?



## Вправа № 20

1. В освітлювальному колі змінного струму застосовують напругу 220 В.  
а) Яким є показ вольтметра, приєднаного до цього кола?  
б) Якого максимального значення сягає напруга в колі?
2. Котушка індуктивністю 20 мГн увімкнена в коло змінного струмучастотою 50 Гц. Визначте індуктивний опір котушки.
3. На ділянці кола з активним опором 900 Ом сила струму змінюється за законом  $i = 0,5 \sin 100\pi t$  (А). Визначте: а) діючі значення сили струму й напруги; б) потужність, яка виділяється на ділянці; в) напругу, на яку має бути розрахована ізоляція проводів. Запишіть рівняння залежності  $u(t)$ .
4. Конденсатор ємністю 1 мкФ увімкнений в коло змінного струму із частотою 50 Гц. Визначте силу струму на ділянці кола з конденсатором, якщо опір підвідних проводів цієї ділянки становить 5 Ом, а напруга на ділянці — 12 В.
5. На рисунку наведено графік залежності напруги в мережі від часу. За який час закипить вода в чайнику, що містить 1,5 л води, якщо опір нагрівального елемента чайника 20 Ом, ККД чайника 72 %, початкова температура води 20 °C, питома теплоємність води 4200 Дж/кг·°C?
6. Як відомо, конденсатор являє собою два провідники, розділені шаром діелектрика. Саме тому конденсатор, увімкнений у коло постійного струму, фактично розриває коло і струму в колі немає. Дізнайтесь, чому ж тоді ми розглядаємо змінний струм у колі з конденсатором.



## § 21. ПЕРЕДАЧА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ. ТРАНСФОРМАТОР



Трансформаторна підстанція

Однією з основних переваг електричної енергії є те, що її можна передавати на великі відстані, наприклад, за допомогою проводів. Але під час передавання енергії неминучі її втрати, зокрема на нагрівання. Згідно із законом Джоуля — Ленца кількість теплоти, що виділяється в провідниках, дорівнює:  $Q = I^2 R t$ . Отже, зменшити втрати енергії на нагрівання можна: 1) зменшивши опір проводів; 2) зменшивши силу струму. Розглянемо, як ці можливості реалізують на практиці.

### 1 Чому напругу необхідно змінювати

Активний опір проводу визначається матеріалом, з якого він виготовлений, його довжиною та площею поперечного перерізу:  $R = \frac{\rho l}{S}$ . Отже, для зменшення опору проводу слід зменшити питомий опір  $\rho$  матеріалу, з якого він виготовлений, або збільшити площину  $S$  поперечного перерізу проводу.

Збільшення площини поперечного перерізу призводить до значного збільшення маси проводів, додаткових витрат матеріалу на виготовлення проводів, опор ліній електропередачі тощо. Можна зменшити питомий опір, замінивши сталевий провід алюмінієвим, що й роблять у разі передавання електроенергії на великі відстані. Але це не розв'язує проблеми повністю: по-перше, порівняно зі сталлю алюміній досить дорогого коштує; по-друге, передавання значної потужності ( $P = UI$ ) за відносно невеликої напрузі потребує досить великої сили струму, тому навіть за невеликого опору втрати енергії чимали.

Якщо ту саму потужність передавати за великої напруги (відповідно за малої сили струму), то втрати енергії значно зменшуються. Наприклад, збільшення напруги в 10 разів приведе до зменшення в 10 разів і сили струму, отже, кількість теплоти, що виділиться в проводах під час передавання, зменшиться в 100 разів. Саме тому *перед тим, як передати енергію на великі відстані, потрібно підвищити напругу*. І навпаки: *після того як енергія дійшла до споживача, напругу потрібно знизити*. Така зміна напруги здійснюється за допомогою трансформаторів.

### 2 Як побудований трансформатор і яким є принцип його дії

**Трансформатор** (від латин. *transformo* — перетворюю) — електромагнітний пристрій, що перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти.

Найпростіший трансформатор складається із замкненого осердя (магнітопроводу) і двох *обмоток* (рис. 21.1). Осердя виготовлено з тонких пластин трансформаторної сталі, обмотки — з ізольованого мідного дроту. До однієї з обмоток, яка називається *первинною* і має  $N_1$  витків дроту, подається напруга від джерела змінного струму. До другої обмотки — *вторинної*, яка має  $N_2$  витків дроту, — підключають споживачі електричної енергії.

Дія трансформатора ґрунтуються на явищі електромагнітної індукції. Якщо первинну обмотку трансформатора підключено до джерела змінного струму, то струм, який іде в її витках, утворює в замкненому осерді змінний магнітний потік  $\Phi$ . Пронизуючи витки первинної та вторинної обмоток, змінний магнітний потік створює ЕРС самоіндукції  $e_1$  в первинній обмотці та ЕРС індукції  $e_2$  у вторинній обмотці.

Згідно із законом електромагнітної індукції ЕРС індукції  $e$ , індукована в кожному витку первинної та вторинної обмоток трансформатора, дорівнює:

$$e = -\Phi'(t).$$

Первинна обмотка має  $N_1$  витків дроту, вторинна —  $N_2$  витків, отже,  $e_1 = -N_1 \Phi'(t)$  і  $e_2 = -N_2 \Phi'(t)$  відповідно. Оскільки ЕРС створюється тим самим магнітним потоком, то різниця фаз між ЕРС індукції первинної та вторинної обмоток дорівнює нулю. Тому в будь-який момент часу

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2},$$

де  $e_1$  і  $e_2$  — миттєві значення ЕРС, а  $\mathcal{E}_1$  і  $\mathcal{E}_2$  — діючі значення ЕРС в первинній і вторинній обмотках відповідно. З іншого боку:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \Phi'(t)}{-N_2 \Phi'(t)} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Таким чином, *відношення діючих значень ЕРС, індукованих у первинній і вторинній обмотках трансформатора, дорівнює відношенню кількості витків в обмотках:*

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Величину  $k$  називають **коєфіцієнтом трансформації**.

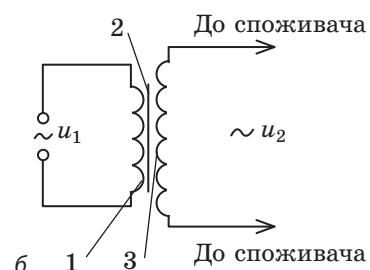
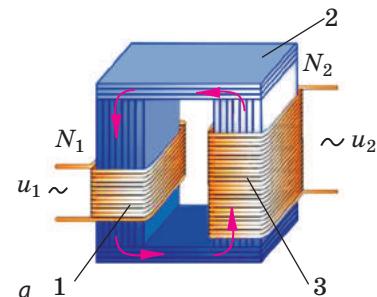
Трансформатор називають **знижувальним**, якщо коєфіцієнт трансформації більший за одиницю ( $k > 1$ ). У знижувальних трансформаторах вторинна обмотка містить менше витків дроту, ніж первинна.

Трансформатор називають **підвищувальним**, якщо коєфіцієнт трансформації менший за одиницю ( $k < 1$ ). У підвищувальних трансформаторах вторинна обмотка містить більше витків дроту, ніж первинна.

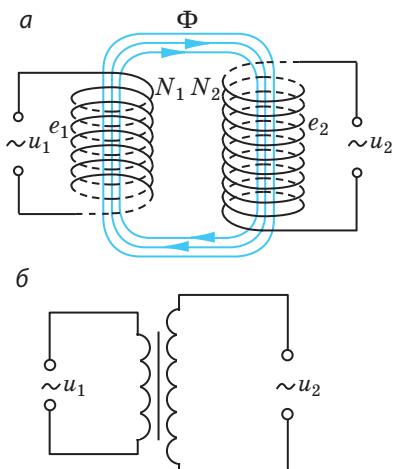
### 3

### Холостий хід роботи трансформатора

Розглянемо, як працює трансформатор, вторинну обмотку якого розімкнено, тобто трансформатор не навантажений (рис. 21.2). Роботу ненавантаженого трансформатора називають **холостим ходом**.



**Рис. 21.1.** Будова (а) та електрична схема (б) найпростішого (однофазного) трансформатора:  
1 — первинна обмотка;  
2 — осердя;  
3 — вторинна обмотка



**Рис. 21.2.** Холостий хід роботи трансформатора: а — схема установки; б — електрична схема

Первинна обмотка трансформатора підключена до джерела змінного струму, напруга на виході якого  $u_1$ . Під час проходження струму в обмотці виникає ЕРС самоіндукції  $e_1$ . Падіння напруги на первинній обмотці дорівнює:  $i_1 r_1 = u_1 + e_1$ , де  $r_1$  — опір обмотки, який будемо вважати нехтовно малим. Отже, в будь-який момент часу  $u_1 \approx -e_1$ , тому для діючих значень напруги та ЕРС маємо рівність:  $U_1 \approx \mathcal{E}_1$ .

У вторинній обмотці струм не йде (вона розімкнена), тому напруга на кінцях вторинної обмотки за модулем дорівнює ЕРС індукції ( $u_2 + e_2 = 0$ ,  $u_2 = -e_2$ , відповідно  $U_2 = \mathcal{E}_2$ ).

Таким чином, у режимі холостого ходу справджується рівність:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Якщо кількість витків у первинній обмотці більша, ніж у вторинній ( $k > 1$ ), то трансформатор понижує напругу ( $U_1 > U_2$ ). І навпаки: якщо кількість витків у первинній обмотці менша, ніж у вторинній ( $k < 1$ ), то трансформатор підвищує напругу ( $U_1 < U_2$ ). Добираючи співвідношення між кількістю витків у первинній і вторинній обмотках, можна в потрібну кількість разів підвищувати або понижувати напругу.

**Зверніть увагу:**

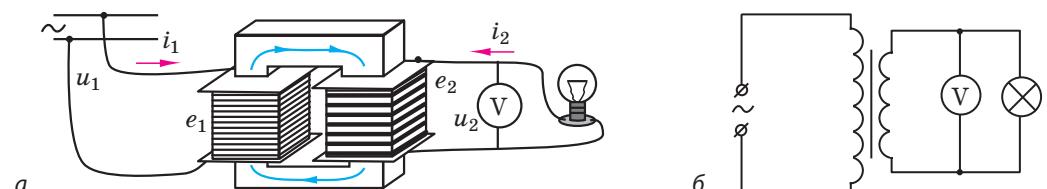
1) трансформатор не може здійснити перетворення напруги постійного струму, оскільки в цьому випадку магнітний потік не змінюється й ЕРС індукції не виникає;

2) трансформатор не можна підключати до джерела постійного струму: опір первинної обмотки є малим, тому сила струму в ній зросте настільки, що трансформатор нагріється й вийде з ладу.

#### 4

#### Як працює навантажений трансформатор

Якщо вторинну обмотку трансформатора замкнути на навантаження, то в ній виникне електричний струм (рис. 21.3). Цей струм спричинить зменшення магнітного потоку в осереді і, як наслідок, зменшення ЕРС самоіндукції в первинній обмотці. У результаті сила струму в первинній



**Рис. 21.3.** Робота навантаженого трансформатора: а — схема установки; б — електрична схема

обмотці збільшиться і магнітний потік зросте до попереднього значення. Чим більшими є сила струму у вторинній обмотці й потужність, яка віддається споживачеві, тим більшими є струм у первинній обмотці й потужність, яка споживається від джерела.

Під час роботи навантаженого трансформатора для діючих значень напруги і сили струму справджується приблизна рівність:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Це означає, що в підвищувальному трансформаторі сила струму більша в первинній обмотці ( $U_1 < U_2 \Rightarrow I_1 > I_2$ ), а в понижувальному трансформаторі сила струму більша у вторинній обмотці ( $U_1 > U_2 \Rightarrow I_2 > I_1$ ). Якщо трансформатор *ідеальний* (втрати енергії дорівнюють нулю), то у скільки разів він збільшує напругу, у стільки ж разів він зменшує силу струму, і навпаки.

## 5 Як підвищити ККД трансформатора

У трансформаторі, як і в будь-якому іншому технічному пристрой, існують певні втрати енергії.

Відношення потужності  $P_2$ , яку трансформатор віддає споживачеві електричної енергії, до потужності  $P_1$ , яку трансформатор споживає з електричної мережі, називають **коєфіцієнтом корисної дії трансформатора**:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

Основні втрати енергії в трансформаторі є технічні прийоми, які застосовують для зменшення цих втрат, наведено в таблиці.

Втрати енергії в трансформаторі	Способи зменшення втрат енергії
Виділення теплоти внаслідок проходження електричного струму в обмотках.	Обмотки трансформатора виготовляють із високоякісної міді з досить великою площею поперечного перерізу. Зі збільшенням сили струму збільшується кількість теплоти, що виділяється в обмотках, тому обмотки нижчої напруги виготовляють із дроту більшого діаметра.
Виділення теплоти внаслідок виникнення струмів Фуко в осерді, яке весь час роботи трансформатора перебуває у змінному магнітному полі.	Осердя виготовляють із набірних пластин або із феритів, тим самим збільшуючи опір осердя і зменшуючи силу струмів Фуко.
Випромінювання енергії у вигляді електромагнітних хвиль.	Осердя виготовляють замкненим і такої форми, яка не сприяє випромінюванню електромагнітних хвиль.
Втрати енергії на перемагнічування осердя.	Осердя виготовляють із трансформаторної сталі, яка легко перемагнічується.

Завдяки своїй конструкції деякі трансформатори мають ККД понад 99 %.

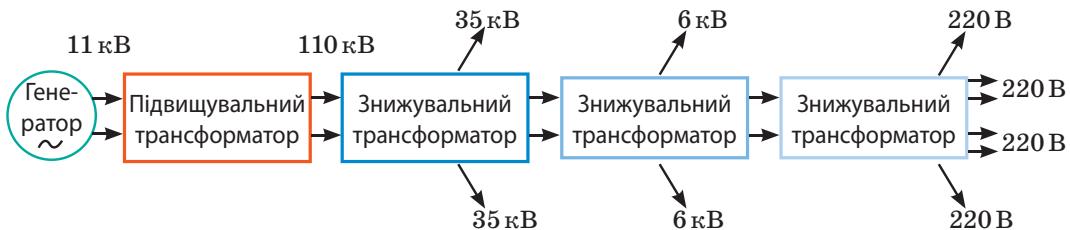


Рис. 21.4. Схема передачі та розподілу енергії в електричній мережі

### 6 Застосування трансформаторів

Підвищувальні трансформатори розташовують поблизу генераторів змінного струму, встановлених на електростанціях. Це дозволяє передавати електроенергію на великі відстані за високих напруг (понад 500 кВ), завдяки чому втрати енергії в проводах значно зменшуються.

У місцях споживання електроенергії встановлюють знижувальні трансформатори, в яких висока напруга, що подається від високовольтних ліній електропередачі, знижується до порівняно невеликих значень, за яких працюють споживачі електричної енергії (рис. 21.4).

Окрім систем передачі та розподілу електроенергії трансформатори застосовують у випрямних пристроях, у лабораторіях, для живлення радіоапаратури, приєднання електровимірювальних приладів до кіл високої напруги, електрозварювання тощо.

### 7 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Первинна обмотка трансформатора, яка містить 1500 витків дроту, підключена до кола змінного струму напругою 220 В. Визначте кількість витків у вторинній обмотці трансформатора, якщо вона має живити коло напругою 6,3 В за сили струму 1,5 А. Навантаження активне, опір вторинної обмотки — 0,20 Ом. Опором первинної обмотки знехтуйте.

Дано:	Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.
$N_1 = 1500$	За будь-якого режиму роботи трансформатора $\frac{N_1}{N_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$ (1).
$U_1 = 220$ В	Оскільки опір первинної обмотки є нехтовою величиною, то $U_1 = \mathcal{E}_1$ (2).
$U_2 = 6,3$ В	Коло вторинної обмотки є замкненим, джерелом електричної енергії в ньому є вторинна обмотка з активним опором $r_2$ , тому згідно із
$I_2 = 1,5$ А	законом Ома $I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R + r_2}$ .
$r_2 = 0,20$ Ом	Звідси $\mathcal{E}_2 = I_2(R + r_2) = I_2R + I_2r_2 = U_2 + I_2r_2$ (3).
$N_2 = ?$	Підставивши (2) і (3) у формулу (1), маємо: $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2r_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \frac{U_2 + I_2r_2}{U_1}$ .
	Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:
	$[N_2] = \frac{\text{В} + \text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{В}} = \frac{\text{В} + \text{А} \cdot \text{В} / \text{А}}{\text{В}} = 1 ; N_2 = \frac{1500(6,3 + 1,5 \cdot 0,20)}{220} = 45$ .
	<b>Аналіз результатів.</b> Трансформатор знижувальний ( $U_1 > U_2$ ), тобто вторинна обмотка має містити менше витків, ніж первинна. Отже, результат є реальним.
	<b>Відповідь:</b> $N_2 = 45$ .



### Підбиваємо підсумки

• Трансформатор — електромагнітний пристрій, що перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти. Він складається зі сталевого замкненого осердя та двох розташованих на ньому обмоток.

• У будь-якому режимі роботи трансформатора відношення діючих значень ЕРС, індукованих у первинній і вторинній обмотках, дорівнює відношенню

кількості витків в обмотках:  $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ , де  $k$  — коефіцієнт трансформації. Якщо  $k > 1$ , то трансформатор знижувальний; якщо  $k < 1$  — підвищувальний.

• У режимі холостого ходу виконується рівність:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ .

• ККД трансформатора визначається співвідношенням:  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$ .

Якщо трансформатор ідеальний, то  $P_1 = P_2$  ( $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ), або  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ , тобто у скільки разів трансформатор підвищує напругу, у стільки ж разів він зменшує силу струму.



### Контрольні запитання

1. У чому перевага електричної енергії порівняно з іншими видами енергії?
2. Які основні способи зменшення втрат енергії під час її передачі? 3. Що таке трансформатор? Яка його будова? На якому явищі ґрунтуються його дія? 4. Описіть фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі в режимі холостого ходу; в режимі навантаження. 5. Як визначити коефіцієнт трансформації?
6. Який трансформатор називають знижувальним? підвищувальним? Де застосовують такі трансформатори? 7. Чому трансформатори не можна під'єднувати до джерел постійного струму? 8. Які основні втрати енергії під час роботи трансформатора? Як їх зменшити? 9. Як визначити ККД трансформатора?



### Вправа № 21

1. На рис. 21.3 зображено лампу, приєднану через трансформатор до мережі змінного струму. Який це трансформатор — підвищувальний чи знижувальний? Чому вторинна обмотка виготовлена з товщого дроту, ніж первинна?
2. Первина обмотка трансформатора містить 1000 витків дроту, вторинна — 3500. У режимі холостого ходу напруга на вторинній обмотці — 105 В. Яка напруга подається на трансформатор? Яким є коефіцієнт трансформації?
3. Потужність, яку споживає трансформатор, становить 90 Вт, напруга на вторинній обмотці — 12 В. Визначте силу струму у вторинній обмотці, якщо ККД трансформатора 75 %.
4. Трансформатор із коефіцієнтом трансформації 5 приєднаний до мережі змінного струму напругою 220 В. Визначте опір вторинної обмотки трансформатора, якщо напруга на ній дорівнює 42 В, а сила струму — 4,0 А. Опором первинної обмотки знехтуйте.
5. Чому трансформатор гудить? Якою є основна частота звукових коливань, якщо трансформатор підключений до промислової мережі?

## § 22. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ. ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ДОСЛІДИ Г. ГЕРЦА



Зараз нікого не дивує той факт, що навколошній простір пронизаний електромагнітними хвилями. Ці хвилі пов'язані не лише з мобільним зв'язком, телебаченням і радіомовленням. Електромагнітні хвилі випромінюють і різноманітні космічні об'єкти (зорі, туманності, планети тощо), і будь-яке макротіло, зокрема людина. Деякі з цих хвиль виникли мить тому, а деякі існують від початку існування Всесвіту. Згадаємо, хто передбачив існування електромагнітних хвиль і якими є властивості цих хвиль.



**Рис. 22.1.** Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) — британський фізик і математик. Створив теорію електромагнітного поля, передбачив існування електромагнітних хвиль, установив електромагнітну природу світла



**Рис. 22.2.** Генріх Рудольф Герц (1857–1894) — німецький фізик. Експериментально довів існування електромагнітних хвиль, дослідив їхні властивості

### 1

#### Як утворюється електромагнітна хвиля

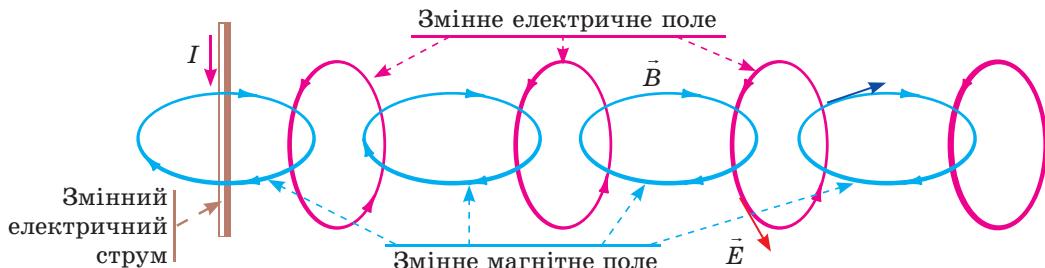
**Електромагнітна хвиля** — це поширення в просторі коливань електромагнітного поля.

Електромагнітні хвилі теоретично передбачив Дж. Максвелл (рис. 22.1) у 1873 р. Проаналізувавши всі відомі на той час закони електродинаміки, він сухо математично дійшов висновку, що в природі мають існувати електромагнітні хвилі. На жаль, Максвелл не дожив до експериментального підтвердження своїх розрахунків. Тільки через 9 років після його смерті німецький фізик Г. Герц (рис. 22.2) продемонстрував випромінювання і прийом електромагнітних хвиль.

Згадаємо, як утворюється та поширюється електромагнітна хвиля.

Візьмемо провідник, у якому тече змінний струм. Біля будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле. Магнітне поле, створене змінним струмом, теж є змінним. Згідно з теорією Максвелла, змінне магнітне поле має створити електричне поле, яке теж буде змінним; змінне електричне поле створить змінне магнітне, і т. д. Отже, одержимо *поширення коливань електромагнітного поля — електромагнітну хвилю* (рис. 22.3). Частота у цієї хвилі дорівнює частоті, з якою змінюється сила струму в провіднику, а провідник зі змінним струмом є джерелом електромагнітної хвилі.

За теорією Максвелла, джерелом електромагнітної хвилі може бути будь-яка заряджена частинка, що рухається з прискоренням. Якщо ж частинка нерухома або рухається з незмінною швидкістю, біля неї існує електромагнітне поле, проте електромагнітну хвилю частинка



**Рис. 22.3.** Схематичне зображення механізму поширення електромагнітної хвилі

не випромінює. Випромінюванням електромагнітних хвиль супроводжуються й деякі процеси, що відбуваються всередині молекул, атомів, ядер атомів (теорія таких процесів — *квантова теорія* — була створена у ХХ ст.).

Аналогічно тому як механічна хвиля може відірватися від свого джерела (згадайте поширення звукової хвилі та відлуння), електромагнітна хвиля теж може відірватися від свого джерела і почати самостійно «подорожувати» простором.

## 2 Які фізичні величини характеризують електромагнітну хвилю

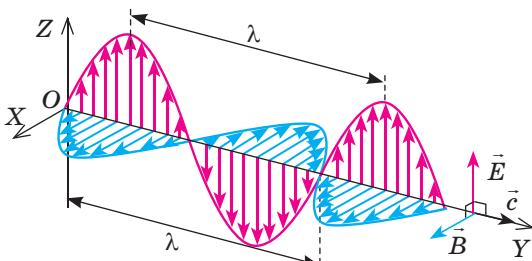
- Електромагнітна хвиля як процес поширення електромагнітного поля насамперед характеризується вектором напруженості  $\vec{E}$  і вектором магнітної індукції  $\vec{B}$ . *Будь-яка хвиля періодична і в часі, і в просторі*, тому зазначені величини періодично змінюються і з часом, і зі зміною відстані від джерела хвилі. За теорією Максвелла вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  одночасно сягають максимального значення й одночасно перетворюються на нуль, при цьому вони перпендикулярні як один до одного, так і до напрямку поширення хвилі (рис. 22.4). Отже, *електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля*:

$$\vec{E} \perp \vec{B}, \quad \vec{E} \perp \vec{v}, \quad \vec{B} \perp \vec{v}$$

*Зверніть увагу!* Те, що електромагнітна хвиля є поперечною, не означає, що в просторі існують якісь «горби» та западини. Уздовж напрямку поширення хвилі та в даній точці простору відбуваються лише плавні зміни напруженості та магнітної індукції електромагнітного поля.

- Електромагнітна хвиля, як і механічна, характеризується *частотою* ( $v$ ), *довжиною* ( $\lambda$ ) і *швидкістю поширення* ( $v$ ). Як і в випадку з механічними хвилями, зазначені величини пов’язані *формулою хвилі*:

$$v = \lambda v$$



**Рис. 22.4.** Періодичні зміни вектора напруженості  $\vec{E}$  електричного поля і вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  магнітного поля під час поширення електромагнітної хвилі в напрямку осі  $OY$

На відміну від механічних хвиль, для поширення електромагнітних хвиль не потрібне середовище. Навпаки: найкраще і найшвидше електромагнітні хвилі поширяються у вакуумі. Дж. Максвелл теоретично обчислив швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі та виявив, що отримане значення збігається зі значенням швидкості світла у вакуумі (воно вже було вимірюємо експериментально):  $v = c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Дж. Максвелл висунув сміливе для свого часу припущення: *світло є різновидом електромагнітних хвиль*. Учений не лише виявив природу світла, а й передбачив існування та властивості різних видів електромагнітних хвиль.

*У вакуумі — і тільки в ньому — всі електромагнітні хвилі поширяються з однаковою швидкістю (c), тому для вакууму довжина і частота електромагнітної хвилі пов'язані формулою:  $c = \lambda v$ .*

*Під час переходу з одного середовища в інше швидкість поширення електромагнітної хвилі змінюється, змінюється і довжина хвилі, а от її частота залишається незмінною.*

У повітрі швидкість поширення електромагнітних хвиль майже та сама, що й у вакуумі.



Згадайте, як називають явище, пов'язане зі зміною швидкості світла під час переходу з одного середовища в інше. А чи буде це явище спостерігатися для будь-якої електромагнітної хвилі?

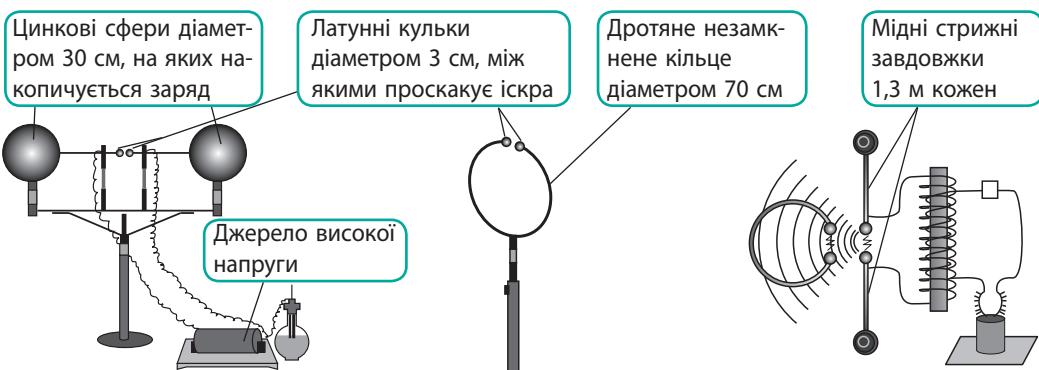
- Електромагнітні хвилі, як і механічні, переносять енергію. Енергія  $W$  електромагнітної хвилі прямо пропорційна її частоті  $v$  в четвертому степені:

$$W \sim v^4$$

### 3

### Як вивчали властивості електромагнітних хвиль

Першим електромагнітні хвилі отримав і дослідив Г. Герц у 1888 р. Він сконструював випромінювач, який згодом отримав назву *вібратор Герца* (рис. 22.5, а). Коли обидві латунні кульки заряджались до високої різниці



а — вібратор Герца

б — резонатор Герца

в — схема випромінювання і прийому електромагнітних хвиль

Рис. 22.5. Схема досліду Герца з одержання та реєстрації електромагнітних хвиль

потенціалів, між ними проскакувала іскра і в довкілля випромінювалась електромагнітна хвиля (у дослідах Г. Герца частота хвиль сягала 500 МГц).

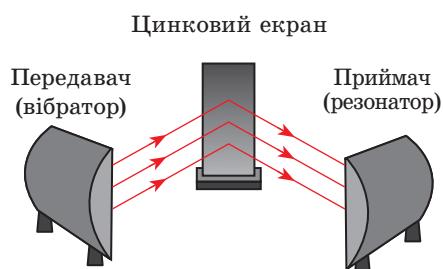
Щоб уловлювати випромінювані хвилі, Г. Герц зробив *резонатор* (рис. 22.5, б). Змінюючи розмір іскрового проміжку між кульками резонатора, вчений настроював його на частоту коливань вібратора. Під дією змінного електричного поля електромагнітної хвилі, створеної вібратором, у резонаторі виникали коливання струму. Під час резонансу напруга на кульках резонатора різко зростала, тому в ті моменти, коли між кульками вібратора відбувався розряд, в іскровому проміжку резонатора теж проскакували ледь помітні іскорки (рис. 22.5, в), які можна було побачити тільки в лупу і тільки в темряві.

Герц не тільки одержав електромагнітні хвилі, а й експериментально підтвердив їхні властивості, передбачені свого часу Дж. Максвеллом.

### Властивості електромагнітних хвиль і досліди Г. Герца з вивчення цих властивостей

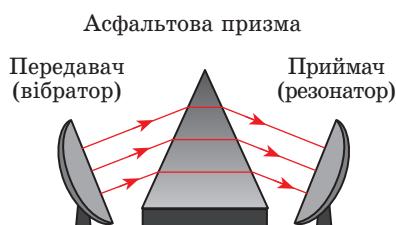
*Електромагнітні хвилі відбиваються від провідних предметів.*

На стіні лабораторії Г. Герц закріпив цинковий екран розміром  $4 \times 2$  м. За допомогою вібратора і параболічного дзеркала, виготовленого з ліста заліза розміром  $2 \times 1,5$  м, створив пучок електромагнітних хвиль і спрямував їх під кутом до екрана. Виявилось, що кут відбивання електромагнітної хвилі дорівнює куту її падіння.



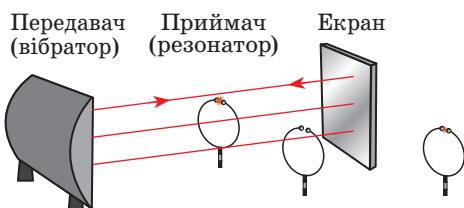
*Електромагнітні хвилі заломлюються на межі з діелектриком.*

Для вивчення заломлення електромагнітних хвиль Г. Герц виготовив асфальтову призму заввишки 1,5 м і масою 1200 кг. Помістивши призму між вібратором і резонатором, учений помітив, що іскра в резонаторі зникла. Іскроутворення відновлювалося, коли резонатор переміщували до основи призми.



*Електромагнітні хвилі обгинають перешкоди, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі (явище дифракції); накладаючись, електромагнітні хвилі можуть як посилювати, так і послаблювати одну одну (явище інтерференції).*

Для спостереження цих явищ Г. Герц переміщував резонатор відносно вібратора і екрана та спостерігав посилення, послаблення або зникнення іскри в резонаторі.



Підсумовуючи свої досліди, Г. Герц писав: «...описані досліди доводять ідентичність світла, теплових променів і електродинамічного хвильового руху».



### Підбиваємо підсумки

- Поширення в просторі коливань електромагнітного поля називають електромагнітною хвилею.
- Електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля: вектор напруженості  $\vec{E}$  електричної складової і вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  магнітної складової електромагнітного поля завжди перпендикулярні один до одного і до напрямку поширення хвилі; вони одночасно досягають максимального значення й одночасно перетворюються на нуль.
- Швидкість поширення електромагнітної хвилі, її довжина і частота пов'язані формулою хвилі:  $v = \lambda\nu$ . Найкраще є найшвидше електромагнітні хвилі поширюються у вакуумі. Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі є однаковою для будь-яких електромагнітних хвиль і дорівнює швидкості світла:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Для вакууму формула хвилі має вигляд:  $c = \lambda\nu$ .
- Досліди Герца показали, що електромагнітні хвилі відбиваються від провідників, заломлюються на межі з діелектриками, можуть обгинати перешкоди (дифракція) і накладатися одна на одну (інтерференція). При цьому відбивання, заломлення, інтерференція і дифракція електромагнітних хвиль відбуваються за законами, що справдіжуються для світла.

### Контрольні запитання



- Дайте означення електромагнітної хвилі. **2.** Як утворюється електромагнітна хвиля? Які об'єкти можуть її випромінювати? **3.** Доведіть, що електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля. **4.** Як пов'язані між собою довжина, частота і швидкість поширення електромагнітної хвилі? **5.** Як енергія електромагнітної хвилі залежить від її частоти? **6.** Опишіть будову пристрой, за допомогою яких Г. Герц створював і реєстрував електромагнітні хвилі. **7.** Які властивості електромагнітних хвиль було встановлено в ході дослідів Г. Герца? Опишіть ці досліди.

### Вправа № 22



- У яких випадках рухома заряджена частинка випромінює електромагнітну хвилю?
  - Частинка рухається рівномірно прямолінійно.
  - Частинка різко гальмує, зіткнувшись із перешкодою.
  - Частинка рухається рівномірно по колу в магнітному полі.
  - Частинка набирає швидкості під дією електричного поля.
- Заповніть таблицю, вважаючи, що хвилі поширюються у вакуумі.

Джерело хвилі	Довжина хвилі	Частота хвилі	Швидкість хвилі
Лінія електропередачі		50 Гц	
Великий Вибух (реліктове випромінювання)	1,9 мм		
Ультрафіолетова лампа бактерицидної установки	264 нм		

- Під час переходу електромагнітної хвилі з вакуума в середовище довжина хвилі зменшилась у 3 рази. У скільки разів і як змінилась швидкість поширення хвилі?

- 4.** Скориставшись рис. 22.2, зазначте на рис. 1 напрямки векторів  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  і  $\vec{v}$  електромагнітної хвилі, яких бракує. *Підказка:* спрямуйте великий палець правої руки за напрямком поширення хвилі (напрямком вектора  $\vec{v}$ ), тоді чотири зігнуті пальці вкажуть напрямок від вектора  $\vec{E}$  до вектора  $\vec{B}$ .

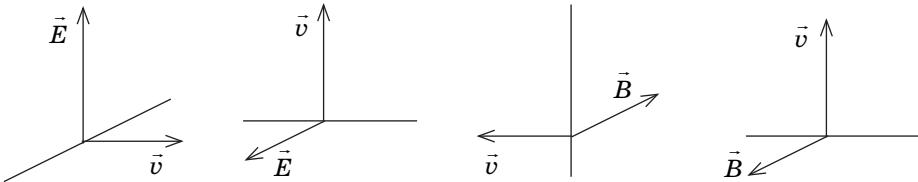


Рис. 1

- 5.** Сигнал радіолокатора повернувся від об'єкта через 30 мкс після відправлення. На якій відстані від радіолокаційної установки розташований об'єкт?
- 6.** Скільки коливань відбудеться в електромагнітній хвилі довжиною 20 мм за час, що дорівнює періоду звукових коливань частотою 100 Гц? Вважайте, що електромагнітна хвіля поширюється у вакуумі.
- 7.** Коли над будинком пролітає літак, на екранах телевізорів інколи виникає подвійне зображення. Чому?
- 8.** Під час яких природних явищ випромінюються електромагнітні хвилі? Обґрунтуйте свою відповідь.
- 9.** Відбиває чи заломлює електромагнітні хвилі поверхня Землі? Обґрунтуйте свою відповідь. Які факти доводять вашу думку?
- 10.** Дізнайтесь, чому провідні тіла відбивають і поглинають електромагнітні хвилі.
- 11.** Зараз астрономи у своїх спостереженнях дедалі ширше використовують *радіотелескопи* – астрономічні інструменти для прийому і дослідження електромагнітних хвиль радіодіапазону (рис. 2). Якщо оптичні телескопи уловлюють видиме світло, ультрафіолетове й інфрачервоне випромінювання, то радіотелескопи приймають і записують невидимі оком радіохвилі, які випромінюють планети, зорі, туманності тощо. Найбільший у світі радіотелескоп — УТР-2, розташований на Харківщині (рис. 3). Він працює в декаметровому діапазоні, і за його допомогою українські астрономи «слухають» шум Всесвіту. Дізнайтесь, які відкриття в астрономії відбулися саме завдяки радіотелескопам.



Рис. 2



Рис. 3

## ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО



### Будівельник розумних будинків

На Енциклопедичній сторінці наприкінці розділу II ви можете прочитати про звичайне житло майбутнього — розумний дім. Будувати такі оселі будуть фахівці, які мають глибокі знання термо- та електродинаміки, програмування, електроніки. Елементи цього будинку друкуватимуть на 3D-принтерах, оператори яких — це фахівці в програмуванні. Тож будівельник розумних будинків — це, безумовно, професія майбутнього.



## § 23. ПРИНЦИПИ РАДІОТЕЛЕФОННОГО ЗВ'ЯЗКУ. РАДІОМОВЛЕННЯ І ТЕЛЕБАЧЕННЯ

Відкриття Г. Герцом електромагнітних хвиль стало стартом для створення засобів безпротивного зв'язку. Видатний англійський фізик Вільям Крукс (1832–1919) у статті про досліди Герца писав: «Тут розкривається дивовижна можливість телеграфувати без проводів, телеграфних стовпів, кабелів і всіляких інших дорогих сучасних пристройів». А як було реалізовано цю можливість?

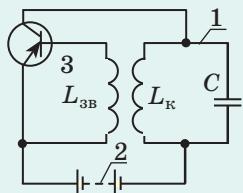
### Генератор незгасаючих електромагнітних коливань

Джерелами радіохвиль можуть бути тільки високочастотні електромагнітні коливання. Такі коливання виникають у коливальному контурі, проте вони швидко згасають, і тому до контуру слід постачати енергію.

*Автоколивальну систему, в якій енергія від джерела постійного струму періодично постачається в коливальний контур, називають генератором електромагнітних коливань.*

Як і в будь-якій автоколивальній системі, в такому генераторі є три характерні елементи (див. рисунок):

- 1 — коливальна система, де відбуваються вільні коливання, — коливальний контур;
- 2 — джерело енергії — джерело постійного струму;
- 3 — пристрій зворотного зв'язку — транзистор і котушка зв'язку  $L_{\text{зв}}$ , які «керують» постачанням енергії.



Коли в котушці  $L_{\text{к}}$  контуру тече змінний струм, він створює змінне магнітне поле, яке, у свою чергу, створює вихове електричне поле, що спричиняє появу індукційного струму в котушці  $L_{\text{зв}}$ . У результаті транзистор періодично, «у такт» з електромагнітними коливаннями в контурі, замикає коло (у цей час конденсатор отримує енергію від джерела).

### 1 Які завдання слід вирішити, щоб здійснити радіозв'язок

Радіо (латин. *radio* — випромінюю) — це спосіб безпровідної передачі та прийому інформації за допомогою електромагнітних хвиль.

Щоб здійснити передачу і прийом електромагнітних хвиль, які несуть звукову та оптичну інформацію, потрібно виконати низку завдань, а саме:

- створити високочастотні електромагнітні коливання;
- накласти на високочастотні коливання звукову і (або) оптичну інформацію;
- забезпечити випромінювання електромагнітних хвиль;
- забезпечити прийом електромагнітних хвиль;
- зняти з прийнятого високочастотного сигналу звукову і (або) оптичну інформацію та відтворити її.

З'ясуємо, як ці завдання було виконано.

### 2 Для чого потрібна антена

Радіохвилі передаються на великі відстані, тому повинні мати велику енергію. Як вам відомо, *достіль велику енергію мають тільки високочастотні електромагнітні коливання:  $W \sim v^4$ .*

Незгасаючі високочастотні коливання виникають у коливальному контурі *генератора електромагнітних коливань*. Проте звичайний (закритий) коливальний

контур практично не випромінює електромагнітних хвиль, адже електричне поле майже повністю зосереджене між обкладками конденсатора, а магнітне поле — всередині котушки. Щоб коливальний контур випромінював електромагнітні хвилі, потрібно перейти від закритого коливального контуру до відкритого. Цього можна досягти, наприклад, розсуваючи пластини конденсатора (рис. 23.1).

Замінивши верхню обкладку конденсатора проводом, розташованим якнайвище над поверхнею землі, і заземливши нижню обкладку, одержимо **антену** — пристрій для прийому і передачі електромагнітних хвиль (рис. 23.1, г). Для передачі сигналів антену пов'язують із коливальним контуром генератора електромагнітних коливань (рис. 23.2).

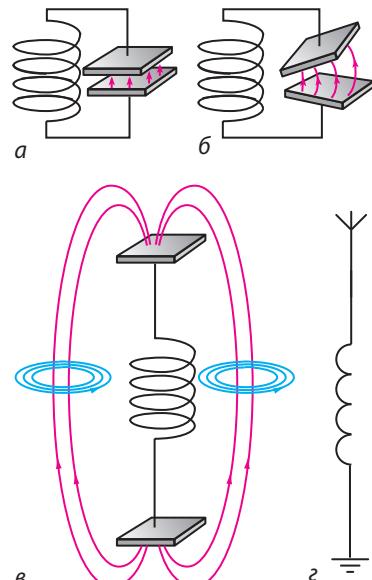
Електромагнітні коливання, збуджені в антені, створюють електромагнітні хвилі, які поширяються в різних напрямках. Якщо на шляху електромагнітної хвилі буде провідник, то хвіля збудить у провіднику змінний електричний струм, частота якого дорівнюватиме частоті хвилі. *Пристрої, в яких під дією електромагнітних хвиль збуджуються струми високої частоти, називають пристроями збудженням.*

### 3

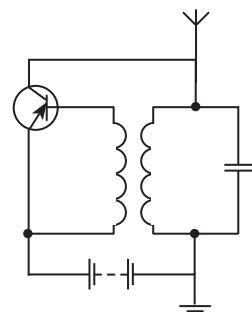
### Із якою метою і як здійснюється модуляція

Ми «одержали» високочастотні електромагнітні хвилі і навіть можемо передати інформацію, наприклад, кодом Морзе (рис. 23.3), перериваючи струм в генераторі за допомогою телеграфного ключа. Саме такими були перші телеграми, надіслані безпровідним телеграфом. Однак радіо — передусім мовлення і музика.

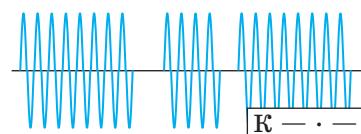
Здавалося б, усе не так складно: достатньо за допомогою мікрофона перевести звукові коливання в коливання електричного струму, який і створить відповідну електромагнітну хвиллю. На жаль, передати такі хвилі неможливо щонайменше з двох причин: 1) вони низькочастотні і, відповідно, мають малу енергію; 2) їхня частота безперервно змінюється (від 20 Гц до 16 000 Гц), тому немає можливості використати для їх прийому резонанс.



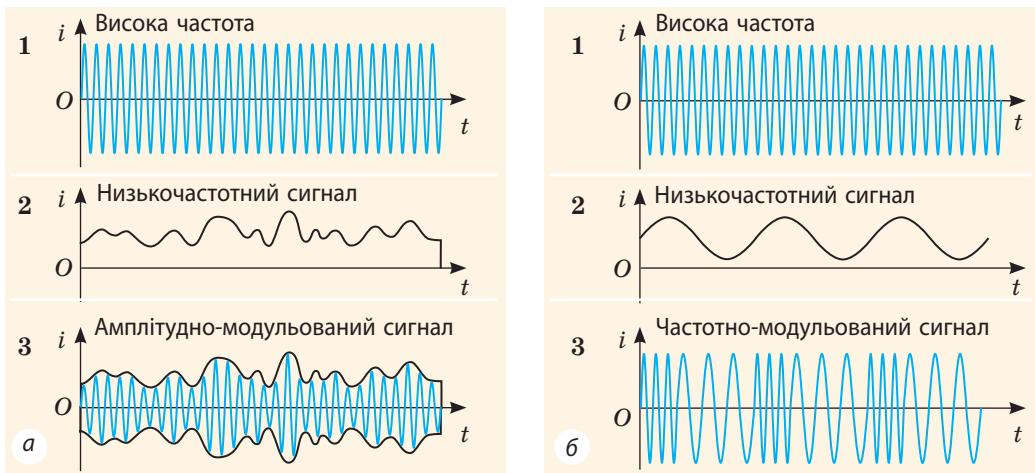
**Рис. 23.1.** Перехід від закритого коливального контуру (а, б) до відкритого (в; антена) (г)



**Рис. 23.2.** Електрична схема найпростішого радіопередавача — пристрою для створення і передачі електромагнітних хвиль



**Рис. 23.3.** Радіотелеграфний сигнал є низкою коротковчасних і більш тривалих імпульсів електромагнітних хвиль

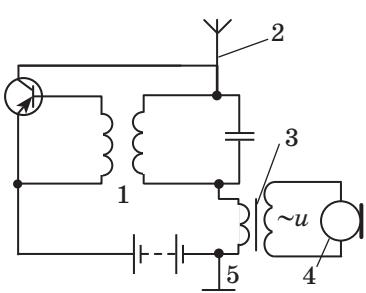


**Рис. 23.4.** Отримання амплітудно-модульованого (а) і частотно-модульованого (б) сигналів: 1 — графік електромагнітних коливань високої частоти — частоти-носія; 2 — графік електромагнітних коливань низької (звукової) частоти — модулюючої частоти; 3 — графік модульованих електромагнітних коливань

Тож як створити електромагнітну хвилю, яка була б високочастотною (а отже, і високогенеретичною) і водночас несла б звукову інформацію? Проблему було розв’язано за допомогою модуляції.

**Модуляція** — це процес зміни параметрів високочастотних електромагнітних коливань (амплітуди, частоти, початкової фази) із частотами набагато меншими, ніж частота самої хвилі.

Хвилю зі зміненими параметрами називають *модульованою*. Частоту вихідної (немодульованої) високочастотної хвилі називають *частотою носієм*, частоту зміни параметрів — *частотою модуляції*.



**Рис. 23.5.** Електрична схема найпростішого радіопередавача з пристроєм для амплітудної модуляції: 1 — генератор незгасаючих електромагнітних коливань високої частоти; 2 — передавальна антена; 3 — звуковий трансформатор; 4 — мікрофон; 5 — заземлення

Якщо в процесі модуляції змінюється амплітуда високочастотних коливань, то одержимо *амплітудно-модульований сигнал* (рис. 23.4, а), якщо змінюється частота — *частотно-модульований сигнал* (рис. 23.4, б).

Найпростіше одержати амплітудно-модульований сигнал. Для цього до кола генератора високої частоти підключають джерело змінної напруги низької частоти, наприклад вторинну обмотку трансформатора, первинна обмотка якого пов’язана з мікрофоном (рис. 23.5). Під дією низькочастотної напруги, яка змінюється зі звуковою частотою, змінюється енергія, що подається від джерела до коливального контуру генератора. Відповідно із частотою звуку змінюється й амплітуда сили струму в генераторі, а отже, і амплітуда вихідного сигналу.

**Зверніть увагу:** для якісної передачі інформації частота-носій має бути в багато разів вищою за частоту модуляції.

#### 4 Як прийняти і розшифрувати сигнал

Електромагнітні хвилі, досягши приймальної антени, збуджують у ній коливання тієї самої частоти, що й частота хвиль. Але в антену надходять коливання від різних радіостанцій, і кожна радіостанція працює на своїй частоті. Щоб із безлічі коливань виділити коливання потрібної частоти, використовують *електричний резонанс*. Для цього індуктивно з антеною пов'язують коливальний контур (рис. 23.6). Змінюючи ємність конденсатора (настроюючи радіоприймач), змінюють власну частоту  $v_0$  коливань контуру:

$$v_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Коли власна частота коливань коливального контуру збігається із частотою електромагнітної хвилі, на яку настроєно радіоприймач, настає резонанс: амплітуда вимушених коливань сили струму в контурі різко збільшується.

Отже, з безлічі сигналів, що збуджують коливання в приймальній антенні, виділений один високочастотний модульований сигнал. Тепер слід цей сигнал *демодулювати* — *відділити сигнал звукової частоти від частоти-носія*.

*Демодулятор (детектор)* амплітудно-модульованого сигналу складається з напівпровідникового діода  $D$ , конденсатора  $C$  і резистора  $R$  (рис. 23.7). Діод пропускає струм тільки в одному напрямку, тому після проходження через діод струм буде пульсуючим (рис. 23.8, а, б). Пульсуючий струм прямує на систему «конденсатор — резистор». Завдяки періодичній зарядці та розрядці конденсатора (див. рис. 23.7) пульсації згладжуються і на виході маємо струм звукової частоти (рис. 23.8, в).

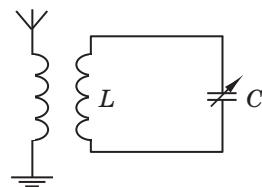


Рис. 23.6. Схема прийому та виділення радіосигналів потрібної частоти за допомогою електричного резонансу. Стрілка вказує на те, що ємність конденсатора можна змінювати

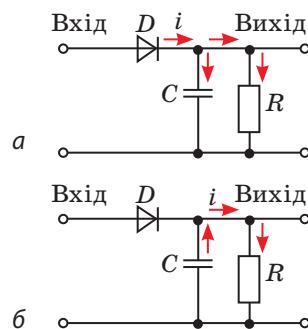


Рис. 23.7. Схема і принцип роботи демодулятора: а — коли діод пропускає струм, конденсатор заряджається; б — коли діод не пропускає струм, конденсатор розряджається через резистор

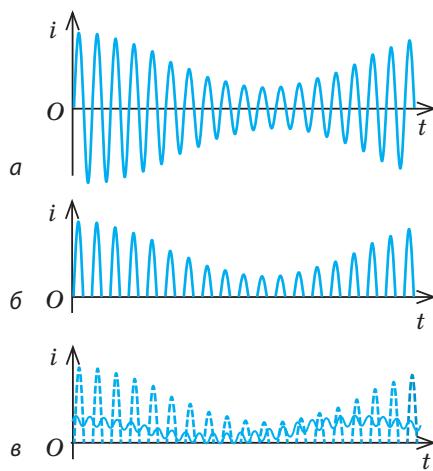
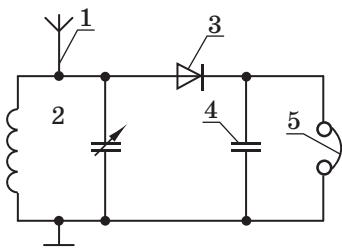


Рис. 23.8. Графік коливань сили струму: а — до детектора; б — після проходження діода; в — після проходження детектора



**Рис. 23.9.** Електрична схема найпростішого радіоприймача:  
1 — приймальна антена; 2 — коливальний контур; 3 — діод;  
4 — конденсатор; 5 — навушники

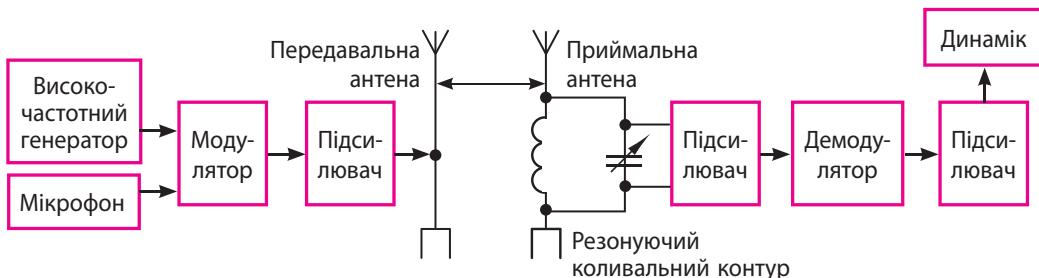
*Основні етапи створення, прийому і перетворення радіосигналу*

1. Генератор незгасаючих електромагнітних коливань створює високочастотні електромагнітні коливання, частота яких дорівнює власній частоті коливального контуру генератора:  $v_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$ .
2. Високочастотні коливання модулюються коливаннями звукової частоти.
3. Модульовані коливання підсилюються й подаються на передавальну антenu, яка випромінює електромагнітні хвилі.
4. Досягши приймальної антени, електромагнітні хвилі збуджують у ній високочастотні коливання.
5. Коливання, збуджені в приймальній антені, викликають високочастотні електромагнітні коливання в резонуючому коливальному контурі:  $v = v_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$ .
6. Слабкі високочастотні коливання підсилюються й подаються на демодулятор.
7. Демодулятор із модульованих коливань виділяє коливання низької звукової частоти.
8. Коливання низької частоти підсилюються і перетворюються на звук.

## 6

### Поняття про телебачення

Принципова схема одержання і перетворення телевізійного сигналу мало відрізняється від принципової схеми радіотелефонного зв'язку (див. рис. 23.10), проте має низку особливостей.



**Рис. 23.10.** Принципова схема радіотелефонного зв'язку



Розгляньте електричну схему найпростішого радіоприймача (рис. 23.9). Ще раз зверніть увагу на його складові. Яке призначення має кожна з них?

## 5

### Принципи радіотелефонного зв'язку

Найпростіший детекторний радіоприймач працює на енергії прийнятих електромагнітних хвиль. Зрозуміло, що цієї енергії недостатньо, щоб відтворити досить чіткий і голосний звуковий сигнал, тому в реальних радіоприймачах і радіопередавачах сигнал проходить через низку підсилень (рис. 23.10).

*Основні етапи створення, прийому і перетворення радіосигналу*

1. Генератор незгасаючих електромагнітних коливань створює високочастотні електромагнітні коливання, частота яких дорівнює власній частоті коливального контуру генератора:  $v_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$ .
2. Високочастотні коливання модулюються коливаннями звукової частоти.
3. Модульовані коливання підсилюються й подаються на передавальну антenu, яка випромінює електромагнітні хвилі.
4. Досягши приймальної антени, електромагнітні хвилі збуджують у ній високочастотні коливання.
5. Коливання, збуджені в приймальній антені, викликають високочастотні електромагнітні коливання в резонуючому коливальному контурі:  $v = v_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$ .
6. Слабкі високочастотні коливання підсилюються й подаються на демодулятор.
7. Демодулятор із модульованих коливань виділяє коливання низької звукової частоти.
8. Коливання низької частоти підсилюються і перетворюються на звук.

## 6

### Поняття про телебачення

Принципова схема одержання і перетворення телевізійного сигналу мало відрізняється від принципової схеми радіотелефонного зв'язку (див. рис. 23.10), проте має низку особливостей.

## 132

1. У телепередавачі коливання частоти-носія модулюються як звуковим сигналом, так і відеосигналом, що надходить від відеокамери. Оскільки телевізійний сигнал несе великий обсяг інформації, частота-носій цього сигналу має бути досить високою, тому *телевізійні станції працюють тільки в діапазоні ультракоротких радіохвиль*.

2. У телевізійному приймачі високочастотний модульований сигнал підсилюється і розділяється на *відео- і аудіоскладові*. Підсиленій відеосигнал подається в модуль кольору, де декодується, а потім іде на пристрій для відображення оптичної інформації; аудіоскладова подається в канал звукового супроводу, де демодулюється і підсилюється, після чого подається на динамік.

## 7 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** У якому діапазоні довжин хвиль працює радіопередавач, якщо емність конденсатора його коливального контуру може змінюватись від 50 до 200 пФ, а індуктивність катушки дорівнює 50 мГн?

*Аналіз фізичної проблеми.* Довжина, частота і швидкість електромагнітної хвилі пов'язані формулою хвилі. Хвилі поширяються в повітрі, тому їхня швидкість приблизно дорівнює швидкості світла у вакуумі. Найбільшу і найменшу частоти-носії знайдемо, скориставшись формулою Томсона.

*Дано:*

$$C_1 = 50 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 200 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

$$L = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\lambda_{\min} - ?$$

$$\lambda_{\max} - ?$$

*Розв'язання.*

$$\text{За формулою хвилі: } c = \lambda v \Rightarrow \lambda = \frac{c}{v}.$$

$$\text{Оскільки } \frac{1}{v} = T, \text{ де } T = 2\pi\sqrt{LC}, \text{ остаточно маємо: } \lambda = 2\pi c \sqrt{LC}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканих величин:

$$[\lambda] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \sqrt{\Phi \cdot \text{Гн}} = \frac{\text{м}}{\text{с}} \sqrt{\frac{\text{Кл}}{\text{В}} \cdot \frac{\text{В}}{\text{А/с}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}} \sqrt{\frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{А}}} = \text{м};$$

$$\lambda_{\min} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \sqrt{50 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \approx 94 \text{ (м)}; \lambda_{\max} \approx 188 \text{ м.}$$

*Відповідь:*  $94 \text{ м} < \lambda < 188 \text{ м.}$



## Підбиваємо підсумки

Щоб передавати і приймати електромагнітні хвилі, що несуть звукову та оптичну інформацію, потрібно:

- створити високочастотні електромагнітні коливання (за допомогою генератора електромагнітних коливань);
- накласти на високочастотні коливання звукову та оптичну інформацію (досягається модуляцією високочастотних коливань коливаннями нижчої частоти);
- забезпечити випромінювання електромагнітних хвиль (за допомогою передавальної антени);
- забезпечити прийом електромагнітних хвиль (за допомогою приймальної антени та резонуючого коливального контуру);
- зняти з прийнятого високочастотного сигналу звукову та оптичну інформацію (за допомогою демодулятора).



### Контрольні запитання

1. Чому для передачі радіосигналів слід використовувати високочастотні електромагнітні хвилі? 2. Де створюють незгасаючі високочастотні електромагнітні коливання? 3. Чому закритий коливальний контур майже не випромінює електромагнітних хвиль? 4. Що таке антена? 5. Як одержати радіосигнал, який одночасно був би високочастотним і ніс звукову інформацію? 6. Назвіть основні складові радіоприймача та їх призначення. 7. Поясніть механізм демодуляції. 8. У чому подібність і відмінність передачі й прийому телевізійного та радіотелефонного сигналів?



### Вправа № 23

1. Чому високу частоту коливань, що використовується в радіозв'язку, називають носієм?
2. Визначте довжину хвилі, яку випромінює радіостанція, що працює на частоті 4,5 МГц.
3. Радіопередавач випромінює електромагнітні хвилі довжиною 150 м. Яку ємність має його коливальний контур, якщо індуктивність контуру дорівнює 1,0 мГн? Активним опором контуру знектуйте.
4. Визначте довжину електромагнітної хвилі у вакуумі, на яку налаштований коливальний контур радіоприймача, якщо за максимального заряду конденсатора  $2 \cdot 10^{-8}$  Кл максимальна сила струму в контурі дорівнює 1 А.
5. Хто винайшов радіо? Італійці вважають, що радіо винайшов *Гульельмо Марконі*, німці — *Генріх Герц*, росіяни — *Олександр Попов*, серби — *Нікола Тесла*. А як вважаєте ви? Подискутуйте на цю тему.
6. На зорі розвитку радіо для зв'язку в основному використовували радіохвилі від 1 до 30 км. Хвилі, коротші від 100 м, узагалі вважали непридатними для зв'язку на великих відстанях. Однак зараз короткі й ультракороткі хвилі набули найбільшого поширення. Дізнайтесь, чому так сталося.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 4

**Тема.** Вимірювання індуктивності катушки.

**Мета:** експериментально визначити індуктивність катушки; переконатися на досліді, що індуктивність катушки суттєво залежить від наявності осердя.

**Обладнання:** регульоване низьковольтне джерело змінної напруги, вольтметр і міліамперметр змінного струму, мультиметр, катушка з осердям, ключ, з'єднувальні проводи.



### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ



#### Підготовка до експерименту

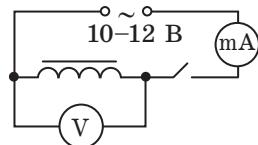
Із формули для визначення повного опору  $Z$  кола змінного струму, яке містить катушку  $\left( Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \right)$ , отримайте формулу для визначення індуктивності  $L$  катушки.

## Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результатами вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

- Перемкніть тумблер мультиметра на вимірювання опору ( $\Omega$ ) і виміряйте активний опір  $R$  котушки.
- Складіть електричне коло за поданою на рисунку схемою.
- Вимкніть ключ і приєднайте коло до джерела змінної напруги.
- Увімкніть джерело змінної напруги, установіть регулятор на нульову позначку, замкніть ключ.
- Поступово збільшуючи напругу, виміряйте силу змінного струму за чотирьох значень напруги.
- Розімкніть коло, вийміть із котушки осердя і повторіть дії, описані в пунктах 4, 5, для котушки без осердя.



Котушка	Активний опір $R$ , Ом	Напруга, В				Сила струму, А				Середній повний опір $Z_{\text{sep}}$ , Ом	Індук- тивність котушки $L_{\text{sep}}$ , Гн
		$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$		
з осердям											
без осердя											

## Опрацювання результатів експерименту

Дії, описані нижче, виконайте для котушки з осердям і для котушки без осердя.

- Побудуйте графік  $U(I)$  — залежності діючої напруги від діючої сили струму.
- За графіком  $U(I)$  визначте середнє значення повного опору ділянки:
$$Z_{\text{sep}} = \frac{U'}{I'},$$
 де  $U'$  і  $I'$  — значення сили струму і напруги для довільно обраної точки графіка (див. Додаток 2).
- Обчисліть середнє значення індуктивності котушки (якщо  $R \ll Z_{\text{sep}}$ , то активним опором котушки можна знехтувати, тоді  $L_{\text{sep}} \approx \frac{Z_{\text{sep}}}{\omega} \approx \frac{Z_{\text{sep}}}{2\pi v}$ , де  $v = 50$  Гц — частота зміни напруги в мережі).

## Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулюйте висновок, у якому зазначте: 1) яку фізичну величину ви вимірювали; 2) результати вимірювань; 3) чи залежить індуктивність котушки від поданої напруги; від наявності осердя; 4) причини похибки.

## Творче завдання

Продумайте і запишіть плани проведення експериментів щодо доведення залежності індуктивності котушки від кількості витків в її обмотці; від форми осердя. За можливості проведіть експерименти.

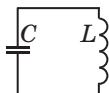
## ПІДБИАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ II «ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛІВАННЯ І ХВИЛІ»

1. Ви дізналися про електромагнітні коливання.

### Електромагнітні коливання

#### Вільні коливання

Коливання в коливальному контурі



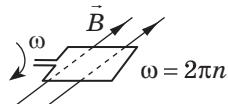
$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{L I^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2} = \frac{L I_{\max}^2}{2}$$

Формула Томсона (для ідеального контуру):

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

#### Вимушенні коливання

Змінний струм



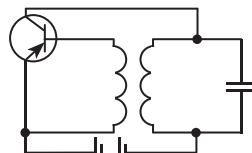
$$\Phi(t) = BS \cos \omega t; e(t) = NBS \omega \sin \omega t = E_{\max} \sin \omega t; i(t) = \frac{E_{\max}}{R+r} \sin \omega t$$

Діючі значення сили струму і напруги:

$$I_d = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}; U_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

#### Автоколивання

Коливання в генераторі незгасаючих коливань



- Джерело енергії: акумулятор
- Коливальна система: коливальний контур
- Замикальний пристрій: транзистор
- Зворотний зв'язок: індуктивний

2. Ви довідалися, що в колах змінного струму існують різні види опорів.

#### Активний опір

зумовлений перетворенням електричної енергії на внутрішню енергію:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

#### Індуктивний опір

зумовлений виникненням ЕРС самоіндукції:

$$X_L = \omega L$$

#### Ємнісний опір

зумовлений періодичною протидією електричного поля конденсатора зовнішньому електричному полю:  $X_C = \frac{1}{\omega C}$

3. Ви ознайомилися з будовою та принципом роботи трансформатора і фізичними величинами, які його характеризують.

Коефіцієнт трансформації:  $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

$k > 1$  — знижувальний трансформатор

$k < 1$  — підвищувальний трансформатор

ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

4. Ви розширили свої знання про електромагнітні хвилі, згадали властивості електромагнітних хвиль, дізнались, як здійснюється радіотелефонний зв'язок.

#### Деякі властивості електромагнітних хвиль

У вакуумі поширюються найкраще. Швидкість поширення у вакуумі є однаковою:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с

Поперечні хвилі:  $\vec{E} \perp \vec{v}$ ,  $\vec{B} \perp \vec{v}$ ; при цьому вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  коливаються в одній фазі й  $\vec{E} \perp \vec{B}$

Відбиваються від провідних поверхонь і заломлюються на межі поділу з діелектриком

Здатні обгинати перешийки (дифракція) і накладатись одна на одну (інтерференція)

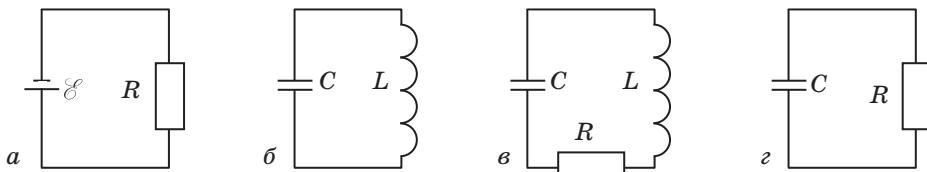
Довжина хвилі у вакуумі та частота хвилі пов'язані формулою хвилі:  $c = \lambda v$



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ II «ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛІВАННЯ І ХВИЛІ»

**Завдання 1.** Заряд на пластинах конденсатора ідеального коливального контуру змінюється за законом  $q = 2 \cdot 10^{-7} \cos(4\pi \cdot 10^6 t)$ , індуктивність катушки дорівнює 25 мГн.

1. (1 бал) Який із зображених пристройів є ідеальним коливальним контуром?



2. (2 бали) Якою є циклічна частота коливань, які генеруються в контурі?  
а) 0,2 рад/с; б) 12,6 рад/с; в)  $4,31 \cdot 10^6$  рад/с; г)  $1,26 \cdot 10^7$  рад/с.
3. (2 бали) Визначте енергію електричного поля конденсатора в той момент, коли сила струму в контурі дорівнює 1,5 А.
4. (3 бали) Визначте ємність конденсатора та повну енергію коливального контуру.

**Завдання 2.** Трансформатор із коефіцієнтом трансформації 10 підключений до мережі змінного струму напругою 120 В.

1. (1 бал) Який це трансформатор?  
а) підвищувальний; б) знижувальний.
2. (2 бали) Якою є напруга на виході трансформатора в режимі холостого ходу?  
а) 10 В; б) 12 В; в) 120 В; г) 1200 В.
3. (2 бали) Скільки витків у вторинній обмотці трансформатора, якщо його первинна обмотка містить 700 витків?
4. (3 бали) Як зміниться сила струму в первинній і вторинній обмотках трансформатора, якщо розімкнути залізне осердя? Відповідь обґрунтуйте.

**Завдання 3.** Радіостанція працює на частоті  $6 \cdot 10^6$  Гц.

1. (2 бали) На якій довжині хвилі працює радіостанція?  
а) 12 мм; б) 50 см; в) 50 м; г) 6 км.
2. (2 бали) Яким є період коливань заряду на конденсаторі коливального контуру генератора радіостанції?
3. (3 бали) Визначте ємність конденсатора коливального контуру радіоприймача, налаштованого на прийом цієї радіостанції, якщо індуктивність катушки контуру дорівнює 2 мГн.

**Завдання 4.** Коло, що містить послідовно з'єднані катушку індуктивністю 19,1 мГн і конденсатор, ємність якого можна змінювати, підключено до джерела струму, напруга на якому змінюється за законом  $u = 14,1 \sin 100\pi t$ .

1. (2 бали) Що покаже вольтметр, приєднаний паралельно джерелу струму?
2. (2 бали) За якої ємності конденсатора індуктивний опір кола дорівнюватиме ємнісному опору?

*Звірте ваші відповіді на завдання з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Поділіть суму на два. Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.*

## Розумний дім

Останнім часом досить часто можна почути словосполучення «розумний дім» (рис. 1). Згідно з технічним визначенням, розумний дім — це декілька пристрій, об'єднаних у мережу, керування якими здійснюється через зручні додатки (смартфон, планшет тощо). Детальніше розглянемо цю систему.

Як зараз здійснюється керування побутовими пристроями в помешканнях? Пульти для побутової техніки (телевізорів, кондиціонерів тощо) часто важко розрізнати, крім того, вони «зникають» саме тоді, коли конче потрібні. Прилади опалення

(радіатори, теплі підлоги) регулюються тільки безпосередньо в кімнатах, де розташовані. Якщо господарі, наприклад, забули вимкнути праску з розетки, слід негайно повернутися. Перелік незручностей можна продовжити.

Саме тому інженери створили систему, яка має назву «Розумний дім» і забезпечує комфортне життя для мешканців (рис. 2). А як користуватися цією системою людині, яка не є ІТ-фахівцем? Усе досить просто! Господар чи господиня можуть будь-якої миті на смартфоні або планшеті відкрити віконця, на яких

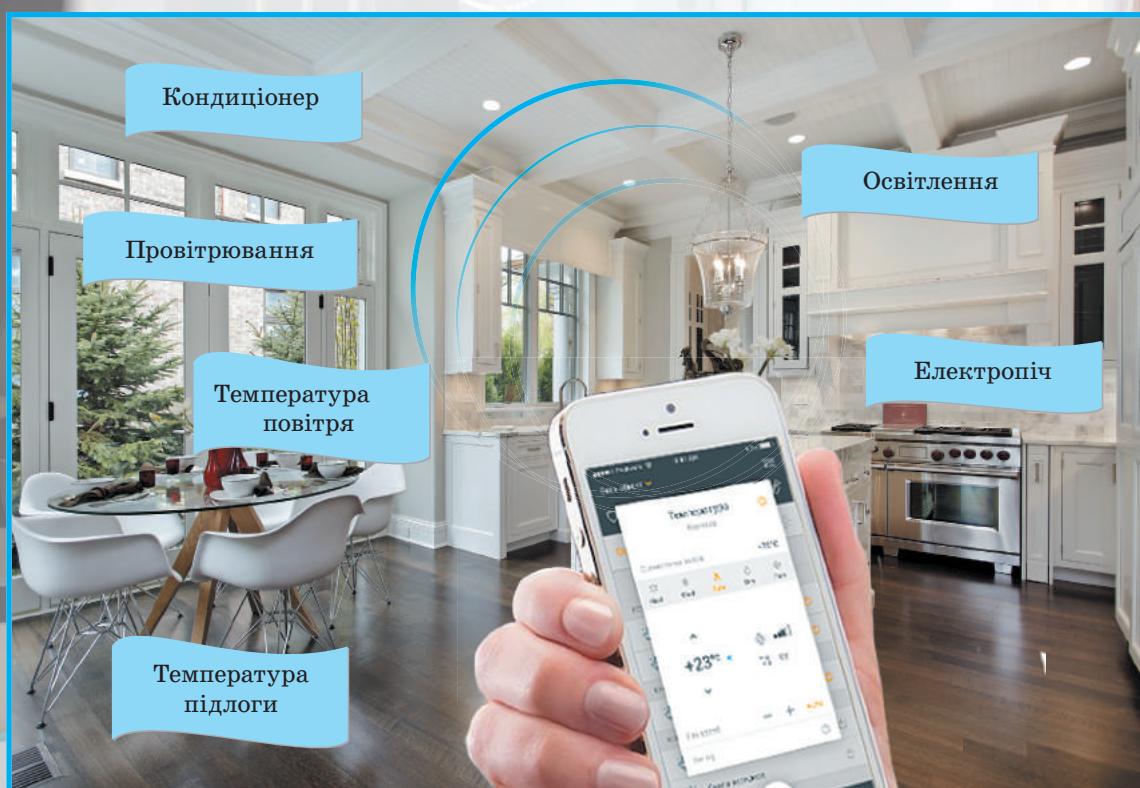


Рис. 1. Розумний дім

показано ситуацію в будинку, як-от: температуру в різних кімнатах, вологість, стан вхідних дверей тощо. У разі сумнівів щодо праски проблема розв'язується в один клік. Треба просто відключити відповідну розетку від електричної мережі. І це ще не все! Розумний дім тому й має назву «розумний», що може набагато більше. Наприклад, він автоматично зменшує енерговитрати шляхом зниження температури на період відсутності господарів, він не просто керує вентиляцією, а створює здоровий мікроклімат у кожному приміщенні, оптимізує роботу систем освітлення й водопостачання тощо. Основний принцип розумного дому — зробити житло єдиним організмом, у якому все взаємопов'язане і працює синхронно, адаптуючись до бажань господарів.

Підкреслимо, що розмір житла для системи «Розумний дім» не має значення. Вона ефективно працюватиме й у великому котеджі, й у звичайній міській квартирі. Немає та-кож лімітів на мінімальну кількість функцій розумного дому. Можна почати, скажімо, з дистанційного

керування розетками та системою безпеки, а потім додати інші функції. Нарешті, в інтернеті можна знайти багато інструкцій, як зробити систему «Розумний дім» самостійно. Тож вигадуйте щось таке й ви!

Сигнали від різних датчиків — «органів чуття» — передаються на контролер — «мозок системи», який запрограмований певним чином. Згідно з програмою мозок видає команди «розумним виконавцям». Це можуть бути обігрівачі, розетки, телевізор тощо. Господарі отримують інформацію про стан дому на свій смартфон або планшет. У разі необхідності вони мають змогу втрутитись і змінити стандартні параметри або процедури, наприклад підвищити температуру в спальні або заздалегідь увімкнути розігрів їжі. Зверніть увагу на те, що робота розумного дому неможлива без електромагнітних хвиль. Справді-бо, всі команди «мозок системи» передає «розумним виконавцям» за допомогою електромагнітних хвиль, господарі мають зворотний зв'язок із контролером також за їхньою допомогою.

#### «ОРГАНИ ЧУТТЯ»



#### «РОЗУМНІ ВИКОНАВЦІ»



Рис. 2. Схема роботи системи «Розумний дім»

# РОЗДІЛ III. ОПТИКА

## § 24. РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО ПРИРОДУ СВІТЛА



Перші уявлення про природу світла виникли ще в Стародавніх Греції та Єгипті. Серед безлічі теорій того часу були і дуже близькі до сучасних, і зовсім примітивні. Наприклад, деякі вчені давнини вважали, що з очей виходять тонкі щупальця, які обмажують предмети, внаслідок чого виникають зорові відчуття. Близькою до сучасних можна вважати теорію Демокрита, який уявляв світло як потік частинок. Згадаємо, що таке світло, і дізнаємося, як розвивалися уявлення про його природу.

### 1 Оптика — наука про світло

**Світло** — це електромагнітні хвилі, які сприймає око людини, тобто хвилі довжиною від 380 нм (світло фіолетового кольору) до 760 нм (світло червоного кольору).

- Світло випромінюється внаслідок процесів, які відбуваються всередині атомів (детальніше про випромінювання світла ви дізнаєтесь із матеріалу § 37).
- Будь-яке фізичне тіло, атоми якого випромінюють електромагнітні хвилі видимого діапазону, називають *джерелом світла*. Джерела світла бувають *природними* (зоря, Сонце, блискавка, світлячок тощо) і *штучними* (багаття, свічка, факел, електрична лампа).

Розділ фізики, який вивчає явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль видимого діапазону та з взаємодією цих хвиль із речовинами, називають **оптикою** (від грец. *optikē* — наука про зір; *optos* — видимий).

Останнім часом оптика вивчає також електромагнітні хвилі *інфрачервоного* (довжиною 760 нм — 1 мм) та *ультрафіолетового* (довжиною 10—380 нм) діапазонів.

### Основні розділи оптики

**Геометрична оптика** розглядає поширення, відбивання і заломлення світла, не пояснюючи природу світла

**Хвильова оптика** розглядає світло як електромагнітні хвилі певної частоти

**Кvantova optika** розглядає світло як потік частинок — фotonів, що мають енергію, але не мають маси

У наступних параграфах ми розглянемо основні поняття і закони кожного із зазначених розділів оптики, а зараз коротко зупинимося на історії формування уявлень про природу світла.

### 2 Корпускулярна теорія І. Ньютона і хвильова теорія К. Гюйгенса

Наприкінці XVII ст. майже одночасно виникли дві різні теорії, які пояснювали природу світла, ґрунтуючись на законах *механіки*: **корпускулярна теорія** англійського фізика *Ісаака Ньютона* (1643–1727) і **хвильова теорія** голландського фізика *Крістіана Гюйгенса* (1629–1695).

### Корпускулярна теорія світла І. Ньютона

Згідно з корпускулярною теорією І. Ньютона: *світло — це потік корпускул (частинок)*, що випромінюються світними тілами, причому рух світлових корпускул підпорядковується законам механіки.

Так, відбивання світла Ньютон пояснював пружним відбиванням корпускул від поверхні, на яку падає світло, а заломлення світла — зміною швидкості руху корпускул унаслідок їх притягання до частинок заломного середовища. Ньютону належить *теорія кольору*, відповідно до якої *біле світло є сумішшю різних кольорів, а предмети здаються кольоровими, оскільки певні складові білого кольору вони відбивають інтенсивніше за інші*.

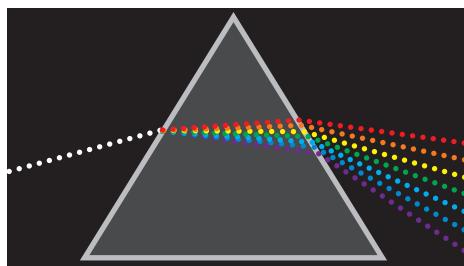


Схема досліду І. Ньютона

з розкладанням білого світла в спектр

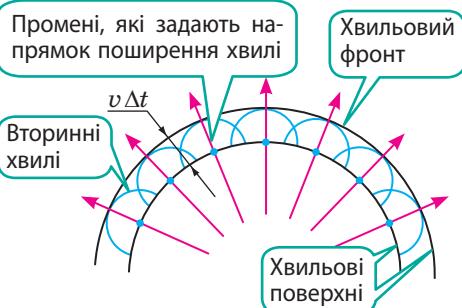
Експериментальні дослідження світла, здійснені І. Ньютоном, до XIX ст. були найдосконалішими, а його монографія «*Оптика*» (1704 р.) була основним джерелом у створенні підручників.

Зазначимо: корпускулярна теорія вела до хибного висновку, що швидкість світла в середовищі є більшою, ніж у вакуумі; також вона не могла пояснити, чому світлові пучки, перетинаючись, не впливають один на одного.

### Хвильова теорія світла К. Гюйгенса

Згідно із хвильовою теорією К. Гюйгенса: *світло — це поздовжні механічні хвилі*, що поширяються у світовому ефірі — гіпотетичному пружному середовищі, яке заповнює весь світовий простір. Гюйгенс сформулював принцип поширення світлової хвилі, відомий сьогодні як **принцип Гюйгенса**:

**Кожна точка середовища, до якої дійшла хвиля, стає джерелом вторинної хвилі, а обвідна вторинних хвиль дає положення хвильового фронту в наступний момент часу.**



Спираючись на цей принцип, Гюйгенс обґрунтував явища відбивання і заломлення світла, принцип незалежності поширення світлових променів, проте не зміг пояснити утворення кольорів. «*Трактат про світло*» Гюйгенса (1690 р.) став першою науковою працею з хвильової оптики. Після появи на початку XIX ст. праць англійського вченого *Томаса Юнга* (1773–1829) і французького фізика *Огюстена Жана Френеля* (1788–1827), які, досліджуючи світло, спостерігали явища, характерні лише для хвиль, а саме *дифракцію* та *інтерференцію* світла, в науці стала переважати теорія Гюйгенса.

### 3

### Формування сучасних уявлень про природу світла

У 60-х рр. XIX ст. Дж. Максвелл створив теорію електромагнітного поля, одним із наслідків якої було встановлення можливості існування електромагнітних хвиль. За розрахунками вченого, швидкість поширення електромагнітних хвиль дорівнювала швидкості поширення світла:  $c \approx 300\ 000$  км/с.

На основі своїх теоретичних досліджень Максвелл дійшов висновку, що світло — це окремий випадок електромагнітних хвиль. Після дослідів Г. Герца (див. § 22) жодних сумнівів щодо електромагнітної природи світла не залишилось.

*Електромагнітна теорія світла*, однак, не могла пояснити явища, які виникають під час взаємодії світла з речовиною: поглинання й випромінювання світла, фотоефект (випромінювання електронів з поверхні речовини під дією світла) та ін. Ці явища пояснила *квантова теорія світла*, основи якої були закладені в 1900 р. німецьким фізиком Максом Планком (1858–1947). Згідно з квантовою теорією, світло випромінюється, поширюється та поглинається речовиною не безперервно, а скінченними порціями — *квантами*. Кожний окремий квант світла поводиться як частинка, а сукупність квантів поводиться як хвиля. Така двоїста природа світла отримала назву **корпускулярно-хвильовий дуалізм**.

У сучасній фізиці квантові уявлення не суперечать хвильовим, а поєднуються на основах квантової механіки і квантової електродинаміки.



Чому і корпускулярна теорія світла І. Ньютона, і хвильова теорія К. Гюйгенса виявилися хибними?

### Вимірювання швидкості поширення світла

Ще Г. Галілей вважав, що світло поширяється зі скінченною, хоча й дуже великою швидкістю. Саме Галілей зробив першу (на жаль, невдалу) спробу виміряти швидкість поширення світла.

Першим швидкість поширення світла визначив данський астроном Оле Крістенсен Ремер (1644–1710) у 1676 р., спостерігаючи затемнення Io — супутника Юпітера (див. [рисунок](#) на с. 143).

Експериментально швидкість поширення світла вперше виміряв французький фізик Арман Апполім Луї Фізо (1819–1896) у 1849 р.

Американський фізик Альберт Абрахам Майкельсон (1852–1931) удосконалив методику вимірювання швидкості поширення світла. У 1924–1927 рр. він провів серії дослідів, використавши дві гірські вершини в Каліфорнії, відстань між якими була ретельно вимірювана (див. [рисунок](#)). На вершині гори Маунт-Вільсон було встановлено дугову лампу, світло від якої проходило крізь щілину і падало на призму із 8 дзеркальними гранями. Відбившись від граней призми, світло прямувало до системи дзеркал, розташованої на вершині іншої гори — Сан-Антоніо, відбивалось і поверталось до призми. Відбившись від іншої грані призми, світло потрапляло в зорову трубу.

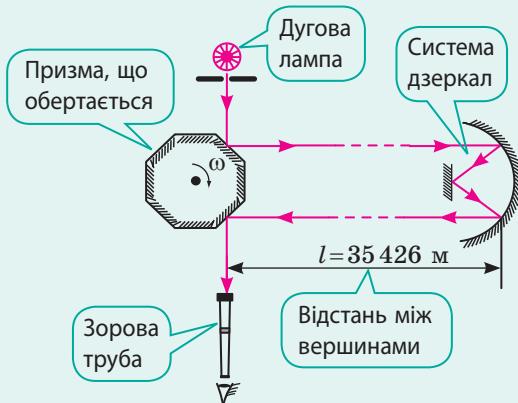


Схема досліду А. Майкельсона

Коли призму починали обертати, світло потрапляло в зорову трубу тільки за певної швидкості обертання призми — за умови, що за час проходження світла від призми до системи дзеркал і назад призма поверталася на  $1/8$  оберту.

Знаючи кількість  $n$  обертів призми за секунду та відстань  $l$  між вершинами, А. Майкельсон визначив швидкість  $v$  поширення світла ( $v = \frac{2l}{t}$ , де  $t = \frac{1/8 \text{ оберту}}{n}$ ). Середнє значення швидкості поширення світла, яке отримав учений, становило 299 798 км/с.



## Підбиваємо підсумки

- Оптика — розділ фізики, який вивчає явища, пов’язані з поширенням електромагнітних хвиль оптичного діапазону (видиме світло, інфрачервоне й ультрафіолетове випромінювання) та з взаємодією цих хвиль із речовинами.
- Корпускулярна теорія І. Ньютона розглядала світло як потік частинок, які випромінюють світне тіло, а властивості частинок описувала за допомогою законів класичної механіки.
- Хвильова теорія К. Гойгена розглядала світло як поздовжні механічні хвилі, що поширяються у світовому ефірі, який заповнює весь простір.
- Згідно із сучасною квантовою теорією світло — це потік квантів, причому для опису їх властивостей використовують закони не класичної, а квантової механіки.
- Сучасна хвильова теорія розглядає світло як електромагнітну хвиллю.
- Існування двох теорій про природу світла (корпускулярної та хвильової), які не суперечать одна одній, зумовлене двоїстотою природою світла — корпускулярно-хвильовим дуалізмом.



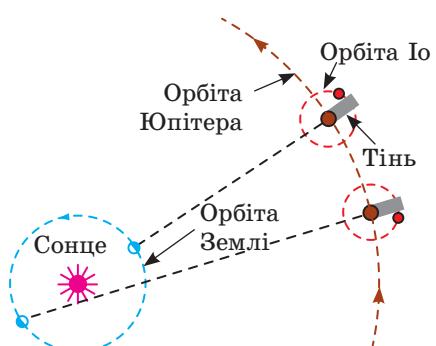
## Контрольні запитання

1. Що таке світло? Які об’єкти його випромінюють?
2. Хто є засновником корпускулярної теорії світла? Які її основні положення?
3. Які оптичні явища не можна було описати на основі корпускулярної теорії світла?
4. Хто є засновником хвильової теорії світла? Які її основні положення?
5. Чому дорівнює швидкість поширення світла? Як її було вимірюно?
6. Які сучасні уявлення про природу світла?
7. У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму?



## Вправа № 24

1. Одним із висновків корпускулярної теорії І. Ньютона є те, що швидкість поширення світла в речовині більша за швидкість поширення світла у вакуумі. Чи дійсно це так?
2. Чому у встановленні природи світла значну роль відіграло визначення швидкості поширення світла?
3. Згадайте основні властивості електромагнітних хвиль і наведіть приклади на підтвердження того, що світло має ці властивості.
4. Знаючи відстань між вершинами гір Маунт-Вільсон і Сан-Антоніо (див. с. 142), визначте середню частоту, з якою оберталася призма в дослідах А. Майклсона.
5. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтесь: чому Г. Галілей не зміг виміряти швидкість поширення світла? Що в «поведінці» Іо (супутника Юпітера) дозволило О. Ремеру досить точно вимірюти швидкість поширення світла (див. також рисунок)? Який пристрій використовував у своїх дослідах А. Фізо? Коли і як швидкість поширення світла було вимірюно найточніше?



Астрономічний метод О. Ремера з вимірювання швидкості поширення світла



## § 25. ВІДБИВАННЯ СВІТЛА. ЗАКОНИ ВІДБИВАННЯ СВІТЛА



Т. Г. Шевченко  
(акварель, 1850)

У Козьми Прutкова є афоризм: «Якщо в тебе запитано буде: що корисніше — Сонце чи Місяць? — відповідай: Місяць. Оскільки Сонце світить удень, коли й без того видно, а Місяць — уночі». А чи можна назвати Місяць джерелом світла? Зрозуміло, що ні, адже Місяць лише відбиває світло, джерелом якого є Сонце. Закони відбивання світла, як і закон прямолінійного поширення світла, встановив Евклід ще у III ст. до н. е. Згадаємо ці закони.

### Принцип Ферма

Узагальненням усіх законів геометричної оптики є **принцип найменшого часу**, названий на честь французького математика *П'єра де Ферма* (1601–1665) **принципом Ферма**: *світло завжди обирає таку траєкторію, щоб на подолання відстані між двома точками витратити найменший час*. Спираючись на принцип Ферма, можна математично вивести всі закони геометричної оптики.

Наприклад, найкоротшою відстанню між двома точками є довжина відрізка прямої, що сполучає ці точки. Якщо середовище однорідне, то швидкість світла не змінюється, отже, щоб витратити найменший час, світло в однорідному середовищі поширяється прямолінійно. Якщо середовище неоднорідне, то світло все одно «обере» найменший час: «траєкторія» його поширення викривиться — світло заломиться.

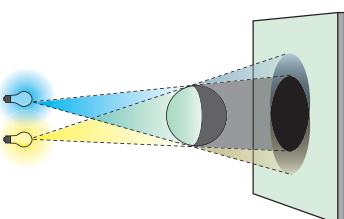


Рис. 25.1. Утворення тіні й півтіні

### 1

### Закони геометричної оптики

**Геометрична оптика** — це розділ оптики, який вивчає закони поширення світла в прозорих середовищах і принципи побудови зображень в оптичних системах без урахування хвильових властивостей світла. Основним поняттям геометричної оптики є *світловий промінь*.

**Світловий промінь** — це лінія, уздовж якої поширюється потік світлової енергії.

Світловий промінь — суть геометричне поняття, його використовують для схематичного зображення світлових пучків. Навіть коли говорять «промінь сонця», «заломлений промінь», «відбитий промінь» тощо, мають на увазі саме пучок світла, направлений якого заданий цим променем.

В основу геометричної оптики покладено низку законів, установленіх експериментально.

- **Закон прямолінійного поширення світла:** в однорідному прозорому середовищі світло поширяється прямолінійно\*.

- **Закон незалежного поширення світла:** окремі пучки світла не впливають один на одного і поширюються незалежно.

- **Закони відбивання і заломлення світла.**



Згадайте, наслідком якого із зазначених законів є утворення тіні й півтіні (рис. 25.1); отримання зображення в дзеркалі; отримання зображення в лінзі.

\* Власне в геометрії терміни «промінь» і «пряма лінія» виникли саме на основі уявлень про світлові промені.

**2**

## Згадуємо закони відбивання світла

В однорідному середовищі світло поширяється прямолінійно, доки не досягне межі з іншим середовищем (наприклад, з поверхнею тіла). На межі поділу середовищ частина світлової енергії повертається в перше середовище — це явище називають **явищем відбивання світла**.

Якщо на дзеркало, закріплене в центрі оптичної шайби, спрямувати вузький пучок світла так, щоб він давав на поверхні шайби світлу смужку, побачимо, що відбитий пучок також дасть на поверхні шайби світлу смужку (рис. 25.2).

Промінь, що задає напрямок пучка світла, який падає на деяку поверхню, називають **падаючим променем**; промінь, який задає напрямок відбитого пучка світла, називають **відбитим променем**.

Із курсу фізики 9-го класу ви знаєте, що *кут  $\alpha$  між падаючим променем і перпендикуляром, проведеним із точки падіння променя до поверхні відбивання, називають кутом падіння; кут  $\beta$  між відбитим променем і даним перпендикуляром називають кутом відбивання.*

Пересуваючи джерело світла й вимірюючи кути падіння й відбивання світла, можна переконатися: вони щоразу будуть *рівними* (рис. 25.3).

Звернемо увагу на те, що *падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр до поверхні відбивання лежать в одній площині* — в площині поверхні шайби, та сформулюємо **закони відбивання світла**:

1. Промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні відбивання, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині.
2. Кут відбивання світла дорівнює куту його падіння:  $\beta = \alpha$ .

Із закону відбивання світла випливає **оборотність світлових променів**: якщо падаючий промінь спрямувати шляхом відбитого променя, то відбитий промінь піде шляхом падаючого (рис. 25.4).



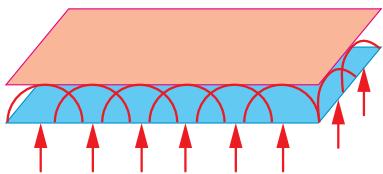
**Рис. 25.2.** Установлення законів відбивання світла:  $CO$  — падаючий промінь;  $OK$  — відбитий промінь;  $\alpha$  — кут падіння;  $\beta$  — кут відбивання



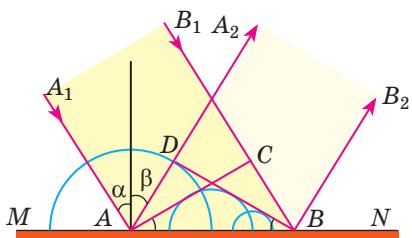
**Рис. 25.3.** З ізміною кута падіння світла змінюється й кут його відбивання. Кут відбивання щоразу дорівнює куту падіння



**Рис. 25.4.** Демонстрація оборотності світлових променів: відбитий промінь іде шляхом падаючого променя



**Рис. 25.5.** Будь-яка хвильова поверхня плошкої хвилі являє собою площину, а промені, що задають напрямок поширення хвилі, паралельні один одному



**Рис. 25.6.** Відбивання плошкої хвилі від плошкої поверхні  $MN$ : хвильова поверхня падаючої хвилі — площа  $AC$ , відбитої хвилі — площа  $DB$ ;  $\alpha$  — кут падіння,  $\beta$  — кут відбивання

У прямокутних трикутниках  $ADB$  і  $ACB$  гіпотенуза  $AB$  спільна, катет  $AD$  дорівнює катету  $CB$ , отже, ці трикутники рівні, тоді  $\angle DBA = \angle CAB$ . Водночас  $\angle \alpha = \angle CAB$ ,  $\angle \beta = \angle DBA$  як кути з відповідно перпендикулярними сторонами. Отже, кут падіння  $\alpha$  дорівнює куту відбивання  $\beta$ . Крім того, як випливає з побудови, падаючий промінь, промінь відбитий і перпендикуляр, проведений із точки падіння променя до поверхні його відбивання, лежать в одній площині. Таким чином, ми отримали закони відбивання світла на основі принципу Гюйгенса.

#### 4

#### Чому ми бачимо тіла навколо

Ви бачите тіла лише тоді, коли від цих тіл у ваше око потрапляють пучки світла. Проте більшість тіл, що нас оточують, не є джерелами світла — ми бачимо їх тому, що вони відбивають світло, яке падає на їхню поверхню від якого-небудь джерела. Світло не тільки відбивається від фізичних тіл, але й поглинається ними. Найкращі відбивачі світла — дзеркала і тіла білого кольору: вони можуть відбивати до 95 % падаючого світла.

Розрізняють дзеркальне відбивання світла (від гладеньких поверхонь) і дифузне (розсіяне) відбивання світла (від нерівних, шорстких поверхонь).

#### 3

#### Теоретичне доведення законів відбивання світла

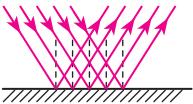
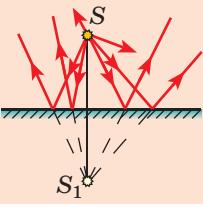
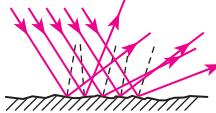
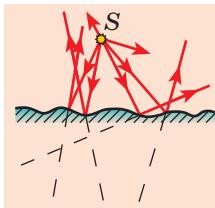
Закони відбивання світла можна отримати, скориставшись принципом Гюйгенса. Для цього розглянемо плоску хвилю (рис. 25.5), що падає на межу поділу двох середовищ.

Напрямок поширення хвилі задамо променями  $A_1A$  і  $B_1B$ , які паралельні один одному та перпендикулярні до хвильової поверхні  $AC$  (рис. 25.6).

Різні ділянки хвильової поверхні досягають межі відбиття  $MN$  неодночасно: збудження коливань у точці  $A$  почнеться

раніше, ніж у точці  $B$ , на час  $\Delta t = \frac{CB}{v}$ , де

$v$  — швидкість поширення хвилі. У момент, коли хвиля досягне точки  $B$ , вторинна хвиля із центром у точці  $A$  вже пошириється на певну відстань і являтиме собою півсферу радіуса  $r = AD = v\Delta t = CB$ . У той самий час вторинні хвилі, збуджені в точках, розташованих між точками  $A$  і  $B$ , теж являтимуть собою півсфери, але менших радіусів. Хвильова поверхня відбитої хвилі — площа  $DB$  — дотична до цих півсфер. Промені  $AA_2$  і  $BB_2$ , що перпендикулярні до хвильової поверхні  $DB$ , зададуть напрямок поширення відбитої хвилі.

Дзеркальне відбивання	Дифузне (розсіяне) відбивання
<p>Відбивання світла є <b>дзеркальним</b>, якщо паралельний пучок світлових променів, що падає на плоску поверхню, після відбивання від поверхні залишається паралельним.</p>  <p>Після дзеркального відбивання світла, яке надходить від точкового джерела <math>S</math>, продовження відбитих променів перетинаються в одній точці <math>S_1</math>, яка є <b>увінним зображенням</b> точки <math>S</math>. Зображення сукупності точок предмета дає зображення предмета.</p>   <p>Дзеркальне відбивання можливе тільки від дуже гладеньких поверхонь. Їх так і називають — <b>дзеркальні поверхні</b>. Плоску дзеркальну поверхню називають <b>плоским дзеркалом</b>.</p>	<p>Відбивання світла є <b>дифузним</b>, якщо паралельні світлові промені, що падають на плоску поверхню, після відбивання від поверхні поширяються в різних напрямках.</p>  <p>Якщо світло надходить від точкового джерела <math>S</math> і відбивається дифузно, то продовження відбитих променів не перетинаються в одній точці, тому ми <i>не отримуємо зображення</i>.</p>   <p>Оскільки після дифузного відбивання відбиті промені поширяються в різних напрямках, <i>ми можемо бачити освітлений предмет із будь-якого боку</i>. Більшість поверхонь відбиває світло дифузно.</p>

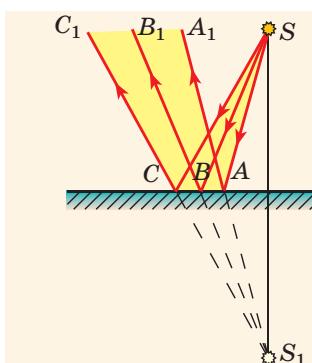


Скориставшись [рис. 25.7](#), згадайте правила побудови зображень у плоскому дзеркалі.



### Підбиваємо підсумки

- Геометрична оптика — розділ оптики, який вивчає закони поширення світла в прозорих середовищах і принципи побудови зображень в оптических системах без урахування хвильових властивостей світла.
- Світловий промінь — це лінія, уздовж якої поширяється потік світлової енергії.
- Основні закони геометричної оптики:
  - закон прямолінійного поширення світла: в однорідному середовищі світло поширяється прямолінійно;
  - закон незалежного поширення світла: окремі пучки світла не впливають один на одного й поширяються незалежно;



**Рис. 25.7.** Отримання зображення точкового джерела світла в плоскому дзеркалі:  $S$  — джерело світла;  $S_1$  — уявне зображення джерела світла. Зображення  $S_1$  є симетричним джерелу  $S$  відносно поверхні дзеркала

- ✓ закони відбивання світла: промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні відбивання, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині; кут відбивання світла дорівнює куту його падіння;
- ✓ закони заломлення світла.
- Закони геометричної оптики дозволяють описати поширення світла в різних оптических системах.



### Контрольні запитання

1. Що є об'єктом вивчення геометричної оптики?
2. Дайте означення світлового променя.
3. Сформулюйте закони: прямолінійного поширення світла; незалежного поширення світла; відбивання світла. Наведіть приклади, які ілюструють ці закони.
4. Сформулюйте і поясніть принцип Ферма.
5. Дайте означення кута падіння і кута відбивання світла.
6. Доведіть закон відбивання світла, користуючись принципом Гюйгенса.
7. Чому ми бачимо тіла, які нас оточують?
8. Яке відбивання світла називають дзеркальним? дифузним?
9. Які характеристики має зображення предмета в плоскому дзеркалі?



### Вправа № 25

1. Від поверхні снігу відбивається до 85 % енергії світла. Чому ж ми тоді не бачимо в снігу своє зображення?
2. Кут між падаючим і відбитим променями становить  $80^\circ$ . Чому дорівнює кут падіння?
3. Як має бути розташоване oko, щоб через невелику щілину в паркані можна було бачити якомога більше предметів? Відповідь поясніть.
4. Промінь, направлений горизонтально, падає на вертикальний екран. Коли на шляху променя розташували плоске дзеркало, світлова пляма на екрані змістилася на 20 см вгору. Визначте кут падіння променя на дзеркало, якщо відстань від дзеркала до екрана 40 см.
5. Скориставшись принципом Ферма, визначте, яким шляхом краще рухатися господині, щоб якнайшвидше набрати води в річці та загасити багаття (рис. 1).
6. Від дзеркальної поверхні відбивається не лише видиме світло, але й інфрачервоні (теплові) промені. Як, використовуючи цю властивість, зберегти тепло в будинку?



Рис. 1



### Експериментальне завдання

Розташуйте два дзеркала під кутом  $\alpha = 90^\circ$  одне до одного. Помістіть між дзеркалами якісь предмет (рис. 2). Скільки зображень ви бачите? Поступово зменшуючи кут між дзеркалами, вимірюйте цей кут кожного разу, коли кількість зображень збільшується на 1. Установіть математичну залежність між кутом  $\alpha$  і кількістю  $N$  зображень предмета. Скільки зображень предмета ви отримаєте, якщо розташуете дзеркала навпроти одного?



Рис. 2

## § 26. ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА. ЗАКОНИ ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА. ПОВНЕ ВІДБИВАННЯ СВІТЛА



Коли ми, стоячи на березі водойми, намагаємося визначити на око її глибину, вона завжди здається меншою, ніж є насправді. Ложка або соломинка у склянці з водою здаються нам зламаними на межі повітря й води. Як ви вже знаєте, всі ці явища пояснюються заломленням світла. Згадаємо його причину та встановимо закон заломлення світла.

### 1 У чому причина заломлення світла

Якщо пучок світла падає на межу поділу двох прозорих середовищ, то частина світловової енергії повертається в перше середовище, утворюючи відбитий пучок світла, а частина — проходить через межу в друге середовище, утворюючи пучок світла, який, як правило, змінює напрямок (рис. 26.1).

Зміну напрямку поширення світла в разі його проходження через межу поділу двох середовищ називають **заломленням світла**.

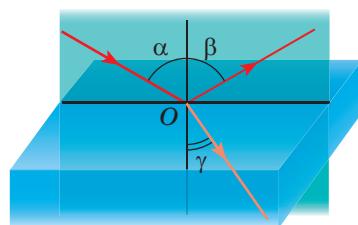
Промінь, що задає напрямок заломленого пучка світла, називають **заломленим променем**. Кут, утворений заломленим променем і перпендикуляром до межі поділу двох середовищ, проведеним із точки падіння променя, називають **кутом заломлення**.

Кількісний закон, що описує заломлення світла, був установлений експериментально в 1621 р. голландським природознавцем *Віллебрордом Снелліусом* (1580–1626) й отримав назву **закон Снелліуса**. Одержано цей закон за допомогою принципу Гюйгенса.

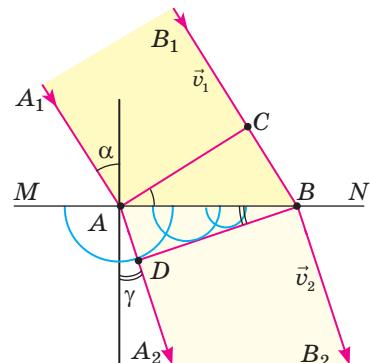
### 2 Встановлення закону заломлення світла на основі принципу Гюйгенса

Розглянемо плоску хвилю, що падає на межу поділу  $MN$  двох середовищ (рис. 26.2). Напрямок поширення хвилі задамо променями  $A_1A$  і  $B_1B$ , паралельними один одному та перпендикулярними до хвильової поверхні  $AC$ .

Зрозуміло, що спочатку поверхні  $MN$  досягне промінь  $A_1A$ , а вже після цього її досягне промінь  $B_1B$  — через час  $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$ , де  $v_1$  — швидкість світла у першому середовищі.



**Рис. 26.1.** Спостереження заломлення світла у випадку його переходу з повітря в скло:  $\alpha$  — кут падіння;  $\beta$  — кут відбирання;  $\gamma$  — кут заломлення



**Рис. 26.2.** Заломлення плоскої хвилі на плоскій межі поділу  $MN$ : хвильова поверхня падаючої хвилі — площа  $AC$ , заломленої хвилі — площа  $DB$ ;  $\alpha$  — кут падіння,  $\gamma$  — кут заломлення

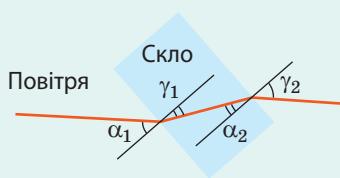
У момент, коли вторинна хвиля в точці  $B$  тільки починає збуджуватися, хвиля від точки  $A$  вже пошириється у другому середовищі на відстань  $AD = v_2 \Delta t$ , де  $v_2$  — швидкість світла у другому середовищі. Провівши площину  $DB$ , дотичну до всіх вторинних хвиль, одержимо хвильову поверхню заломленої хвилі.

Розглянемо прямокутні трикутники  $ACB$  і  $ADB$ . У трикутнику  $ACB$  кут  $CAB$  дорівнює куту падіння  $\alpha$  (як кути з відповідно перпендикулярними сторонами), отже,  $CB = AB \sin \alpha$ . Урахувавши, що  $CB = v_1 \Delta t$ , знайдемо  $AB$ :  $AB = \frac{v_1}{\sin \alpha} \Delta t$  (1). Аналогічно в трикутнику  $ADB$  кут  $ABD$  дорівнює куту заломлення  $\gamma$ , отже,  $AD = AB \sin \gamma$ . Урахувавши, що  $AD = v_2 \Delta t$ , знайдемо  $AB$ :  $AB = \frac{v_2}{\sin \gamma} \Delta t$  (2). Прирівнявши праві частини рівностей (1) і (2), маємо:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$ , де  $n_{21}$  — відносний показник заломлення (показник заломлення середовища 2 відносно середовища 1) — незмінна для двох даних середовищ величина, яка не залежить від кута падіння світла.

### Властивості заломлення світла

Чим більше змінюється швидкість світла, тим більше світло заломлюється. Якщо промінь світла (див. рисунок) переходить у середовище з більшою оптичною густинорою (швидкість світла зменшується:  $v_2 < v_1$ ), то кут заломлення є меншим від кута падіння:  $\gamma_1 < \alpha_1$ .

Якщо промінь світла переходить у середовище з меншою оптичною густинорою (швидкість світла збільшується:  $v_2 > v_1$ ), то кут заломлення є більшим за кут падіння:  $\gamma_2 > \alpha_2$ .



### Закони заломлення світла (закони Снелліуса)

- Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині.

- Для двох даних середовищ відношення синуса кута падіння  $\alpha$  до синуса кута заломлення  $\gamma$  є величиною незмінною:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$$

### Що характеризує показник заломлення

Відносний показник заломлення показує, у скільки разів швидкість поширення світла в середовищі 1 більша (або менша), ніж швидкість поширення світла в середовищі 2:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Саме зміна швидкості поширення світла в разі його переходу з одного прозорого середовища в інше є причиною заломлення світла.

Прийнято говорити про **оптичну густину середовища**: чим більшою є оптична густина середовища, тим меншою є швидкість поширення світла в цьому середовищі. Так, оптична густина води менша від оптичної густини

алмазу, відповідно швидкість світла у воді більша, ніж в алмазі. Зазвичай швидкість світла в середовищі порівнюють з його швидкістю у вакуумі.

Фізичну величину, яка характеризує оптичну густину середовища і показує, у скільки разів швидкість поширення світла в середовищі менша, ніж у вакуумі, називають **абсолютним показником заломлення середовища**:

$$n = \frac{c}{v}$$

Абсолютний показник заломлення залежить від фізичного стану середовища (температури, густини та ін.) і від частоти світлової хвилі. Тому в таблицях зазвичай указують або стан середовища і частоту світлової хвилі, або середній показник заломлення для даного діапазону довжин хвиль (див. табл. 1).



Доведіть, що відносний показник заломлення можна визначити за формулою:  $n_{21} = n_2 / n_1$ , де  $n_1$ ,  $n_2$  — абсолютні показники заломлення першого та другого середовищ відповідно.

#### 4

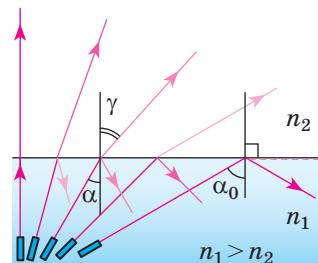
### Повне відбивання світла

Розглянемо випадок, коли світло переходить із середовища з більшою оптичною густинкою в середовище з меншою оптичною густинкою (див. рис. 26.3). У цьому випадку  $n_1 > n_2$ , тому згідно із законом заломлення світла  $\sin \alpha < \sin \gamma$ . Отже, кут заломлення  $\gamma$  більший, ніж кут падіння  $\alpha$ .

Розглянемо, як змінюватиметься кут заломлення світлового пучка в разі збільшення кута падіння. Спрямуємо вузький пучок світла на поверхню поділу середовищ і поступово збільшуватимемо кут падіння (рис. 26.3). Частина світла пройде через межу поділу, а частина відб'ється. Бачимо, що заломлений пучок світла наближатиметься до межі поділу середовищ, при цьому його яскравість буде зменшуватися, а яскравість відбитого пучка світла, навпаки, буде збільшуватися. За певного кута падіння  $\alpha_0$  кут заломлення досягає  $90^\circ$  і світло повністю відбивається — заломлений пучок світла зникає, а вся світлова енергія повертається в перше середовище (див. також табл. 2). Зрозуміло, що в разі подальшого збільшення кута падіння заломлення світла не спостерігатиметься.

**Таблиця 1**  
Абсолютний показник заломлення  $n$   
(середній для променів видимого діапазону)

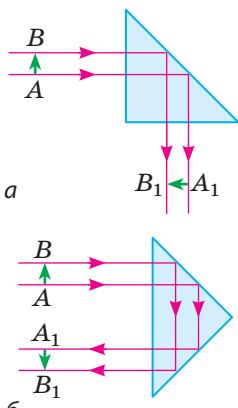
Речовина	$n$
Повітря	1,003
Лід	1,31
Вода	1,33
Етиловий спирт	1,36
Бензин	1,50
Скло	1,52
Алмаз	2,42



**Рис. 26.3.** Світло падає із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною

**Таблиця 2**  
Частина відбитої енергії під час переходу світла зі скла в повітря

Кут падіння $\alpha$	Кут заломлення $\gamma$	Частина відбитої енергії, %
$0^\circ$	$0^\circ$	4,7
$10^\circ$	$16^\circ$	4,7
$20^\circ$	$32^\circ$	5,0
$30^\circ$	$51^\circ$	6,8
$35^\circ$	$63^\circ$	12
$39^\circ$	$79^\circ$	36
$40^\circ$	$90^\circ$	100
$45^\circ$	—	100



**Рис. 26.4.** Хід променів світла в поворотній (а) та обертоній (б) призмах повного відбивання. Зеленими стрілками позначено предмет  $AB$  і його зображення  $A_1B_1$

Явище, коли заломлення світла відсутнє, тобто світло повністю відбивається від межі поділу із середовищем меншої оптичної густини, називають **явищем повного внутрішнього відбивання**.

Найменший кут падіння, починаючи з якого вся світлова енергія повністю відбивається від межі поділу двох прозорих середовищ, називають **граничним кутом повного внутрішнього відбивання**  $\alpha_0$ .

Урахувавши, що за кута падіння  $\alpha = \alpha_0$  кут заломлення  $\gamma$  дорівнює  $90^\circ$ , і спираючись на закон Снелліуса  $\left( \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} \right)$ , маємо:  $\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ , або  $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$ , де  $n_1$  і  $n_2$  — абсолютні показники заломлення першого і другого середовищ відповідно.

Якщо світло падає із якогось прозорого середовища на межу поділу з повітрям або з вакуумом ( $n_2 \approx 1$ ), то

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1},$$

де  $n_1$  — абсолютний показник заломлення середовища.

## 5

### Де застосовують явище повного відбивання світла

Повне відбивання світла знайшло застосування в оптичній техніці. Наприклад, в багатьох оптичних приладах потрібно змінювати напрямок поширення світлових пучків із мінімальними втратами енергії на поверхнях оптичних деталей. Із цією метою застосовують так звані *призми повного відбивання* (див. рис. 26.4).

Найбільш інтенсивно явище повного відбивання світла використовують у створенні волоконних оптичних систем. Якщо в торець сущільної скляної трубки спрямувати пучок світла, то після багаторазового відбивання від стінок трубки світло вийде на її протилежному кінці. Це відбудеться незалежно від того, якою буде трубка — вигнутою чи прямою. Тому перші *світловоди* (гнучки нитки, що проводять світло на основі повного внутрішнього відбивання) стали використовувати для підсвічування важкодоступних місць: світловий пучок спрямовується на один кінець світловода, а другий його кінець освітлює потрібне місце. Цю технологію використовують у медицині для дослідження внутрішніх органів (ендоскопія), у техніці, зокрема для визначення дефектів усередині моторів без їх розбирання.

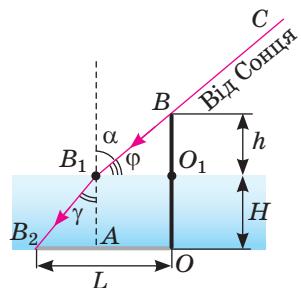
Однак найчастіше світловоди використовують як кабелі для передачі інформації. Так, порівняно зі стандартним мідним кабелем волоконно-оптичний кабель є набагато дешевшим і легшим, він практично не змінює своїх властивостей під впливом навколишнього середовища, дозволяє передавати більший обсяг інформації на великі відстані без підсилення тощо. Сьогодні волоконно-оптичні лінії зв'язку стрімко витісняють традиційні.

**6****Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** У дно водойми глибиною 2,5 м вбито стовп, причому верхня частина стовпа піднімається над поверхнею води на 1,0 м. Обчисліть довжину тіні стовпа на дні водойми, якщо висота Сонця над горизонтом  $30^\circ$ .

*Аналіз фізичної проблеми.*

Виконаємо пояснювальний рисунок. У точці  $B_1$  (на межі поділу повітря і води) прямолінійність поширення променя  $CB$  порушується. Довжина  $L$  тіні від стовпа  $OB$  дорівнюватиме довжині відрізка  $OB_2$ :  $L = OB_2 = B_2A + AO = B_2A + B_1O_1$ . Отже, необхідно: 1) використавши закон прямолінійного поширення світла, знайти положення точки  $B_1$ ; 2) використавши закон заломлення, знайти напрямок поширення променя  $B_1B_2$ ; 3) скориставшись прямолінійністю поширення світла у воді, визначити положення точки  $B_2$ . Вважатимемо, що показник заломлення води відносно повітря дорівнює абсолютному показнику заломлення води.



*Дано:*

$H = 2,5 \text{ м}$

$h = 1,0 \text{ м}$

$\varphi = 30^\circ$

$n = 1,33$

*L — ?*

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Довжина тіні стовпа на дні водойми дорівнює:  $L = B_2A + B_1O_1$  (\*). Із прямокутного трикутника  $BO_1B_1$  маємо:  $B_1O_1 = BO_1 \operatorname{ctg} \varphi = h \operatorname{ctg} \varphi = 1,0 \text{ м} \cdot \operatorname{ctg} 30^\circ = 1,73 \text{ м}$ .

Кут  $\alpha$  падіння променя  $BB_1$  дорівнює:  $\alpha = 90^\circ - \varphi = 60^\circ$ .

За законом заломлення світла:  $\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{\sin 60^\circ}{1,33} = \frac{0,866}{1,33} = 0,651$ .

Отже,  $\gamma \approx 41^\circ$ . Із прямокутного трикутника  $B_2AB_1$  маємо:

$B_2A = B_1A \operatorname{tg} \gamma = H \operatorname{tg} \gamma = 2,5 \text{ м} \cdot \operatorname{tg} 41^\circ = 2,17 \text{ м}$ .

З урахуванням співвідношення (\*) отримуємо:  $L = 2,17 \text{ м} + 1,73 \text{ м} = 3,9 \text{ м}$ .

*Відповідь:*  $L = 3,9 \text{ м}$ .

**Підбиваємо підсумки**

- Зміну напрямку поширення світла при його проходженні через межу поділу двох прозорих середовищ називають заломленням світла.

- Заломлення світла підпорядковується законам Снелліуса.

1. Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині.

2. Для двох даних середовищ відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною незмінною:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$ , де  $n_{21}$  — відносний показник заломлення, який показує, у скільки разів швидкість  $v_1$  поширення світла в першому середовищі відрізняється від швидкості  $v_2$  поширення світла в другому середовищі.

- Якщо при переході світла з одного середовища в інше швидкість світла зменшується, то говорять, що світло перейшло із середовища з меншою оптичною густинкою в середовище з більшою оптичною густинкою, і навпаки.

- Якщо світло переходить із середовища з більшою оптичною густинкою в середовище з меншою оптичною густинкою, то в разі досягнення певного граничного кута падіння спостерігається повне внутрішнє відбивання світла.

**Контрольні запитання**

- Які явища спостерігаються, коли світло проходить через межу поділу двох середовищ?
- Який кут називають кутом заломлення?
- Сформулюйте закони заломлення світла та доведіть ці закони, користуючись принципом Гюйгенса.
- У чому причина заломлення світла?
- Яким є фізичний зміст відносного та абсолютноого показників заломлення світла?
- За яких умов на межі двох середовищ спостерігається повне внутрішнє відбивання?
- Що таке кут повного внутрішнього відбивання? Як він пов'язаний із показником заломлення?
- Наведіть приклади застосування повного внутрішнього відбивання світла.

**Вправа № 26**

- Світло падає з повітря на скляну пластинку з паралельними гранями (рис. 1). Перенесіть рисунок до зошита, зобразіть подальший хід променя. Позначте кути падіння і кути заломлення. У якому середовищі швидкість поширення світла є більшою?
- Визначте швидкість поширення світла в алмазі; воді; бензині.
- Яким є кут повного внутрішнього відбивання для межі поділу середовищ: вода — повітря; алмаз — вода; скло — вода?
- Визначте діаметр світлої круглої плями на поверхні води в басейні, якщо лампа, яка утворює цю пляму, розташована на глибині 2,4 м. Світло від лампи поширюється в усіх напрямках.
- Обчисліть товщину  $d$  скляної пластинки з паралельними гранями (рис. 2), якщо після проходження пластинки світловий промінь зміщується на відстань  $l = 4$  мм. Кут падіння світла на пластинку  $\alpha = 45^\circ$ .
- Розгляніть рис. 3. Відстань від рибалки, що стоїть на краю берега, до човна — 10 м, відстань від краю берега до човна — 6 м. Скориставшись принципом Ферма, визначте найменший час, який знадобиться рибалці, щоб дістатися човна, якщо швидкість руху рибалки берегом 3 м/с, а озером — утрічі менша.
- Якщо світло поширюється в оптично неоднорідному середовищі, показник заломлення якого змінюється плавно від точки до точки, то напрямок поширення світла теж змінюється плавно («траєкторії» променів світла — плавно викривлені лінії). Зміну напрямку поширення світла в таких випадках зазвичай називають *рефракцією світла* (від латин. *refractio* — заломлення). Саме рефракція світла є причиною утворення міражів (рис. 4), через рефракцію світла Сонце і зорі здаються розташованими вище над горизонтом, ніж це є насправді... Дізнайтеся про оптичні явища, пов'язані з рефракцією світла в атмосфері Землі, докладніше та підготуйте короткі повідомлення.

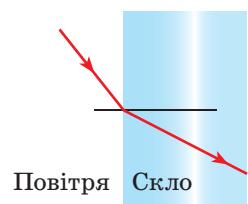


Рис. 1

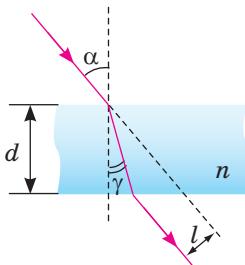


Рис. 2

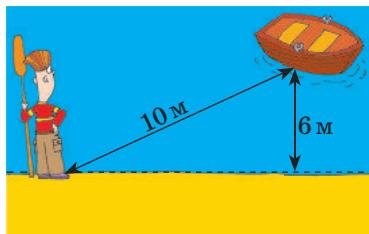


Рис. 3

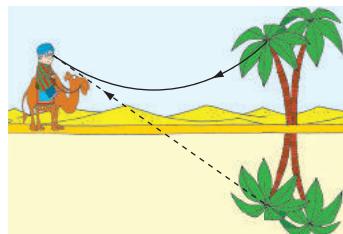


Рис. 4

## § 27. ЛІНЗИ. ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕНЬ У ЛІНЗАХ. ФОРМУЛА ТОНКОЇ ЛІНЗИ



Ви вже знаєте, що заломлення світла використовують у лінзах. Правила побудови зображень, отримуваних за допомогою лінз, відомі ще із Середньовіччя. Так, використовуючи лінзи, голландський оптик Захарій Янсен (1585–1635) у 1590 р. сконструював мікроскоп, а Галілео Галілей у 1609 р. винайшов телескоп. Отже, згадаємо основні характеристики лінз.

## 1

### Що таке лінза

**Лінза** (сферична) — прозоре тіло, обмежене з обох боків сферичними поверхнями\*.

За формою лінзи поділяють на **опуклі** й **увігнуті** (рис. 27.1).

Якщо товщина  $d$  лінзи у багато разів менша, ніж радіуси  $R_1$  і  $R_2$  сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, то таку лінзу називають **тонкою** (рис. 27.2). Далі йтиметься саме про тонку лінзу.

Пряму, яка проходить через центри сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, називають **головною оптичною віссю лінзи**. Точку лінзи, яка розташована на головній оптичній осі і через яку промені світла проходять не змінюючи своєї напрямку, називають **оптичним центром лінзи**.

Дія лінзи ґрунтуються на явищі заломлення світла: світловий промінь, який падає на лінзу, заломлюється на одній із її сферичних поверхонь, поширяється прямолінійно всередині лінзи і знову заломлюється на другій поверхні лінзи (рис. 27.3).

Якщо промені, що падають на лінзу, виходять із однієї точки, то після проходження через лінзу вони теж збираються (перетинаються) в одній точці, тобто лінза дає зображення точки, а отже, і предмета як сукупності точок.

\* Одна з поверхонь може бути **площиною** (площину можна вважати сферою нескінченого радіуса).

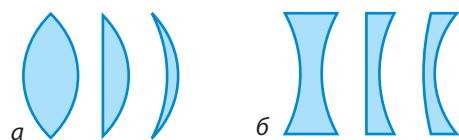


Рис. 27.1. Різні види лінз у розрізі:  
а — опуклі лінзи (двоопукла, плоско-опукла, увігнуто-опукла); б — увігнуті лінзи (двоувігнута, плоско-увігнута, опукло-увігнута)

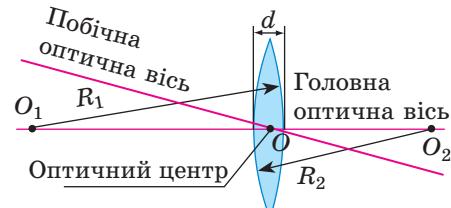


Рис. 27.2. Тонка сферична лінза:  
 $d \ll R_1, d \ll R_2$

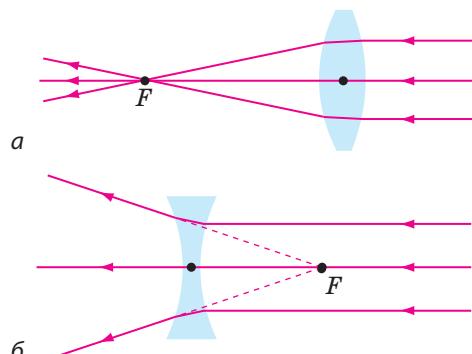
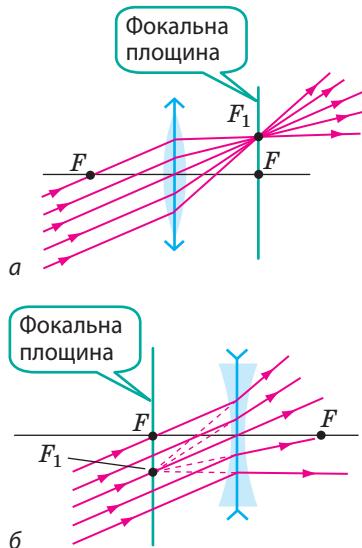


Рис. 27.3. Хід променів у лінзах:  
а — збиральна лінза, точка  $F$  — головний дійсний фокус лінзи;  
б — розсюювальна лінза, точка  $F$  — головний уявний фокус лінзи



**Рис. 27.4.** Хід паралельного пучка променів після заломлення в збиральній лінзі (а); в розсіювальній лінзі (б)

### Оптична сила лінзи

Оптична сила лінзи пов'язана з радіусами сферичних поверхонь, що її обмежують, формулою:

$$D = \left( \frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{сер}}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

де  $n_{\text{л}}$ ,  $n_{\text{сер}}$  — абсолютні показники заломлення матеріалу, з якого виготовлено лінзу, та середовища, в якому перебуває лінза;  $R_1$  і  $R_2$  — радіуси сферичних поверхонь, що обмежують лінзу. Для опуклої поверхні  $R$  беруть зі знаком «+», для увігнутої — зі знаком «-», для плоскої —  $R = \infty$ .

Аналіз формули свідчить: якщо  $n_{\text{л}} > n_{\text{сер}}$ , то опукла лінза є збиральною, а увігнута — розсіювальною; якщо  $n_{\text{л}} < n_{\text{сер}}$ , то опукла лінза є розсіювальною, а увігнута — збиральною.

Однією з головних властивостей лінзи є те, що паралельні промені після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці або в одній точці перетинаються продовження заломлених променів. Якщо паралельні промені, пройшовши крізь лінзу, збираються в одній точці, то така лінза є збиральною (рис. 27.3, а). Якщо паралельні промені після проходження крізь лінзу йдуть розбіжним пучком, а в одній точці перетинаються продовження цих променів, то така лінза є розсіювальною (рис. 27.3, б).

Точку  $F$ , у якій після заломлення збираються промені (або їх продовження), які падають на лінзу паралельно її головній оптичній осі, називають **головним фокусом лінзи**.

Головний фокус збиральної лінзи є дійсним (у точці  $F$  перетинаються власне заломлені промені), а розсіювальної лінзи — увіяним (у точці  $F$  перетинаються продовження заломлених променів). Кожна лінза має два головні фокуси, розташовані на однаковій відстані від оптичного центра лінзи.

У разі коли паралельні промені падають на лінзу не паралельно її головній оптичній осі (рис. 27.4), точку, в якій перетинаються ці промені (або їх продовження) після заломлення в лінзі, називають побічним фокусом лінзи (точка  $F_1$  на рис. 27.4). Таких фокусів у лінзи безліч, і всі вони розташовані в одній площині — у фокальній площині лінзи, яка проходить через головний фокус лінзи перпендикулярно до її головної оптичної осі.

### 2 Які фізичні величини характеризують лінзу

**Фокусна відстань  $F$  лінзи** — відстань від оптичного центра лінзи до її головного фокуса\*.

Одиниця фокусної відстані лінзи в СІ — **метр**:

$$[F] = 1 \text{ м (m)}.$$

Фокусну відстань збиральної лінзи вважають додатною, а розсіювальної лінзи — від'ємною.

\* Далі головний фокус лінзи називатимемо **фокусом лінзи**.

Чим сильніше лінза заломлює світло, тим меншою є її фокусна відстань.

Фізичну величину, яка характеризує заломні властивості лінзи та обернена до її фокусної відстані, називають **оптичною силою  $D$  лінзи**:

$$D = \frac{1}{F}$$

*Одиниця оптичної сили — діоптрія:  $[D] = 1$  дптр.*

1 діоптрія — це оптична сила такої лінзи, фокусна відстань якої дорівнює 1 метру: 1 дптр = 1 м<sup>-1</sup>.

Якщо лінза збиральна, її оптична сила є додатною, якщо лінза розсіювальна, її оптична сила є від'ємною.



Визначте, збиральні чи розсіювальні лінзи в окулярах, якщо оптична сила цих лінз становить +2 дптр; -3 дптр. Якими є фокусні відстані цих лінз?

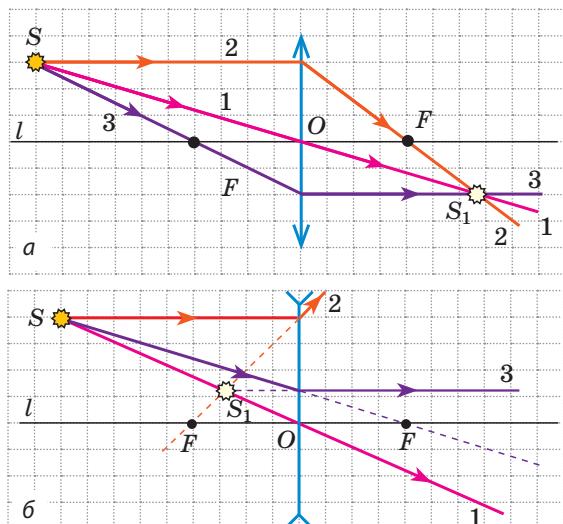
### 3

### Як побудувати зображення в лінзі

Будь-який предмет можна подати як сукупність точок. Кожна точка предмета висилає (або відбиває) промені в усіх напрямках. У створенні зображення в лінзі бере участь безліч променів, однак для побудови зображення деякої точки  $S$  досить знайти точку перетину будь-яких двох променів, що виходять із точки  $S$  і проходять крізь лінзу. Зазвичай для цього обирають два із трьох «зручних променів» (рис. 27.5). Точка  $S_1$  буде **дійсним зображенням** точки  $S$ , якщо в точці  $S_1$  перетинаються **власне заломлені промені** (рис. 27.5, а). Точка  $S_1$  буде **увявним зображенням** точки  $S$ , якщо в точці  $S_1$  перетинаються **продовження заломлених променів** (рис. 27.5, б).

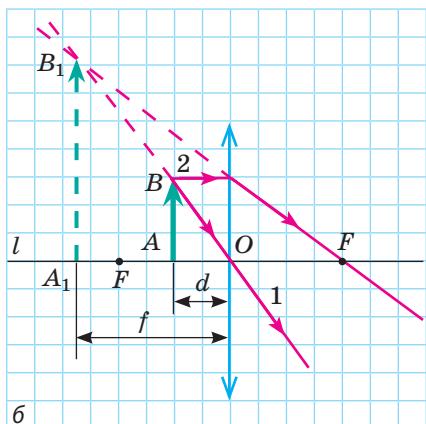
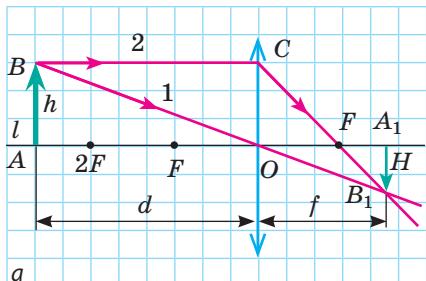
Зобразимо схематично предмет стрілкою  $AB$  і віддалимо його від збиральної лінзи на відстань, більшу за  $2F$  (рис. 27.6, а).

Спочатку побудуємо зображення точки  $B$ , для чого скористаємося двома «зручними променями» (промені 1 і 2). Після заломлення в лінзі вони перетнуться в точці  $B_1$ . Отже, точка  $B_1$  є дійсним зображенням точки  $B$ . Оскільки



**Рис. 27.5.** Три найпростіші в побудові промені («зручні промені»):

- 1 — промінь, який проходить через оптичний центр  $O$  лінзи: цей промінь не змінює свого напрямку;
- 2 — промінь, паралельний головній оптичній осі  $l$  лінзи: після заломлення в лінзі цей промінь іде через фокус  $F$  (а) або через фокус  $F$  іде його продовження (б);
- 3 — промінь, який проходить через фокус  $F$ : після заломлення в лінзі цей промінь іде паралельно головній оптичній осі  $l$  лінзи (а, б)



**Рис. 27.6.** Побудова зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$  у збиральній лінзі:  
а — предмет  $AB$  розташований за подвійним фокусом лінзи; зображення є дійсним, зменшеним, перевернутим;  
б — предмет  $AB$  розташований між фокусом і лінзою, зображення предмета є уявним, збільшеним, прямим

предмет  $AB$  розташований перпендикулярно до головної оптичної осі  $l$  лінзи, його зображення теж буде розташоване перпендикулярно до неї. Тому для побудови зображення точки  $A$  проведемо перпендикуляр із точки  $B_1$  на головну оптичну вісь  $l$ . Точка  $A_1$  перетину перпендикуляра ї осі  $l$  і є зображенням точки  $A$ . Отже,  $A_1B_1$  — зображення предмета  $AB$ , одержане за допомогою збиральної лінзи. Бачимо: якщо предмет розташований за подвійним фокусом збиральної лінзи, його зображення, одержане за допомогою лінзи, є дійсним, зменшеним, перевернутим. Таке зображення виходить, наприклад, на сітківці ока або на матриці фотоапарата.

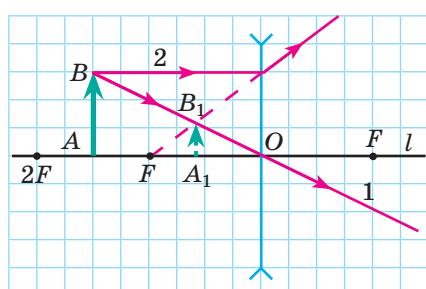
Побудуйте зображення предмета, розташованого між фокусом і подвійним фокусом лінзи, та переконайтесь, що зображення буде дійсним, збільшеним, перевернутим.

Із рис. 27.6, б бачимо: зображення предмета  $AB$ , одержаного за допомогою збиральної лінзи у випадку, коли предмет розташований між фокусом і лінзою, є уявним, збільшеним, прямим.

Таким чином, розміри та вид зображення, одержаного за допомогою збиральної лінзи, залежать від відстані між предметом і лінзою.

Побудова зображень, одержаних за допомогою розсіювальної лінзи, показує, що розсіювальна лінза завжди дає уявне, зменшене, пряме зображення предмета (див., наприклад, рис. 27.7).

Часто буває, що предмет більший за лінзу або частина лінзи закрита непрозорим екраном (наприклад, лінза об'єктива фотоапарата). На рис. 27.8 видно, що промені 2 і 3 не проходять крізь лінзу, але їх, як і раніше, можна використати для побудови зображення. Оскільки реальні промені, що вийшли з точки  $B$ , після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці —  $B_1$ , то «зручні промені», за допомогою яких будеться зображення, теж перетиналися б у точці  $B_1$ .



**Рис. 27.7.** Побудова зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$ , розташованого між фокусом і подвійним фокусом розсіювальної лінзи; зображення є уявним, зменшеним, прямим

**4**

### Формула тонкої лінзи. Лінійне збільшення лінзи

Визначимо математичну залежність між відстанню  $d$  від предмета до лінзи, відстанню  $f$  від зображення предмета до лінзи і фокусною відстанню  $F$  лінзи. Для цього скористаємося рис. 27.6, а.

Прямоутні трикутники  $FOC$  і  $FA_1B_1$  подібні, тому  $\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FA_1}$ . Оскільки  $OC=h$ ,  $A_1B_1=H$ ,  $FO=F$ ,  $FA_1=f-F$ , отримуємо:

$$\frac{h}{H} = \frac{F}{f-F}. \quad (1)$$

Прямоутні трикутники  $BAO$  і  $B_1A_1O$  подібні, отже,  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}$ , або

$$\frac{h}{H} = \frac{d}{f}. \quad (2)$$

Прирівнявши праві частини рівностей (1) і (2), маємо:  $\frac{F}{f-F} = \frac{d}{f}$ ;  $Ff = df - dF$ ;  $df = Ff + dF$ . Поділивши останню рівність на  $df$ , отримаємо **формулу тонкої лінзи**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Відношення лінійного розміру  $H$  зображення предмета до розміру  $h$  самого предмета називають **лінійним збільшенням**  $\Gamma$  лінзи:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

**5**

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** На розсіювальну лінзу падає збіжний пучок світлових променів (див. рис. 27.9). Після заломлення в лінзі промені перетинаються в точці  $S_1$ , розташованій на відстані  $a$  від лінзи. Якщо лінзу прибрать, точка перетину променів переміститься більше до місця, де перебувала лінза, на відстань  $b$  (точка  $S$ ). Визначте фокусну відстань лінзи.

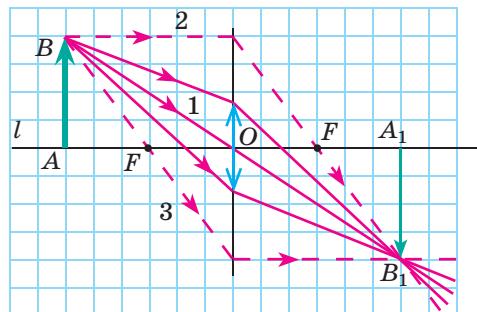


Рис. 27.8. Побудова зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$  у випадку, коли предмет є значно більшим за лінзу

#### «Правила знаків» при використанні формул тонкої лінзи

■ Відстань  $f$  (від зображення предмета до лінзи) потрібно брати зі знаком «-», якщо зображення є уявним, і зі знаком «+», якщо зображення є дійсним.

■ Фокусна відстань  $F$  збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної — від'ємною.

■ Відстань  $d$  від світлої точки (предмета) до лінзи слід брати зі знаком «+», окрім випадків, коли на лінзу падає збіжний пучок світла (світла точка розташована ніби за лінзою — див. рисунок), — у таких випадках  $d$  слід брати зі знаком «-».

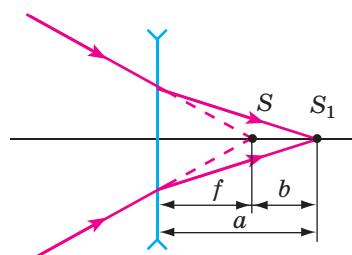
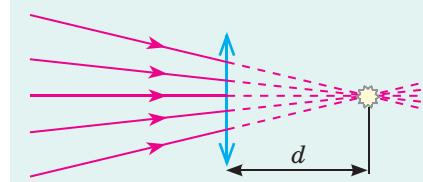


Рис. 27.9. До задачі в § 27

*Аналіз фізичної проблеми.* Скористаємося оборотністю світлових променів. Тоді точка  $S_1$ , у якій збігаються промені за наявності лінзи, відіграє роль джерела світла, з якого промені йдуть розбіжним пучком; а точка  $S$ , у якій збігаються промені за відсутності лінзи, відіграє роль уявного зображення.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Урахувавши, що  $f$  слід брати зі знаком « $-$ », запишемо формулу тонкої лінзи:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ , або  $F = \frac{df}{f-d}$ .

Із [рис. 27.9](#) бачимо, що  $d = a$ ,  $f = a - b$ , отже,  $F = \frac{a(a-b)}{(a-b)-a} = \frac{a(a-b)}{(-b)} = \frac{a(b-a)}{b}$ .

*Аналіз результату.* За умовою задачі  $b < a$ , тому вираз  $(b-a)$  є від'ємним, а отже, від'ємною є і фокусна відстань ( $F < 0$ ), що відповідає розсіювальній лінзі.

*Відповідь:*  $F = \frac{a(b-a)}{b}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Прозоре тіло, обмежене з двох боків сферичними поверхнями, називають лінзою. Лінзи бувають збиральними і розсіювальними, а за формуо — опуклими й увігнутими.
- Лінзу називають збиральною, якщо паралельні промені, що падають на неї, після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці. Цю точку називають дійсним фокусом лінзи.
- Лінзу називають розсіюальною, якщо паралельні промені, що падають на неї, після заломлення в лінзі йдуть розбіжним пучком. Точку, в якій перетинаються продовження заломлених променів, називають уявним фокусом лінзи.
- Залежно від типу лінзи і місця розташування предмета одержують різні зображення:

Місце розташування предмета	Характеристика зображення в лінзі	
	збиральна лінза	розсіювальна лінза
За подвійним фокусом лінзи: $d > 2F$	Дійсне, зменшене, перевернуте	Уявне, зменшене, пряме
У подвійному фокусі лінзи: $d = 2F$	Дійсне, рівне, перевернуте	
Між фокусом і подвійним фокусом лінзи: $F < d < 2F$	Дійсне, збільшене, перевернуте	
У фокусі лінзи: $d = F$	Зображення немає	
Між фокусом і лінзою: $d < F$	Уявне, збільшене, пряме	

- Фізичну величину, яка характеризує заломні властивості лінзи і є оберненою до її фокусної відстані, називають оптичною силою лінзи:  $D = \frac{1}{F}$ .

- Відстань  $d$  від предмета до лінзи, відстань  $f$  від зображення предмета до лінзи і фокусна відстань  $F$  пов'язані формулою тонкої лінзи:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ .

### Контрольні запитання

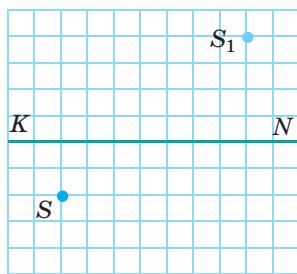


- Що таке лінза? Які види лінз вам відомі?
- Чим розсіювальна лінза відрізняється від збиральної?
- Що називають дійсним фокусом лінзи?
- Чому фокус розсіювальної лінзи називають уявним?
- Охарактеризуйте оптичну силу лінзи як фізичну величину.
- Які промені використовують для побудови зображення в лінзі?
- Які зображення дає збиральна лінза? розсіювальна лінза? Від чого залежить вид зображення?
- Які фізичні величини пов'язує формула тонкої лінзи? Яких правил слід дотримуватися, застосовуючи цю формулу?
- Як визначити лінійне збільшення лінзи?

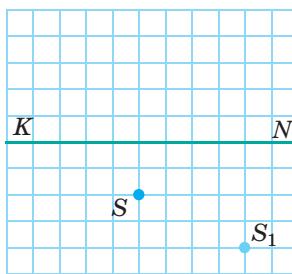
### Вправа № 27



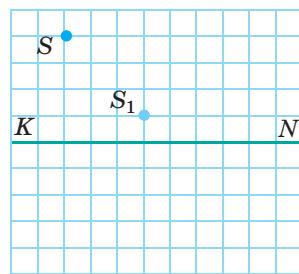
- Для отримання зображення предмета в натуральну величину предмет розташували на відстані 25 см від лінзи. Визначте оптичну силу лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
- Предмет розташований на відстані 1 м від лінзи, а його уявне зображення — на відстані 25 см від лінзи. Визначте оптичну силу лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
- На кожному з рисунків *a–c* показано головну оптичну вісь *KN* лінзи, світну точку *S* і її зображення *S<sub>1</sub>*. Для кожного випадку визначте за допомогою побудов розташування оптичного центра і фокусів лінзи, зазначте тип лінзи, вид зображення.



*a*



*b*



*c*

- Оптична сила збиральної лінзи дорівнює 5 дптр. На якій відстані від лінзи слід розташувати предмет заввишки 4 см, щоб отримати: а) дійсне зображення заввишки 1 см; б) дійсне зображення заввишки 2 см; в) уявне зображення заввишки 10 см?
- Якщо предмет розташований на відстані 36 см від збиральної лінзи, то висота його зображення 10 см, а якщо на відстані 24 см — висота його зображення 20 см. Визначте фокусну відстань лінзи та висоту предмета.



### Експериментальне завдання

Використавши збільшувальне скло, отримайте на стіні кімнати або на підлозі дійсне зображення джерела світла.

- Виконавши необхідні вимірювання, визначте оптичну силу та фокусну відстань збільшувального скла.
- Поступово закриваючи частину збільшувального скла непрозорим екраном, поспостерігайте, як змінюється зображення.

## § 28. ОПТИЧНІ СИСТЕМИ. КУТ ЗОРУ



Органом зору людини є око — одна з найдосконаліших і водночас найпростіших оптичних систем. Як влаштоване око? Чому деякі люди погано бачать і як скоригувати їхній зір? Як розглянути доволі дрібні або досить віддалені предмети? Що таке кут зору, чому його потрібно збільшувати і як це зробити?

### 1

#### Як і чому ми бачимо

**Оптична система** — сукупність оптичних елементів, призначена для формування пучків світлових променів або для одержання зображень.

Розрізняють *природні* (біологічні) і *штучні* оптичні системи.

Прикладом біологічної оптичної системи є **око**. Око людини (рис. 28.1) має форму кулі діаметром приблизно 2,5 см. Ззовні око вкрите щільною непрозорою білковою оболонкою — **склерою**. Передня частина склери переходить у прозору *рогову оболонку* — **рогівку**, що діє як збиральна лінза і за-безпечує 75 % здатності ока заломлювати світло.

Із внутрішнього боку до склери прилягає **судинна оболонка**, яка зсередини вкрита **сітківкою** — розгалуженням *світлочутливого нерва*. Місце, де зоровий нерв входить в око, не сприймає світло, тому його назвали **сліпа пляма**.

У передній частині ока судинна оболонка переходить у *райдужну оболонку* — **райдужку**, яка неоднаково забарвлена у різних людей і має круглий отвір — **зіницю**. Діаметр зіниці змінюється в разі зміни інтенсивності світла.

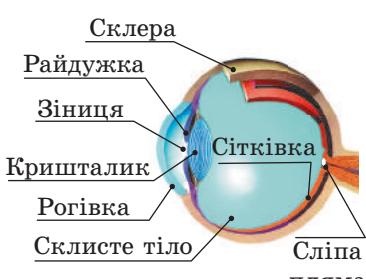


Рис. 28.1. Будова ока

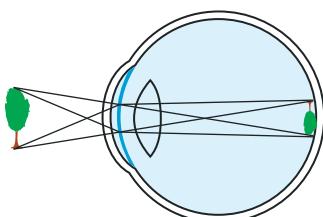


Рис. 28.2. Схема отримання зображення предмета на сітківці ока

Здатність ока пристосовуватися до різної яскравості спостережуваних предметів називають **адаптацією**.



Чому зінця звужується в разі посилення інтенсивності світла й розширяється в разі ослаблення?

За зінцю розташований **кришталік**, який являє собою двоопуклу лінзу. Кришталік завдяки скріпленим із ним м'язам може змінювати свою кривизну, а отже, й оптичну силу.

Здатність кришталіка змінювати свою кривизну в разі зміни відстані до розглядуваного предмета називають **акомодацією**.

В утворенні зображення також бере участь **склісте тіло** — прозора драглиста маса, яка заповнює простір між кришталіком і сітківкою. Світло, яке потрапляє на поверхню ока, заломлюється на рогівці, кришталіку та склістому тілі. У результаті на сітківці утворюється *дійсне, перевернуте, зменшене зображення* предмета (рис. 28.2).

Якщо людина дивиться на досить віддалені предмети, в її око потрапляють паралельні промені. У цьому випадку око найбільш розслаблене. Чим більше розташований предмет, тим сильніше напружується око.

**Найменшу відстань, на якій око бачить предмет практично не напружуясь, називають **відстанню найкращого зору**.**

Для людини з нормальним зором відстань найкращого зору становить приблизно 25 см ( $d_0 = 25$  см). У такої людини фокус оптичної системи ока в ненапруженому стані розташований на сітківці, тобто паралельні промені, що потрапляють в око, після заломлення збираються на сітківці (рис. 28.3, а). Оптична сила нормального ока становить приблизно 58,5 дптр, що відповідає фокусній відстані 1,71 см.

У разі **короткозорості** фокус оптичної системи ока в ненапруженому стані розташований перед сітківкою (рис. 28.3, б), тому зображення предметів на сітківці є розмитим. Відстань найкращого зору в цьому випадку менша від 25 см, тому короткозора людина, щоб розглянути предмет, наближає його до очей. **Короткозорість коригується носінням окулярів із розсіювальними лінзами або розсіювальними контактними лінзами.**

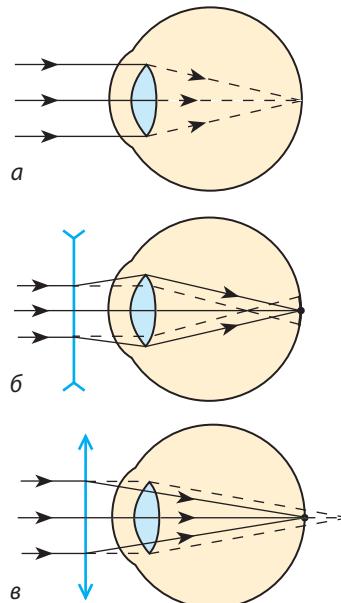
У разі **далекозорості** фокус оптичної системи ока в ненапруженому стані розташований за сітківкою (рис. 28.3, в) і зображення предметів на сітківці також є нечітким, розмитим. Відстань найкращого зору в цьому випадку більша за 25 см, тому, розглядаючи предмет, людина віддаляє його від очей. **Далекозорість коригується носінням окулярів зі збиральними лінзами або збиральними контактними лінзами.**

## 2

### Що таке кут зору та як його збільшити

Розмір  $H$  зображення предмета на сітківці визначається **кутом зору**  $\varphi$  — кутом із вершиною в оптичному центрі ока, утвореним променями, напрямленими на крайні точки предмета (рис. 28.4):

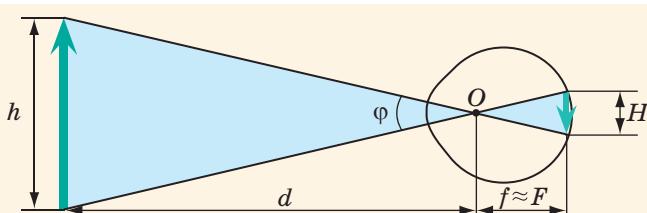
$$\varphi = \frac{h}{d} = \frac{H}{F}$$



**Рис. 28.3.** Зображення віддалених предметів на сітківці ока:  
а — для людини з нормальним зором; б — у разі короткозорості; в — у разі далекозорості. Пунктирними лініями показано хід променів через око за відсутності окулярів (контактних лінз), суцільними — за наявності окулярів (контактних лінз)

■ Коли короткозора людина розглядає предмет, вона наближає його до ока, збільшуючи кут зору. Саме тому вона може розрізнити дрібні деталі на відстані, менші за нормальний зором.

■ Далекозорій людина важко розрізняти дрібні деталі предмета, оскільки вона повинна віддаляти предмет від ока, а це зумовлює зменшення кута зору.



**Рис. 28.4.** Схема отримання зображення предмета на сітківці ока:  $O$  — оптичний центр оптичної системи ока;  $d$  — відстань від предмета до ока;  $f$  — відстань від оптичного центра до зображення;  $F$  — фокусна відстань;  $\varphi$  — кут зору

**Зверніть увагу!**  
Зазвичай кут зору, під яким людина розглядає предмет, є досить малим ( $\varphi < 0,1$  рад). Для таких кутів, як вам відомо з математики:  $\varphi \approx \sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$ . Саме тому ми визначаємо кут зору як відношення катетів.

Зі збільшенням кута зору розмір зображення на сітківці збільшується, тому збільшується кількість світлоочутливих клітин сітківки, задіяних у створенні зображення, а відповідно, й обсяг зорової інформації.

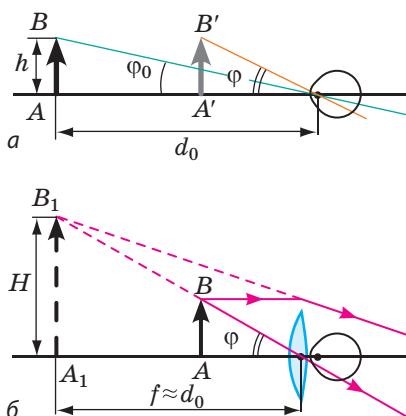
Важливу роль в одержанні зорової інформації про предмет відіграє також **роздільна здатність ока**. Дві точки зображення сприймаються роздільно, якщо потрапляють на дві різні світлоочутливі клітини ока. Роздільна здатність ока визначається мінімальним кутом зору  $\varphi_{\min}$ , за якого дві точки ще видно роздільно. Середній мінімальний кут зору становить близько 1 кутової мінuty ( $\varphi_{\min} \approx 1'$ ) — це дуже маленький кут (наприклад, під таким кутом відрізок завдовжки 1 см розглядається на відстані 34 м від ока). *Зi зменшенням освiтленостi роздiльна здатнiсть oка зменшується.*

Щоб детально розглянути предмет, треба збільшити кут зору. Це досягається за допомогою **оптичних пристрiй**. За призначенням оптичні пристрiй можна подiлити на двi групи: 1) пристрiй для **розглядання дуже дрiбних об'єктiв**, якi нiбi збiльшують об'єкт, що розглядається (луpa, мiкроскоп); 2) пристрiй для **розглядання вiддаленiх об'єктiв**, якi нiбi набiжають об'єкт (зорова трубa, бiнокль, телескоп).

Найпростiшим збiльшувальним пристрiлом є **луpa (збiльшувальне скло)** — короткофокусна опукла лiнза, виготовлена зi скла або пласти маси.

Нехай невеликий предмет  $AB$  заввишки  $h$  розташований на вiдстанi найкрайшого зору ( $d_0$ ) (рис. 28.5, a). Предмет видно пiд кутом  $\varphi_0$ . Щоб збiльшити кут зору, можна наблизити предмет до ока, перемiстивши цей предмет у положення  $A'B'$ , але в цьому випадку предмет перебуватиме надто близько до ока. А можна скористатися лupoю.

Розмiстимо предмет поблизу фокуса луpy i розглядатимемо його через лупу,



**Рис. 28.5.** a — розглядання предмета неозброєним оком; б — збiльшення кута зору за допомогою луpy.  
 $h$  — висота предмета;  $H$  — висота зображення;  $f$  — вiдстань вiд зображення до лiнзи;  $\varphi_0$  i  $\varphi$  — початковий i збiльшений кути зору вiдповiдно

яку розташуємо як найближче до ока (рис. 28.5, б). Якщо під час розглядання предмета через лупу його уявне зображення  $A_1B_1$  перевіватиме на відстані найкращого зору ( $f = d_0$ ), то око буде майже ненапруженним, а кут зору — збільшеним.

Чим менша фокусна відстань лупи, тим значніше збільшення вона дає. На практиці лупи з фокусною відстанню меншою за 2 см не застосовують, оскільки такі короткофокусні лінзи вносять серйозні викривлення в отримувані зображення. Найкращі лупи збільшують кут зору в 5–10 разів.

Для багатьох наукових і технічних досліджень навіть десятиразове збільшення об'єкта не є достатнім. У таких випадках використовують **оптичні мікроскопи**, що являють собою комбінацію двох короткофокусних систем — *об'єктива* й *окуляра*, розташованих у тубусі на певній відстані один від одного. Оптичні мікроскопи можуть збільшити кут зору в 1000 разів. Це граничне значення, яке не може бути більшим через хвильові властивості світла.



### Підбиваємо підсумки

- Оптична система — сукупність оптичних елементів, призначена для формування пучків світлових променів або для одержання зображень.

- Прикладом біологічної оптичної системи є око: потрапляючи в око, світло заломлюється, і в результаті на сітківці — світлочутливій поверхні очного дна — утворюється зменшене, дійсне, обернене зображення предмета.

- Обсяг зорової інформації про предмет, одержуваної оком, визначається кутом зору. Кут зору — це кут із вершиною в оптичному центрі ока, утворений променями, які направле-

ні на крайні точки предмета:  $\phi = \frac{h}{d}$ .

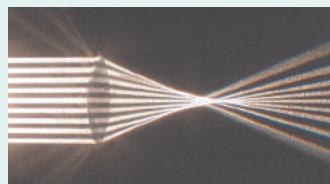
- Роздільна здатність ока визначається мінімальним кутом зору, за якого дві точки зображення сприймаються роздільно.

- Для збільшення кута зору використовують різноманітні штучні оптичні системи.

### Недоліки зображень, отримуваних в оптичних системах

Зображення, які отримують за допомогою штучних оптичних систем, мають низку недоліків, найбільш суттєвими з яких є такі.

- Сферична аберрація**, причина якої в тому, що про мені, які вийшли з однієї точки предмета, після заломлення в оптичній системі збігаються не в одній точці, і через це зображення «розмивається».



- Хроматична аберрація**, яка виникає тому, що під час проходження крізь лінзу хвилі різних частот, що входять до складу світла, заломлюються по-різному, внаслідок чого зображення точки в лінзі має вигляд райдужної плями.

- Астигматизм** — порушення подібності між предметом і його зображенням: зображення предметів, віддалених від головної оптичної осі лінзи, є викривленими.

Майже всі дефекти оптичних систем можна усунути, використовуючи додаткові лінзи, але повне усунення всіх недоліків неможливе. Тому залежно від призначення приладу усувають найшкідливіший дефект.



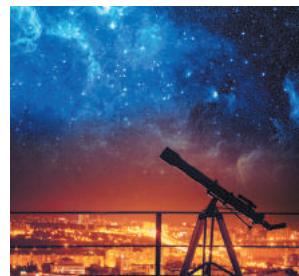
### Контрольні запитання

- Опишіть будову людського ока та призначення його окремих оптических елементів.
- Як змінюється діаметр зіниці в разі зменшення освітленості?
- Чому людина з нормальним зором може однаково чітко бачити як далеко, так і близько розташовані предмети?
- Яку ваду зору називають коротко-зорістю? далекозорістю? Як ці вади можна скоригувати?
- Що таке кут зору і для чого його збільшують?
- Які пристрої використовують для збільшення кута зору?



### Вправа № 28

- Яку ваду зору має людина, якщо оптична сила її ока менша, ніж оптична сила ока людини з нормальним зором?
- Людина при читанні тримає книгу на відстані 15 см від очей. Які окуляри їй потрібні?
- Чи може будь-яка збиральна лінза слугувати лупою? Обґрунтуйте свою відповідь.
- Кулька діаметром 1,8 см розташована на відстані 2 м від спостерігача, який має нормальній зір. Яким є розмір зображення кульки на сітківці? Під яким кутом зору видно кульку?
- Яку ваду зору має людина, якщо, розглядаючи предмет на відстані найкращого зору, вона використовує лінзи з оптичною силою +2 дптр? На якій відстані ця людина добре бачить предмет неозброєним оком?
- Сьогодні зниження гостроти зору є однією з найпоширеніших хвороб. Дізнайтесь, які фактори негативно впливають на зір, яких правил слід дотримуватися, щоб зберегти зір.
- Для спостереження віддалених об'єктів (планет, зір, астероїдів) використовують телескопи, які бувають двох основних видів: телескопи-рефлектори і телескопи-рефрактори. Дізнайтесь, чим вони відрізняються і які переваги має кожний вид телескопів.



### Фізика в цифрах

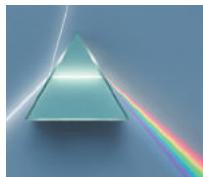
Що означають цифри, які зазвичай наводяться на оправі окулярів\*



\* Усі розміри наведено в міліметрах.



## § 29. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА. СПЕКТРОСКОП



Ще в давнину помітили, що сонячний промінь, пройшовши крізь скляну призму, стає розбіжним кольоровим, а якщо за призмою поставити екран, то на ньому з'явиться райдужна смужка. Вважалося, що причина появи смужки криється у властивості призми забарвлювати білий колір. Чи так це насправді, з'ясував у 1665 р. I. Ньютон, провівши серію дослідів.

### 1 Досліди I. Ньютона з розкладання білого світла у спектр

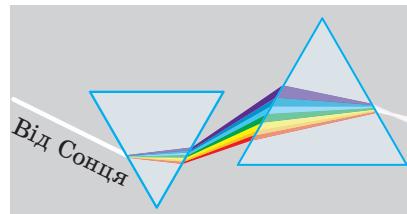
Джерелом світла в дослідах Ньютона слугував невеликий отвір у віконниці, який освітлювався сонцем. Коли перед отвором встановлювали призму, на протилежній стіні замість круглої світлої плями з'являлася різнокольорова смужка, яку Ньютон назвав **спектром**. На смужці, як і у веселці, виділялося *сім кольорів*: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий (рис. 29.1). Коли на шляху різнокольорових пучків, що вийшли з призми, Ньютон розмістив ще одну призму, на стіні з'вилася незабарвлена світла пляма.

За допомогою отвору вчений також виділяв із широкого різнокольорового пучка променів вузькі монохроматичні (одноколірні) пучки світла і спрямовував їх на іншу призму. Пучки відхилялися призмою, але вже не розкладалися у спектр (рис. 29.2).

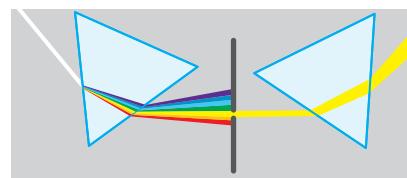
Результати цих дослідів дозволили Ньютону дійти таких висновків: 1) призма не фарбує біле світло, а розкладає його у спектр; 2) пучок білого світла складається з багатьох різнокольорових пучків; 3) показник заломлення середовища для променів різного кольору є різним.

### 2 Що таке дисперсія світла

Згідно з хвильовою теорією світла **колір світла визначається частотою електромагнітної хвилі, якою є світло**. Найменшу частоту має червоне світло, найбільшу — фіолетове (див. таблицю). Аналізуючи досліди Ньютона та спираючись на хвильову



**Рис. 29.1.** Розкладання білого світла у спектр при його проходженні крізь призму. Найбільше заломлюються фіолетові промені, найменше — червоні



**Рис. 29.2.** Монохроматичний промінь, виділений зі спектра, при проходженні крізь призму відхиляється, але не розкладається у спектр

#### Спектральні кольори та їхні характеристики

Колір світла	Частота світла, ТГц ( $10^{12}$ Гц)	Довжина хвилі у вакуумі, нм ( $10^{-9}$ м)
Червоний	480–400	625–740
Оранжевий	510–480	590–625
Жовтий	530–510	565–590
Зелений	600–530	500–565
Блакитний	620–600	485–500
Синій	680–620	440–485
Фіолетовий	790–680	380–440

### Чому небо блакитне

Багато вчених замислювались над тим, чому небо блакитне. Найкращу відповідь на це запитання дав у 1899 р. англійський фізик Джон Релей (1842–1919).



Сонце випромінює біле світло. Частина фотонів, що потрапляють від Сонця в атмосферу Землі, проходить між молекулами газу, не змінюючи свого напрямку, а частина розсіюється на флуктуаціях (неоднорідностях) повітря. Найкраще розсіюється короткохвильове світло (закон Релея).

Природне біле світло містить хвилі всього видимого спектра, короткохвильова частина якого відповідає синьо-блакитним кольорам, а довгохвильова — жовто-червоним. Отже, атмосфера краще розсіює синьо-блакитну частину спектра, а жовто-червону пропускає. Саме тому небо блакитне (атмосфера розсіює світло цієї частини спектра), а Сонце, що заходить, має жовто-червоний колір (атмосфера пропускає світло цієї частини спектра).

теорію світла, доходимо висновку: *показник заломлення світла залежить від частоти світловової хвилі*. Для більшості середовищ абсолютний показник заломлення зростає зі збільшенням частоти світла.

**Явище розкладання світла у спектр, зумовлене залежністю абсолютноного показника заломлення середовища від частоти світловової хвилі, називають дисперсією світла.**

**Зверніть увагу:** при переході з одного середовища в інше швидкість  $v$  поширення світла змінюється, але частота  $v$  світловової хвилі, а отже, і колір світла залишаються незмінними. Тому згідно з формулою хвилі ( $v = \lambda v$ ) змінюється довжина  $\lambda$  світловової хвилі. При переході в середовище з більшою оптичною густинною довжина хвилі, як і її швидкість, зменшується:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$



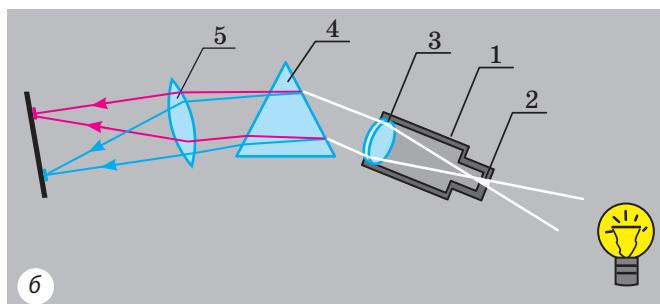
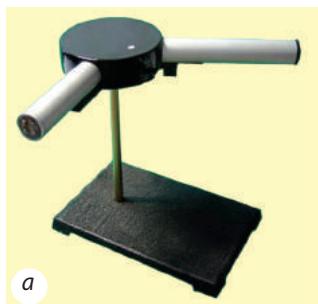
Якою є довжина хвилі світла зеленого кольору у склі, абсолютний показник заломлення якого 1,5?

### 3

### Для чого потрібні спектральні апарати і як вони побудовані

Випромінюване будь-яким джерелом світло, як правило, має складну будову. Сукупність частот світлових хвиль, що містяться у випромінюванні будь-якої речовини, називають *спектром випромінювання цієї речовини*. Для кожної речовини в газоподібному атомарному стані спектр випромінювання є унікальною характеристикою — він не збігається зі спектром випромінювання жодної іншої речовини. Саме на цій унікальності ґрунтуються *спектральний аналіз — метод визначення хімічного складу речовини за її спектром*.

Спектральний склад світла вивчають за допомогою *спектральних апаратів*. Розглянемо будову одного з них, принцип дії якого заснований на дисперсії світла (рис. 29.3). Такий апарат складається з трьох основних частин: коліматора, призми, лінзи.



**Рис. 29.3.** Дисперсійний спектральний апарат: а — вигляд; б — будова та принцип дії

*Коліматор* (1) являє собою вузьку трубку, на одному кінці якої розташована ширма зі щілиною (2); щілина перебуває у фокальній площині *збиральної лінзи* (3). Вузький паралельний пучок світла від коліматора спрямовується на *призму* (4). Оскільки кожній частоті світла (кожному кольору) відповідає власний показник заломлення, після заломлення з призми виходять монохроматичні паралельні пучки, кожний з яких відхиляється на власний кут. Ці пучки потрапляють на іншу *збиральну лінзу* (5) і фокусуються на її фокальній площині.

Чому промені після заломлення в лінзі (3) стають паралельними? Чому лінза (5) збирає в даній точці фокальної площини промені лише одного кольору?

Якщо у фокальній площині (5) розташовано фотопластину, екран тощо, такий прилад називають **спектрографом**; якщо замість лінзи (4) та екрана використовують зорову трубу, маємо справу зі **спектроскопом** (від латин. *spectrum* — уява, видіння, грец. *graphō* — пишу, зображую, грец. *skopēō* — спостерігаю).

Зрозуміло, що сучасні спектральні апарати є набагато складнішими: досліджувану речовину піддають випромінюванню, застосовують більш складні оптичні системи, для спостереження використовують вбудовані екрани із CCD-матрицею і різноманітні датчики; дані можуть передаватися мережею комунікацій і опрацьовуватися комп’ютером.

#### 4

#### Чому навколошній світ є різнокольоровим

Колір того чи іншого тіла, яке ми спостерігаємо, визначається частотою хвиль, що потрапляють в око після взаємодії світла з матеріалом, із якого складається тіло, а саме після часткового *поглинання* і *розсіювання* світла.

**Розсіювання світла** — це явище перетворення світла матеріальним середовищем, яке супроводжується зміною напрямку поширення світла і виявляється як невласне світіння середовища.

**Поглинання світла** — зменшення інтенсивності світла, яке проходить через матеріальне середовище.

*Колір тіла* визначається його *властивістю відбивати (розсіювати) світлові хвилі тієї чи іншої частоти (довжини)*. Якщо тіло освітлюється білим світлом і відбуває всі падаючі світлові хвилі, то тіло здаватиметься

нам білим; якщо тіло відбиває хвилі переважно синього кольору, а інші поглинає, тіло здаватиметься синім. Якщо тіло майже повністю поглинає падаюче світло, тіло здаватиметься чорним. До того ж колір тіла залежить від характеристики світлової хвилі, що його освітлює. Наприклад, якщо тіло, яке має властивість відбивати переважно синє світло, освітлюється монохроматичним червоним світлом, тіло практично не відбиває світло і здаватиметься чорним. Таким чином, колір тіла залежить також від складу падаючого світла, а отже, поняття кольору в темряві позбавлене будь-якого сенсу.



### Підбиваємо підсумки

- Дисперсія світла — явище розкладання світла у спектр, зумовлене залежністю абсолютноного показника заломлення середовища (а отже, і швидкості поширення світла в цьому середовищі) від частоти світлової хвилі. Для більшості середовищ показник заломлення зростає зі збільшенням частоти світлової хвилі.
- Спектральний склад світла досліджується за допомогою спектральних апаратів — спектроскопів і спектрографів.
- Колір світлової хвилі визначається частотою хвилі. Біле сонячне світло містить увесь спектр частот електромагнітних хвиль видимого діапазону.
- Усе різноманіття кольорів, які мають тіла навколо нас, зумовлене спектральним складом світла, що падає на тіла, і здатністю цих тіл відбивати хвилі певної частини оптичного спектра.



### Контрольні запитання

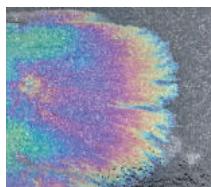
1. Опишіть досліди І. Ньютона з вивчення дисперсії світла.
2. Назвіть сім спектральних кольорів.
3. Світло якого кольору найменше заломлюється в речовині? найбільше заломлюється в речовині?
4. Дайте означення дисперсії.
5. Які характеристики світлової хвилі змінюються під час переходу з одного середовища в інше?
6. Опишіть будову та принцип дії дисперсійного спектрального апарату.
7. Чому навколошній світ ми бачимо різнокольоровим?



### Вправа № 29

1. Яким ви побачите білий аркуш паперу, якщо освітити його червоним світлом? Чи зміниться відповідь, якщо взяти аркуш кольорового паперу?
2. Що означає словосполучення «м'яч червоний»?
3. Яким є показник заломлення середовища для світла фіолетового кольору, якщо довжина світлової хвилі в даному середовищі дорівнює 250 нм, а у вакуумі — 400 нм? Якою є швидкість поширення цього світла в даному середовищі?
4. Чи можуть хвилі світла різного кольору мати однакову довжину? мати однакову частоту? Якщо можуть, то за яких умов?
5. Для світла деякого кольору довжина хвилі в бензині дорівнює 450 нм. Яким є колір цього світла?
6. Якщо змішати жовту і синю фарби, отримаємо зелену. Якщо накласти одну на одну жовту і синю прозорі пластинки і подивитися крізь них на світло, пластинки здаватимуться чорними. Як це можна пояснити?
7. Згадайте або дізнайтесь, які кольори називають основними. Якими є їхні властивості? Де ці властивості застосовують?

## § 30. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА



Чому мильні бульбашки райдужно забарвлені? Чому райдужно забарвлена масляна плівка на поверхні води і чому таке забарвлення дає тільки дуже тонка плівка? Пояснити це дисперсією неможливо. Не зміг пояснити це й I. Ньютон, хоча першим застосував це явище на практиці, шліфуючи лінзи набагато краще за найвідоміших майстрів свого часу. Отже, дізнаємось, що це за явище і в чому його причина.

### 1 Інтерференція світлових хвиль

Світло — це електромагнітна хвилля, а для будь-яких хвиль виконується *принцип суперпозиції*: якщо в певну точку простору надходять хвилі від кількох джерел, то ці хвилі накладаються одна на одну. Унаслідок такого накладання в деяких точках простору може відбуватися посилення коливань, а в деяких — послаблення, тобто спостерігається *явище інтерференції*.

**Інтерференція** — явище накладання хвиль, унаслідок якого в деяких точках простору спостерігається стійке в часі посилення (або послаблення) результуючих коливань.

З'ясуємо, що означає це явище для світла. При поширенні світлової хвилі в кожній точці простору, де поширюється хвиля, відбувається періодична зміна напруженості та магнітної індукції електромагнітного поля.

Якщо через деяку точку простору поширюються дві світлові хвилі, то напруженості полів векторно додаються (так само додаються і вектори магнітної індукції). Результуюча напруженість характеризуватиме світлову енергію, що надходить у дану точку: чим більша напруженість, тим більшою є енергія, що надходить.

У випадку коли напрямки напруженостей полів двох світлових хвиль, що приходять у дану точку, збігаються, результуюча напруженість збільшується і в точці спостерігається максимальне збільшення освітленості. І навпаки, коли напруженості полів напримлени протилежно, результуюча напруженість зменшується («світло гаситься світлом»).

Зверніть увагу: *під час інтерференції енергія не зникає — відбувається її перерозподіл у просторі*.

#### Зверніть увагу!

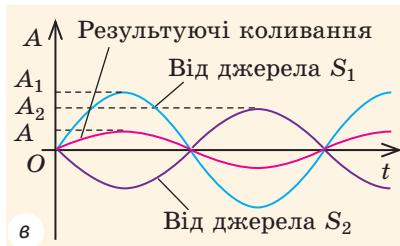
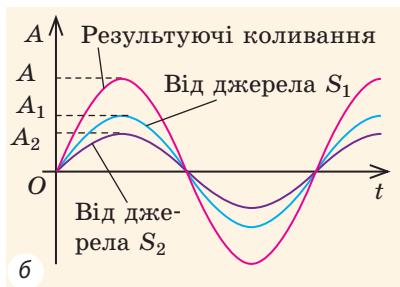
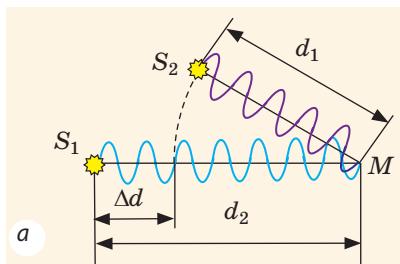
Щоб у певних точках простору весь час могло відбуватися посилення або послаблення результуючих коливань, необхідне виконання двох умов, які називають **умовами когерентності хвиль**:

- 1) хвилі повинні мати однакову частоту (відповідно й довжину);
- 2) різниця  $\Delta\phi$  початкових фаз хвиль має бути незмінною (хвилі, що накладаються, повинні мати незмінний у часі зсув фаз).

Хвилі, які відповідають умовам когерентності, називають **когерентними хвилями**.

Ідеальними джерелами когерентних світлових хвиль є **лазери** — оптичні квантові генератори.

1. Світловий потік, який випромінюється лазером, має незмінну одну частоту (довжину хвилі), тобто є **монохроматичним** (від грец. *tonos* — один, *chroma* — колір).
2. Усі електромагнітні коливання лазерного світлового потоку є синфазними (зсув фаз незмінний і дорівнює нулю).



**Рис. 30.1.** Якщо хвилі надійшли в точку  $M$  (а) в однаковій фазі, амплітуда результуючих коливань збільшується:  $A = A_1 + A_2$  (б), а якщо хвилі надійшли в протилежних фазах, амплітуда результуючих коливань зменшується:  $A = A_1 - A_2$  (в)

## 2 Умови інтерференційних максимуму та мінімуму

Розглянемо дві когерентні світлові хвилі, які виходять із джерел  $S_1$  і  $S_2$  в одинакових фазах, поширяються в однорідному середовищі та надходять у точку  $M$ , розташовану на відстані  $d_1$  від джерела  $S_1$  і на відстані  $d_2$  від джерела  $S_2$  (рис. 30.1, а). Відстань  $\Delta d = d_2 - d_1$  називають **геометричною різницею ходу хвиль**.

Коли хвилі надходять у точку  $M$  в однаковій фазі, то в точці  $M$ увесь час спостерігаються коливання зі збільшеною амплітудою — **інтерференційний максимум** (рис. 30.1, б). Це відбудеться за умови, що на відрізку  $\Delta d$  укладатиметься будь-яке ціле число довжин хвиль (парне число півхвиль).

**Умова інтерференційного максимуму:** в даній точці простору відбувається посилення результуючих світлових коливань, якщо різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять у цю точку, дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):

$$\Delta d = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2},$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі;  $k$  — ціле число.

Коли хвилі надходять у точку  $M$  у протилежних фазах, вони **гаситимуть одну одну** (рис. 30.1, в) — у точці  $M$  спостерігається **інтерференційний мінімум**. Це відбудеться за умови, що на відрізку  $\Delta d$  укладатиметься непарне число півхвиль.

**Умова інтерференційного мінімуму:** в даній точці простору відбувається послаблення результуючих світлових коливань, якщо різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять у цю точку, дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta d = (2k+1) \frac{\lambda}{2},$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі;  $k$  — ціле число.

### Зверніть увагу!

Розв'язуючи задачі, слід враховувати, що довжина  $\lambda$  світлової хвилі в середовищі менша від довжини  $\lambda_0$  світлової хвилі у вакуумі в  $n$  разів:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

де  $n$  — абсолютний показник заломлення середовища.

### 3 Як спостерігати інтерференцію світла

Якщо в кімнаті ввімкнути додаткове джерело світла, то освітленість посилюється в будь-якій точці кімнати (інтерференція не спостерігається). Чому так? Річ у тім, що *спостерігати інтерференційну картину від двох незалежних джерел світла (за винятком лазерів) неможливо*. Причина в тому, що атоми випромінюють світло короткими імпульсами, тривалістю порядку  $10^{-8}$  с. Фази хвиль, випромінюваних окремими атомами, хаотично змінюються. Отже, інтерференційна картина від двох незалежних джерел світла змінюється кожні  $10^{-8}$  с. Через інерційність зору людина не може зафіксувати такі швидкі зміни інтерференційної картини (зорові відчуття на сітківці зберігаються протягом 0,1 с).

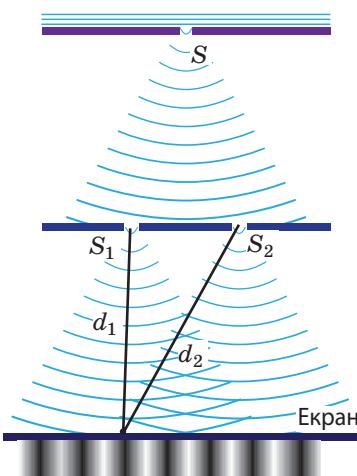
Для одержання когерентних хвиль один із засновників хвильової оптики *Томас Юнг* використав дві вузькі щілини ( $S_1$  і  $S_2$ ), які були розташовані на відстані 1 мм одна від одної і на які потрапляло світло від *одного джерела* (рис. 30.2). Джерелом слугувала ще одна щілина —  $S$ . Відповідно до принципу Гюйгенса кожна щілина ( $S_1$  і  $S_2$ ) після потрапляння світла ставала джерелом вторинних хвиль. Ці хвилі були когерентні, оскільки насправді надходили від одного джерела ( $S$ ) і мали певну різницю ходу  $\Delta d$  (йшли до екрана, розташованого на відстані 3 м, різними шляхами). Якщо для якоїсь точки екрана різниця ходу  $\Delta d$  дорівнювала парному числу півхвиль, то в цій точці спостерігався максимум освітленості, якщо непарному — мінімум освітленості. Тобто Юнг спостерігав на екрані *інтерференційну картину*: чергування світлих і темних смуг у випадку монохроматичного світла та чергування райдужних смуг у випадку білого світла.



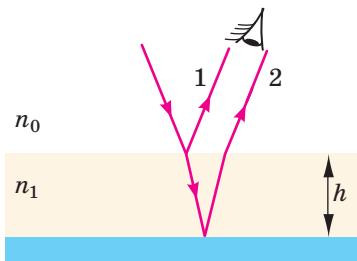
А чому світлові пучки, що йшли від щілин, розширювались (див. рис. 30.2)? (Згадайте дифракцію механічних хвиль.)

### 4 Інтерференція на тонких плівках

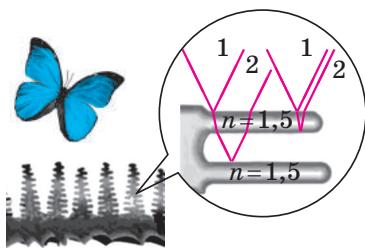
Із проявами інтерференції світла ми часто зустрічаємося, спостерігаючи освітлення тонкої прозорої плівки (рис. 30.3). Світлова



**Рис. 30.2.** Класичний дослід Юнга — розділення пучка світла на два когерентні пучки: щілина  $S$  — джерело світла; щілини  $S_1$  і  $S_2$  — вторинні когерентні джерела світла. У реальному досліді відстань між щілинами  $S_1$  і  $S_2$  набагато менша, ніж відстань від цих щілин до екрана



**Рис. 30.3.** Розділення пучка світла на два когерентні пучки на тонкій прозорій плівці;  $n_0$  — показник заломлення повітря,  $n_1$  — показник заломлення плівки,  $h$  — товщина плівки



**Рис. 30.4.** Розділення пучка світла на два когерентні пучки на крильцях метелика

хвиля частково відбувається від зовнішньої поверхні плівки (хвиля 1), частково проходить через плівку і, відбившись від її внутрішньої поверхні, повертається в повітря (хвиля 2). Оскільки хвиля 2 проходить більшу відстань, ніж хвиля 1, між ними існує різниця ходу.

Обидві хвилі когерентні, адже створені одним джерелом, тому в результаті їх накладання спостерігається стійка інтерференційна картина. Якщо хвиля 2 відстає від хвилі 1 на парне число півхвиль, то спостерігається посилення світла (інтерференційний максимум), якщо на непарне — послаблення світла (інтерференційний мінімум). Саме інтерференцією світла зумовлений колір багатьох комах (рис. 30.4).

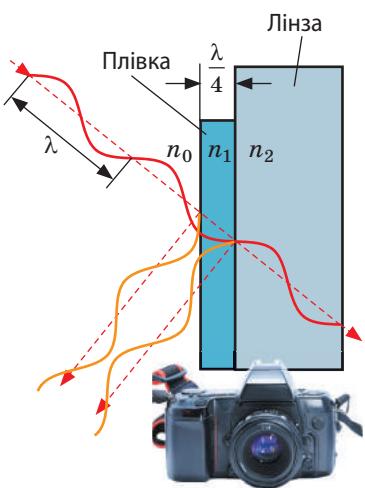
Біле світло поліхроматичне (складається з хвиль різної довжини), тому для посилення світлового випромінювання різного кольору потрібна різна товщина плівки: якщо плівка різної товщини освітлюється білим світлом, то вона виявляється райдужно забарвленою (райдужні мильні бульбашки, райдужна масляна плівка на поверхні води). Крім того, різниця ходу хвиль залежить від кута падіння світла на плівку (зі збільшенням кута падіння різниця ходу збільшується), тому тонкі плівки переливаються — змінюють колір, коли змінюється кут, під яким ми дивимося на плівку.

*Зверніть увагу:* якщо товщина плівки в кілька разів більша за довжину світлової хвилі, то інтерференційні смуги розташовані надто близько й око не здатне їх розділити — смуги збігаються, і ми бачимо біле світло.

## 5 Застосування інтерференції

Інтерференцію на тонких плівках застосовують для просвітлення оптики. Цей метод був відкритий українським фізиком Олександром Теодоровичем Смакулою (1900–1983) у 1935 р.

В оптичних системах, які містять кілька лінз, унаслідок відбиття може втрачатися до 40 % енергії світла. Щоб знизити втрати, на поверхню лінз наносять тонку плівку, показник заломлення якої менший від показника заломлення матеріалу, з якого виготовлено лінзи (рис. 30.5). Товщину  $h$  плівки добирають



**Рис. 30.5.** Просвітлення оптики. Товщину плівки добирають такою, щоб за нормальному падіння світла повне гасіння відбувалося для хвиль середньої частини спектра, до яких око людини найбільш чутливе. Саме тому просвітлена оптика зазвичай має бузковий колір, адже найбільше відбуваються хвилі червоної та фіолетової частин спектра

таким чином, щоб різниця ходу  $\Delta d$  променів, відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, дорівнювала півхвилі:

$$\Delta d = 2h = \frac{\lambda}{2},$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі в плівці.

У такому разі у відбитому світлі виконується умова мінімуму (відбиті промені гаситимуться) і через лінзу проходитиме більше світла.

За допомогою інтерференції оцінюють якість шліфування поверхні виробу (рис. 30.6). Для цього між поверхнею зразка (1) і дуже гладенькою еталонною пластинкою (2) створюють повітряний прошарок (рис. 30.6, а). У разі освітлення пластин монохроматичним світлом на тонкому повітряному клині між зразком і пластинкою утворюється інтерференційна картина у вигляді світлих і темних смуг. Якість шліфування визначають за формую смуг: наявність нерівності навіть порядку  $10^{-8}$  м спричиняє викривлення інтерференційних смуг (рис. 30.6, в).

Першим цей метод застосував І. Ньютон. Використовуючи невелику еталонну лінзу, він домігся майже ідеального шліфування великих лінз і дзеркал. Роль плівки виконував повітряний прошарок між шліфувальною поверхнею й еталонною лінзою (рис. 30.7, а). Інтерференційна картина, яка виникала, мала вигляд райдужних концентричних кілець, що отримали назву *кільця Ньютона* (рис. 30.7, б). Якщо лінзу освітити монохроматичним світлом, інтерференційна картина матиме вигляд світлих і темних концентричних кілець (рис. 30.7, в).



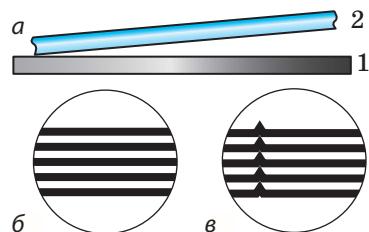
Що спостерігав І. Ньютон, якщо на поверхні, яку він шліфував, були нерівності?

Для точних вимірювань коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, показників заломлення речовин, для виявлення досить малих концентрацій домішок у газах і рідинах та ін. використовують *інтерферометри* — надточні вимірювальні прилади, принцип дії яких ґрунтуються на явищі інтерференції світла.

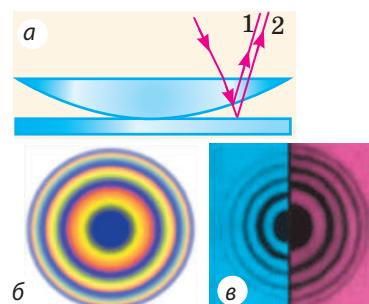
## 6

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте товщину плівки на поверхні лінзи, якщо плівка розрахована на максимальне гасіння світлової хвилі довжиною 555 нм (див. рис. 30.3). Абсолютний показник заломлення плівки — 1,231.



**Рис. 30.6.** Перевірка якості шліфування за допомогою інтерференції. Якщо зразок (1) гладенький, то інтерференційні смуги паралельні (б); якщо ж на поверхні зразка є подряпина — інтерференційні смуги викривлені в бік збільшення товщини повітряного клину (в)



**Рис. 30.7.** Розділення пучка світла на два когерентні пучки на повітряному проміжку між лінзою та скляною пластинкою (а). Кільця Ньютона при освітлюванні лінзи білим світлом (б); монохроматичним світлом (синім, червоним) (в)

**Дано:**

$$\lambda_0 = 555 \text{ нм}$$

$$n = 1,231$$

 **$h = ?$** 

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* Хвилі, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, мають гасити одна одну, тому різниця їхнього ходу відповідатиме умові мінімуму:  $\Delta d = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$ .

Оскільки в процесі просвітлення оптики намагаються використовувати якомога тонші плівки, то найменша товщина плівки відповідатиме умові:  $\Delta d = \frac{\lambda}{2}$ .

Довжина хвилі у плівці менша від довжини хвилі у вакуумі в  $n$  разів:  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ .

Плівки розраховують для  *нормальногопадіння світла*, тому різниця ходу дорівнює подвійній товщині плівки:  $\Delta d = 2h$ . Остаточно маємо:  $2h = \frac{\lambda_0}{2n} \Rightarrow h = \frac{\lambda_0}{4n}$ .

Знайдемо значення шуканої величини:  $h = \frac{555 \text{ нм}}{4 \cdot 1,231} \approx 113 \text{ нм}$ .

*Відповідь:*  $h \approx 113 \text{ нм}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Для світла, як і для будь-яких інших хвиль, є характерним явище інтерференції — явище накладання хвиль, унаслідок якого в деяких точках простору спостерігається стійке в часі посилення (або послаблення) результатуючих коливань.
- Стійку інтерференційну картину можна спостерігати лише у випадку когерентних хвиль, тобто таких, які мають однакову частоту і незмінну різницю початкових фаз. Одержані когерентні світлові хвилі можна, якщо пучок світла від одного монохроматичного джерела розділити на два пучки, які спрямовуються різними шляхами. Когерентними є також хвилі, створені лазерами.
- Умова інтерференційних максимумів: різниця ходу хвиль дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):  $\Delta d = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2}$ .
- Умова інтерференційних мінімумів: різниця ходу хвиль дорівнює непарному числу півхвиль:  $\Delta d = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$ .
- На практиці інтерференцію використовують для просвітлення оптики; перевірки якості шліфування поверхонь виробів і якості виготовлення лінз; здійснення точних вимірювань.



### Контрольні запитання

1. Дайте означення інтерференції.
2. Які хвилі називають когерентними?
3. Назвіть умову інтерференційного максимуму й умову інтерференційного мінімуму.
4. Чому в оптичному діапазоні важко створити джерела когерентних хвиль?
5. Які властивості має лазерне випромінювання?
6. Опіштий дослід Т. Юнга з отримання когерентних світлових хвиль. У чому суть його методу?
7. Чому тонкі плівки мають райдужне забарвлення?
8. У чому полягає метод просвітлення оптики за допомогою інтерференції?
9. Як за допомогою інтерференції перевірити якість шліфування поверхонь виробів?
10. Назвіть приклади виникнення інтерференційних картин у природі.



### Вправа № 30

- Чи можна спостерігати інтерференцію світлових хвиль, які випромінюють дві електричні лампи? дві свічки? дві лазерні указки?
- Чому крильця бабки переливаються? Що можна сказати про товщину її крилець? Чому переливається внутрішня (перламутрова) частина мушлі?
- Максимум чи мінімум інтерференції буде спостерігатися в точці  $M$ , якщо різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять у цю точку, дорівнює  $0$ ? дорівнює  $3\lambda$ ? дорівнює  $\lambda/2$ ?
- У деяку точку надходять дві когерентні світлові хвилі з геометричною різницею ходу  $1,2 \text{ мкм}$ . Довжина хвиль у вакуумі —  $600 \text{ нм}$ . Визначте, посилення чи послаблення світла відбувається в точці, якщо світло поширюється у вакуумі; повітрі; воді; алмазі.
- Прозора скляна пластина завтовшки  $0,3 \text{ мкм}$  освітлюється пучком монохроматичного світла довжиною  $600 \text{ нм}$ , який падає перпендикулярно до поверхні пластини. Показник заломлення пластини —  $1,5$ . Максимум чи мінімум інтерференції буде спостерігатися, якщо дивитися на пластину: а) у прохідному світлі (рис. 1)? б) у відбитому світлі (рис. 2)? *Зверніть увагу:* якщо світло відбивається від межі із середовищем більшої оптичної густини, то виникає додаткова різниця ходу  $\lambda/2$ .
- Серед різноманітних практичних застосувань інтерференції світла одним із найцікавіших є *голографія*. Дізнайтесь, у чому суть голографії, як створюють голограму, які її особливості.

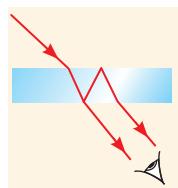


Рис. 1

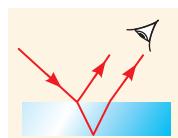


Рис. 2



### Експериментальне завдання

У невеликій посудині приготуйте мильний розчин. Виготовте з дроту невелику рамку та занурте її в розчин. Обережно витягніть рамку з розчину і спостерігайте мильну плівку, що утворилася на рамці. Зарисуйте або сфотографуйте картину, яку ви спостерігаєте, та поясніть її походження.

### Фізика і техніка в Україні



**Олександр Теодорович Смакула** (1900–1983) — видатний український фізик і винахідник. Використавши поняття квантових осциляторів, О. Т. Смакула зміг пояснити радіаційне забарвлення кристалів і вивести кількісне математичне спiввiдношення, вiдоме в науцi як *формула Смакули*. Працi вченого створили передумови для синтезу вiтамiнiв A, B2 та iн., а процес трансформацiї кристалiчного вуглецю називають тепер *iнверсiєю Смакули*.

У 1935 р. О. Т. Смакула зробив вiдкриття, завдяки якому його iм'я назавжди залишиться в iсторiї науки, — спосiб полiпшення оптичних пристрoїв (*просвiтлення оптики*). Суть вiдкриття в тому, що поверхню лiнзи вкривають шаром спецiального матерiалу завтовшки  $1/4$  довжини падаючої хвилi (десятi частки мiкрометра), що значно зменшує вiдбивання свiтла вiд поверхнi лiнзи i водночас збiльшує контрастнiсть зображення. Це вiдкриття стало великим здобутком, адже лiнзи є основним елементом бiльшостi оптичних пристрoїв (фотоапаратiв, бiноклiв, мiкроскопiв тощо).

2000 р. був оголошений ЮНЕСКО роком О. Т. Смакули.

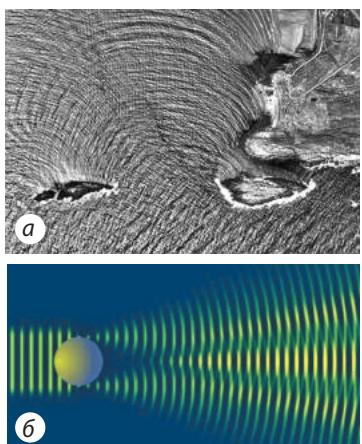


## § 31. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

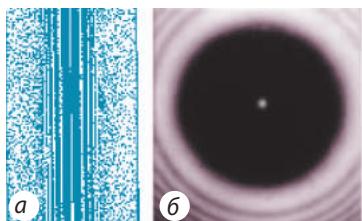


Космічний апарат «Voyager 1»  
уже понад 40 років  
подорожує в космосі

Описуючи дію оптичних пристройів, ми користувалися законами геометричної оптики. Здавалося б, відповідно до цих законів, за допомогою мікроскопів можна розрізняти якнайдрібніші деталі, а за допомогою телескопів — спостерігати найвіддаленіші об'єкти. Але це не так. Отримати чіткі зображення дуже віддалених об'єктів ми можемо лише завдяки космічним апаратам, а «розглянути» дуже дрібні частинки — лише за допомогою електронного мікроскопу, адже нам «заважає» дифракція. Згадаємо, в чому полягає це явище.



**Рис. 31.1.** Дифракція механічних хвиль на отворі (а); на перешкоді (б). На деякій відстані від перешкоди хвилі, накладаючись одна на одну, створюють дифракційну картину



**Рис. 31.2.** Дифракція світлових хвиль на різних перешкодах:  
на тонкому дроті (а); на невеликому непрозорому круглому екрані (б)

### 1

#### Чи може світло обгинати перешкоди

Ми добре чуємо сигнал машини, розташованої за рогом будинку, адже звукові хвилі, як і будь-які інші, можуть обгинати перешкоди.

Явище обгинання хвильами перешкод або будь-яке інше відхилення поширення хвилі від законів геометричної оптики називають **дифракцією** (від латин. *diffractus* — розломлений) (рис. 31.1).

Дифракція властива будь-яким хвильам незалежно від їхньої природи і спостерігається у двох випадках:

1) коли лінійні розміри перешкод, на які падає хвilia (або розміри отворів, через які хвilia поширюється), порівнянні з довжиною хвилі;

2) коли відстань від перешкоди до місця спостереження набагато більша за розмір перешкоди.

Хвилі, що обгибають перешкоду, когерентні, тому дифракція завжди супроводжується інтерференцією. *Інтерференційну картину, отриману внаслідок дифракції, називають дифракційною картиною* (див. рис. 31.1).

Оскільки світло є хвилею, в разі виконання зазначених вище умов можна спостерігати і дифракцію світла. Але світло — це дуже коротка хвilia (400–760 нм), тому дифракцію на предметі розміром, наприклад, 10 см можна помітити лише на відстанях у декілька кілометрів. Якщо ж розміри перешкоди менші за 1 мм, дифракцію можна спостерігати й на відстанях у кілька метрів.

**Дифракцією світла** називають обгинання світловими хвилями межі непрозорих тіл і проникнення світла в ділянку геометричної тіні.

На рис. 31.2 показано, який вигляд мають дифракційні картини від різних перешкод, що освітлюються монохроматичним світлом. Бачимо, що тінь від тонкого дроту з обох боків оточена світлими і темними смугами, а в центрі тіні розташована світла смуга (рис. 31.2, а). Тінь від невеликого непрозорого круглого екрана (рис. 31.2, б) оточена світлими і темними концентричними кільцями; у центрі тіні — світла кругла пляма (пляма Пуассона).

Так само оточена світлими і темними кільцями кругла пляма світла, якщо світло надходить від потужного точкового джерела і проходить крізь невеликий круглий отвір (рис. 31.3); зменшуючи діаметр отвору, можна отримати в центрі картини й темну пляму.

Якщо освітлювати перешкоду або отвір пучком білого світла, то на дифракційній картині замість темних і світлих смуг будуть райдужні смуги, які легко побачити, дивлячись на джерело світла крізь клаптик капрону або крізь вії. Подібні дифракційні картини досить часто спостерігаються й у природі (рис. 31.4).

## 2 Принцип Гюйгенса — Френеля

Кількісну теорію дифракції світла побудував франузький фізик *Огюстен Жан Френель* (1788–1827), сформулювавши принцип, який із часом отримав назву **принцип Гюйгенса — Френеля**:

Кожна точка хвильової поверхні є джерелом вторинної хвилі, ці вторинні хвилі є когерентними; хвильова поверхня в будь-який момент часу є результатом інтерференції вторинних хвиль.

Якщо на вузьку щілину падає плоска світлова хвиля, то на екрані, який розташований на досить великій відстані від щілини, можна спостерігати дифракційну картину (рис. 31.5). Пояснимо її появу, користуючись принципом Гюйгенса — Френеля.

Згідно з цим принципом, освітлену щілину можна розглядати як велику кількість

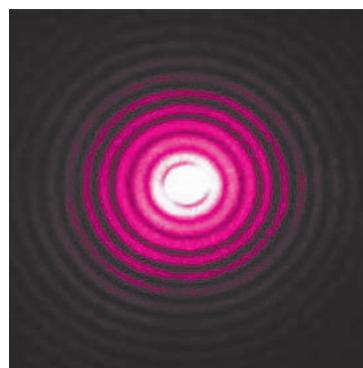


Рис. 31.3. Дифракційна картина від невеликого круглого отвору



Рис. 31.4. Природне явище «сяйво Будди» виникає внаслідок дифракції світла на дрібненьких крапельках води, коли сонячне світло пробивається крізь туман або хмару

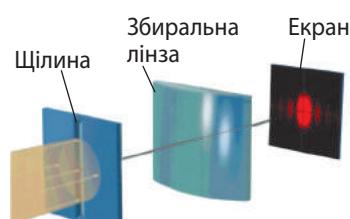
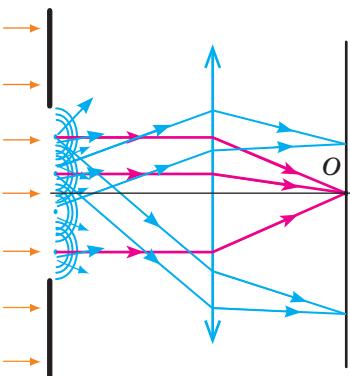
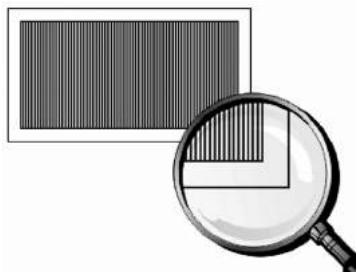


Рис. 31.5. Дифракція паралельного пучка світла на вузькій щілині. Збиральну лінзу розміщено для збирання паралельних променів в одній точці



**Рис. 31.6.** Хід променів після дифракції паралельного пучка світла на вузькій щіліні



**Рис. 31.7.** Пласка дифракційна ґратка

вторинних джерел світла, від кожного з яких в усіх напрямках поширяються когерентні хвилі (рис. 31.6). Різниця ходу вторинних хвиль, щопадають перпендикулярно до екрана (на рис. 31.6 ці хвилі позначені червоним), дорівнює нулю (лінза не дає додаткової різниці ходу). Тому всі вторинні хвилі, що потрапляють у точку  $O$ , посилюють одна одну. Для інших точок екрана різниця ходу падаючих хвиль уже не дорівнюватиме нулю, тому в цих точках можуть спостерігатися інтерференційні максимуми або мінімуми, створюючи дифракційну картину.

### 3

## Дифракційна ґратка

Дифракційна картина від плоскої хвилі спостерігається тільки якщо ширина щілини є в багато разів меншою, ніж відстань до екрана. За цієї умови на екран потрапляє дуже мало світла. Щоб отримати яскравішу дифракційну картину, використовують *дифракційну ґратку*.

**Дифракційна ґратка** — це оптичний пристрій, дія якого заснована на явищі дифракції світла і який являє собою сукупність великої кількості паралельних штрихів, нанесених на певну поверхню на однаковій відстані один від одного (рис. 31.7).

На якісні дифракційні ґратки штрихи наносять алмазним різцем спеціальні ділильні машини. Кількість штрихів сягає 2000 на 1 мм.

Існують *відбивні* і *прозорі дифракційні ґратки*. На відбивних ґратках штрихи нанесено на дзеркальну (металеву) поверхню, на прозорих ґратках — на скляну поверхню. Найпростіші прозорі дифракційні ґратки виготовляють із желатину, затискаючи його між двома скляними дифракційними ґратками (виготовляють желатиновий зліпок).

На металевих ґратках спостереження проводять тільки у відбитому світлі, на скляних — найчастіше в прохідному світлі, на желатинових — тільки в прохідному світлі.

Загальну ширину  $d$  непрозорої та прозорої ділянок дифракційної ґратки називають **періодом ґратки або сталою ґратки**:

$$d = a + D = \frac{l}{N},$$

де  $a$  — ширина непрозорої ділянки (у прозорих ґратках) або смуги, що розсіює світло (у відбивних ґратках);  $D$  — ширина прозорої ділянки (або смуги, що відбиває світло) (див. рис. 31.8);  $N$  — кількість штрихів на відрізку довжиною  $l$ .

Розглянемо, як «працює» дифракційна гратка у прохідному світлі.

Якщо на гратку падає плоска світрова хвиля, то кожна щілина стає джерелом вторинних хвиль, які є когерентними і поширюються в усіх напрямках. Якщо на шляху цих хвиль розмістити збиральну лінзу, то промені, паралельні один одному, збиратимуться на екрані, розташованому у фокальній площині лінзи (рис. 31.8).

Із рис. 31.8 бачимо, що різниця ходу  $\Delta d$  для двох хвиль, що поширюються від сусідніх щілин під кутом  $\varphi$ , дорівнює:  $\Delta d = d \sin \varphi$ . Щоб у точці екрана спостерігався інтерференційний максимум, різниця ходу  $\Delta d$  має дорівнювати цілому числу довжин хвиль:  $\Delta d = k\lambda$ .

Звідси маємо формулу дифракційної гратки:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

де  $k$  — ціле число:  $k=0$  — відповідає центральному (нульовому) максимуму ( $\Delta d=0$ ),  $k=\pm 1$  — відповідає максимумам першого порядку ( $\Delta d=\lambda$ ) і т. д. Максимуми одного порядку розташовані симетрично з обох боків від центрального максимуму.

*Зверніть увагу!*

- Кут  $\varphi$ , за якого спостерігається інтерференційний максимум, залежить від довжини хвилі, тому *дифракційні гратки розкладають неменохроматичне світло у спектр*. Такий спектр називають *дифракційним* (рис. 31.9).
  - Довжина хвилі червоного кольору більша за довжину хвилі фіолетового кольору, тому *в дифракційному спектрі червоні лінії розташовані далі від центрального максимуму, ніж фіолетові*.
  - Для центрального максимуму різниця ходу хвиль будь-якої довжини дорівнює нулю, тому він завжди має колір світла, що освітлює гратку.
  - Вимірюючи кут  $\varphi$ , за якого спостерігається інтерференційний максимум  $k$ -го порядку, і знаючи період дифракційної гратки, можна виміряти довжину світлової хвилі, що падає на гратку:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$$



Рис. 31.9. Дифракційний спектр

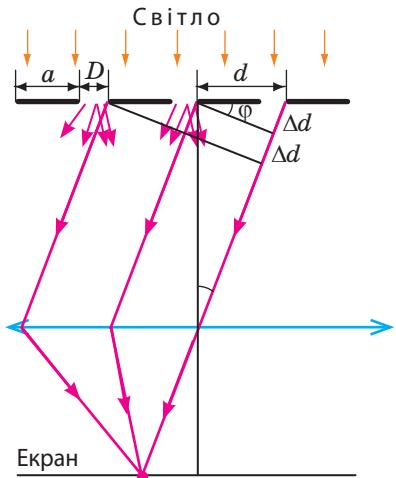


Рис. 31.8. Схема ходу променів під час дифракції плоскої світлової хвилі на прозорій дифракційній гратці.

$a$  — ширина непрозорої ділянки;  $D$  — ширина прозорої ділянки;  $d$  — період гратки — загальна ширина непрозорої та прозорої ділянок

**4****Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** На дифракційну ґратку, що містить 200 штрихів на 1 мм, падає плоска монохроматична хвиля довжиною 500 нм. Визначте: а) кут, за якого спостерігається максимум другого порядку; б) найбільший порядок спектра, який можна спостерігати за нормальногопадіння променів на ґратку.

**Дано:**

$$N = 200$$

$$l = 10^{-3} \text{ м}$$

$$\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$k = 2$$

$$\varphi = ?$$

$$k_{\max} = ?$$

**Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.**

Формула дифракційної ґратки має вигляд:  $d \sin \varphi = k\lambda$ , де  $d = \frac{l}{N}$ .

Звідси маємо:  $\sin \varphi = \frac{Nk\lambda}{l}$ . Максимальному  $k$  відповідає  $\sin \varphi = 1$ , отже,  $k_{\max} = \frac{d}{\lambda} = \frac{l}{N\lambda}$ .

Знайдемо значення шуканих величин:

$$\sin \varphi = \frac{200 \cdot 2 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{10^{-3} \text{ м}} = 0,20, \text{ звідси } \varphi \approx 0,20 \text{ рад};$$

$$k_{\max} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{200 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 10.$$

**Відповідь:** а)  $\varphi \approx 0,20$  рад; б)  $k_{\max} = 10$ .

**Підбиваємо підсумки**

- Дифракцією світла називають обгинання світловими хвилями межі непрозорих тіл і проникнення світла в ділянку геометричної тіні.
- Кількісну теорію дифракції світла побудував О. Френель, сформулювавши принцип, який із часом отримав назву «принцип Гюйгенса — Френеля»: кожна точка хвильової поверхні є джерелом вторинної хвилі, ці вторинні хвилі є когерентними; хвильова поверхня в будь-який момент часу є результатом інтерференції вторинних хвиль.
- Дифракційна ґратка — це спектральний пристрій, що має вигляд періодично розташованих щілин і слугує для розкладання світла у спектр і для вимірювання довжини хвилі. Головна характеристика ґратки — період (стало) ґратки  $d$ , що дорівнює відстані між двома сусідніми щілинами.
- Формула дифракційної ґратки:  $d \sin \varphi = k\lambda$ , де  $\varphi$  — кут, за якого спостерігаються максимуми  $k$ -го порядку для плоскої світлової хвилі довжиною  $\lambda$ , яка падає перпендикулярно до поверхні ґратки.

**Контрольні запитання**

1. Дайте означення дифракції.
2. За яких умов спостерігається дифракція?
3. Чому в повсякденному житті ми нечасто спостерігаємо дифракцію світла?
4. Сформулюйте принцип Гюйгенса — Френеля.
5. Опишіть дифракційні картини від різних перешкод.
6. Що таке дифракційна ґратка? Яка фізична величина її характеризує?
7. Які фізичні величини пов'язує формула дифракційної ґратки?

**Вправа № 31**

1. Чому навіть у потужний телескоп ми не можемо побачити предмети на поверхні Місяця?
2. Дифракційна ґратка має 50 штрихів на 1 мм. Визначте період ґратки.

3. На дифракційну ґратку, що має 250 штрихів на 1 мм, падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 550 нм. За якого кута видно перший дифракційний максимум? Скільки всього дифракційних максимумів дає ґратка?
4. Для вимірювання довжини світловової хвилі застосовано дифракційну ґратку, що має 1000 штрихів на 1 мм. Максимум першого порядку на екрані отримано на відстані 24 см від центрального максимуму. Визначте довжину хвилі, якщо відстань від дифракційної ґратки до екрана 1 м.
5. Дифракційна ґратка, що має 200 штрихів на 1 мм, розташована на відстані 2 м від екрана. На ґратку падає біле світло, максимальна довжина хвилі якого 720 нм, мінімальна — 430 нм. Яка ширина спектра першого порядку?

## § 32. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА. ПОЛЯРОЇДИ\*

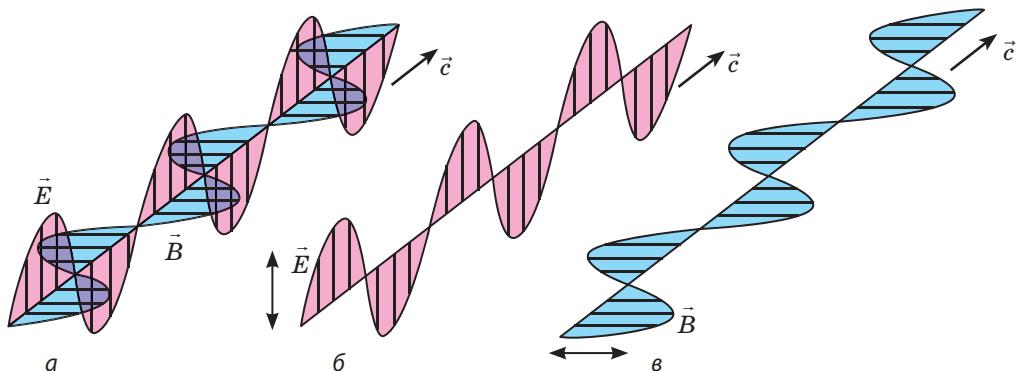


Око людини здатне сприймати дві важливі характеристики світла: *колір* (довжину світловової хвилі) і *рівень освітленості* (енергію світловової хвилі). Світло має і третю характеристику — *ступінь поляризації*, яку око людини, на відміну, наприклад, від ока бджоли, сприймати не здатне. *Виявлення поляризації світла однозначно доводить, що світло — це поперечна хвиля.*

### 1 Чи поляризоване природне світло

Світлова хвиля характеризується *вектором напруженості*  $\vec{E}$  і *вектором магнітної індукції*  $\vec{B}$ , які коливаються у взаємно перпендикулярних площинах. Площину, в якій коливається вектор напруженості  $\vec{E}$ , називають *площиною коливань*. Площину, в якій здійснює коливання вектор магнітної індукції  $\vec{B}$ , називають *площиною поляризації*.

Окремо взяті молекула або атом випромінюють електромагнітну хвилю, для якої площа коливання вектора  $\vec{E}$ , а отже, і площа коливання вектора  $\vec{B}$  є чітко фіксованими (рис. 32.1). Проте будь-яке світле тіло складається з величезної кількості частинок. Випромінювання кожної з них

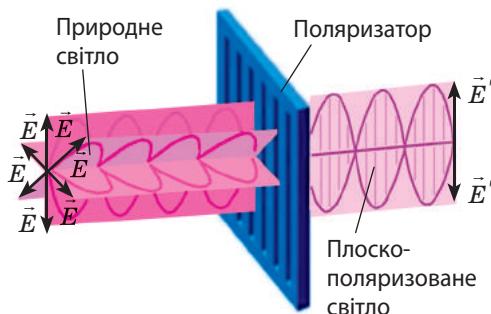


**Рис. 32.1.** Світлова хвиля, випромінювана окремим атомом (a). Площини коливань вектора  $\vec{E}$  (б) і вектора  $\vec{B}$  (в) є фіксованими

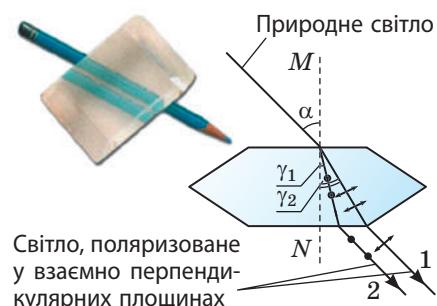
\* Цей параграф не є обов'язковим для вивчення.

зазвичай не пов'язане з випромінюванням сусідніх частинок, тому площини коливань різних векторів  $\vec{E}$  не залежать одна від одної. У сумарному випромінюванні, що випускається світним тілом, безліч різноманітно орієнтованих площин коливань, а от середня амплітуда коливань векторів  $\vec{E}$  в будь-якій площині однакова. Таке світло називають **природним** або **неполяризованим**. Прикладами неполяризованого світла є сонячне випромінювання, випромінювання ламп розжарювання, ламп денного світла тощо.

Якщо на шляху природного світла поставити **поляризатор** — пристрій, що пропускає світлові хвилі лише в певній площині коливань векторів  $\vec{E}$ , то у світлі, що пройшло крізь поляризатор, коливання векторів  $\vec{E}'$  відбуваються тільки в цій певній площині, яка перпендикулярна до напрямку поширення хвилі (рис. 32.2). Таке світло називається **плоскополяризованим** або **лінійно поляризованим** (окрім лінійної існують й інші види поляризації, проте ми їх не розглядаємо).



**Рис. 32.2.** У плоскополяризованому світлі коливання вектора  $\vec{E}$  відбуваються лише в одній площині



**Рис. 32.3.** Подвійне променезаломлення природного світла в монокристалі ісландського шпату.  $MN$  — оптична вісь кристала (світло, напрямлене вздовж оптичної осі, не заломлюється і не роздвоюється)

## 2

### Як отримати поляризоване світло

Розглянемо деякі приклади поляризації світла.

1. Ще наприкінці XVII ст. було виявлено, що монокристал ісландського шпату роздвоює пучки світла, які проходять крізь нього. Це явище, яке можна спостерігати в більшості монокристалів, дістало назву **подвійного променезаломлення** (рис. 32.3). Спроба одержати інтерференційну картину шляхом накладання двох заломлених пучків не дає результату, хоча ці пучки когерентні. Цей факт пояснюється тим, що заломлені пучки поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах: у пучку 1 коливання вектора  $\vec{E}$  відбуваються в площині поширення світла (позначено стрілками); в пучку 2 — в площині, яка перпендикулярна до площини поширення світла (позначено точками).

2. Якщо з монокристала турмаліну вздовж його оптичної осі вирізати пластину, то вона буде пропускати лише ті світлові хвилі, вектор напруженості яких паралельний оптичній осі кристала. Побачити це можна за допомогою ще одної такої самої пластини, обертаючи її в площині, паралельній першій пластині.

У міру збільшення кута між оптичними осями кристалів інтенсивність світла, що проходить крізь пластиини, зменшуватиметься. Коли осі кристалів встановляться перпендикулярно одна до одної, світло не пройде зовсім — воно поглинеться. У цьому випадку перша пластина виконує функції поляризатора, а друга — аналізатора: поляризатор виділяє з природного світла пучок з однією площину коливань вектора  $\vec{E}$ , аналізатор визначає площину, в якій відбуваються коливання в поляризованому пучку (рис. 32.4). **Поляризатори й аналізатори мають спільну назву — поляроїди.**

На практиці як поляроїди використовують спеціальні плівки, що наносять на скляну або целулозну пластиинку, наприклад плівки з кристаликів герапатиту.

3. Світло завжди частково поляризується при відбиванні та заломленні на поверхні діелектрика. У відбитої хвилі вектор  $\vec{E}$  переважно перпендикулярний до площини падіння, а в заломленої — лежить у площині падіння.

**Закон Брюстера**\*: для кожної пари прозорих середовищ існує кут падіння  $\alpha_B$ , за якого відбите світло стає повністю плоскополяризованим:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21},$$

де  $n_{21}$  — показник заломлення середовища 2 відносно середовища 1.

Цей кут падіння називають *кутом Брюстера* (рис. 32.5). За кута Брюстера відбитий і заломлений промені взаємно перпендикулярні.

Поляризованість відбитого світла (наприклад, відблисків на поверхні води або скляних вітрин) визначає методи боротьби з цим явищем. Якщо дивитися на відблиск крізь поляроїдний фільтр, то, обертаючи цей фільтр, неважко підібрати такий кут, за якого відблиск повністю або майже повністю зникає. Використання поляроїдних фільтрів у фотографії, для виготовлення сонцептажисних окулярів, вітрового скла дозволяє загасити сліпучі відблиски від скляних вітрин, поверхні води або вологого шосе.

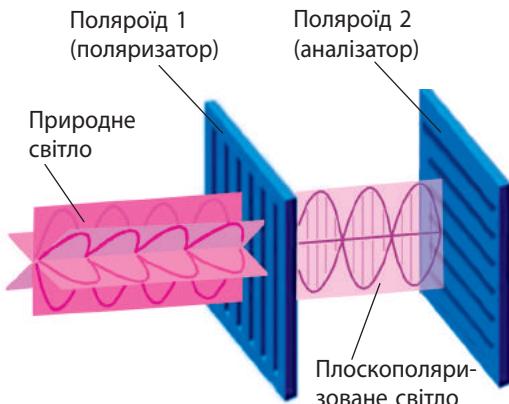


Рис. 32.4. Схема дії поляризатора й аналізатора

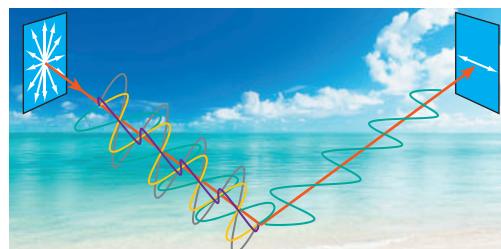


Рис. 32.5. Якщо світло падає на поверхню води під кутом, що дорівнює куту Брюстера, відбите світло буде повністю поляризованим у площині, яка перпендикулярна до площини поширення світла

\* На честь шотландського фізика Девіда Брюстера (1781–1868), який установив цей закон у 1815 р.



## Підбиваємо підсумки

- Світло, у якого вектори напруженості  $\vec{E}$  коливаються в будь-якій площині, а середня амплітуда коливань у кожній площині однакова, називають природним або неполяризованим.
- Світло, у якого коливання векторів  $\vec{E}$  відбуваються тільки в одній площині, називають плоскополяризованим. Для поляризації світла використовують спеціальні пристрой — поляризатори.
- У випадку відбиття світла від поверхні діелектрика відбитий і заломлений промені завжди частково поляризовані. Кут падіння  $\alpha_B$ , за якого відбита хвиля є повністю поляризованою, називають кутом Брюстера і визначають за формулою  $\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21}$ , де  $n_{21}$  — відносний показник заломлення.

## Контрольні запитання



- Чому природне світло завжди неполяризоване?
- Яке світло називають плоскополяризованим?
- Наведіть приклади поляризації світла.
- Які функції виконують поляроїди і як залежно від цього вони називаються?
- Що таке кут Брюстера?
- З якою метою використовують поляроїдні фільтри?

## Вправа № 32



- Виберіть одну правильну відповідь. Поляризація світла доводить, що світло: а) здатне обгинати перешкоди; б) є електромагнітною хвилею; в) є поперечною хвилею; г) є поздовжньою хвилею.
- Одна з важливих задач світлотехніки — плавне регулювання освітленості. Існують декілька способів такого регулювання, наприклад зміна сили струму в лампах за допомогою реостата; пропускання світла через два поляроїди, один із яких може повертатися. У чому, на вашу думку, переваги і недоліки кожного із зазначених способів?
- Світло падає на поверхню скла під кутом  $60^\circ$ ; кут між відбитим і заломленим променями дорівнює  $90^\circ$ . Яким є показник заломлення цього сорту скла? Яку властивість має відбите світло?
- Під яким кутом до горизонту направлені сонячні промені, якщо, відбившись від поверхні води, вони виявляються повністю поляризованими?
- Водіям автомобілів відомо, яку небезпеку для руху може спричинити осліплення світлом фар зустрічних автомобілів. Запропонуйте спосіб захисту від осліплення, застосовуючи явище поляризації.
- Дізнайтесь, як застосовують поляризацію світла для визначення вмісту цукру в розчині; як «працюють» поляризаційні окуляри; як за допомогою поляроїдів дізнатися про розподіл механічних напруг у деформованому зразку.

## Експериментальне завдання



Для поляризації світла є механічна аналогія. Якщо взяти гумовий шнур і, розгойдуючи його кінець у різних напрямках, створити хвилю, то після проходження крізь щілину ця хвиля стане плоскополяризованою. Якщо на шляху плоскополяризованої хвилі поставити другу щілину, яка перпендикулярна до першої, хвиля зникне (див. [рисунок](#)). Проведіть подібний дослід.



## § 33. ФОРМУЛА ПЛАНКА. СВІТОВІ КВАНТИ



«...Ми знаємо, що світло — це хвильовий рух. Сумніватися в цих фактах більше неможливо, спростовувати ці погляди незбагненно для фізики...» — писав у 1889 р. Г. Герц. Наприкінці XIX ст. фізики не мали сумнівів у тому, що світло — це хвилі. Проте ми знаємо, що світло — це одночасно і хвилі, і частинка. А як зароджувалася наука про частинки світла? Які властивості мають ці частинки?

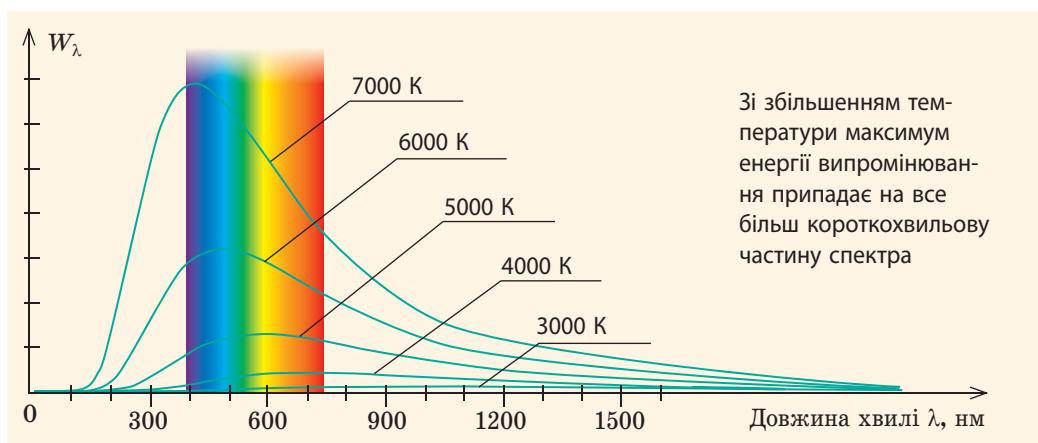
### 1 Зародження квантової теорії

Зародження квантової теорії пов'язане з установленням закономірностей випромінювання *абсолютно чорного тіла*.

**Абсолютно чорне тіло** — це фізична модель тіла, яке повністю поглинає будь-яке випромінювання, що падає на нього.

Неважаючи на називу, абсолютно чорне тіло може випромінювати світло. До випромінювання абсолютно чорного тіла близьке випромінювання багаття, нитки розжарення лампи, випромінювання більшості зір тощо. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла залежить лише від його температури. Експериментальні дослідження показали, що розподіл енергії випромінювання залежно від довжини хвилі має вигляд низки кривих (рис. 33.1). Але всі спроби вчених одержати універсальну формулу цієї залежності зазнавали поразки.

Восени 1900 р., зіставивши всі відомі на той час результати досліджень, німецький фізик Макс Планк (рис. 33.2) нарешті встановив формулу, яка повністю відповідала експериментальним кривим. Точніше, вчений цю формулу просто вгадав, він так і не зміг її вивести, спираючись на закони класичної електродинаміки Максвелла. Тому Планк був змушенний висунути *гіпотезу*, яка суперечила класичним уявленням про природу світла.



**Рис. 33.1.** Залежність енергії  $W_\lambda$  електромагнітних хвиль, випромінюваних за 1 с з одиниці площини поверхні абсолютно чорного тіла, від довжини  $\lambda$  хвилі. Графік показує, яка частина всієї енергії випромінювання припадає на хвилі певної довжини



**Рис. 33.2.** Макс Карл Ернст Людвіг Планк (1858–1947) — видатний німецький фізик-теоретик, засновник квантової теорії — сучасної теорії руху, взаємодії та взаємних перетворень мікрокопічних частинок

Фотон є безмасовою частинкою, проте світло в цілому (як потік фотонів) має масу. Так, для системи двох фотонів, які мають однакову енергію ( $E = h\nu$ ) і летять під кутом  $\theta$  один до одного, маса системи визначається співвідношенням:

$$M = \frac{2E}{c^2} \sin \frac{\theta}{2}.$$

Цей результат може здається дивним, адже маса кожного фотона дорівнює нулю, а  $0 + 0 = 0$ . Але річ у тім, що відповідно до законів теорії відносності маса не є адитивною величиною, тобто повна маса системи тіл не дорівнює сумі мас тіл, що утворюють цю систему.

### Гіпотеза Планка:

Випромінювання електромагнітних хвиль атомами і молекулами речовини відбувається не безперервно, а дискретно, тобто окремими порціями, енергія  $E$  кожної з яких прямо пропорційна частоті  $\nu$  випромінювання:

$$E = h\nu,$$

де  $h$  — стала величина.

Згодом «порції енергії» стали називати *квантами енергії*, а сталу  $h$  — *сталою Планка*. За сучасними даними, стала Планка дорівнює:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

### 2

### Знайомимось із властивостями фотонів

Щоб якось «примиритися» з класичними уявленнями про електромагнітну природу світла, М. Планк спочатку вирішив, що світло тільки випромінюється квантами, а поширюється й поглинається безперервно. Ситуація докорінно змінилася, коли Альберт Ейнштейн (1879–1955) розглянув властивості теплового випромінювання по-новому.

Використавши аналогію між відомими формулами для ідеального газу, Ейнштейн довів, що монохроматичне випромінювання малої густини поводиться так, ніби складається з  $N$  «незалежних один від одного квантів енергії», кожний з яких має енергію  $h\nu$ . Урешті-решт Ейнштейн дійшов висновку, що річ не просто у квантах енергії, а в реальних частинках, з яких складається будь-яке електромагнітне випромінювання. Згодом частинки світла (*кванти світла*) стали називати **фотонами**.

Згідно із сучасними уявленнями, **фотони мають такі властивості**:

1. *Заряд фотона дорівнює нулю*:  $q = 0$  — фотон є електрично нейтральною частинкою.
2. *Маса фотона дорівнює нулю*:  $m = 0$  — фотон є безмасовою частинкою.
3. *Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку, завжди дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі* ( $v_\phi = c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ) і повязана з частотою і довжиною відповідної світлової хвилі *формулою хвилі*:  $c = \lambda\nu$ .

**Зверніть увагу!** Не слід плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від атома до атома, поглинаються ними і знову випромінюються.

4. *Енергія фотона* прямо пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантам якого і є цей фотон:  $E = h\nu$ . У разі поглинання світла речовиною фотон передає всю енергію частинкам речовини.

5. *Імпульс фотона* дорівнює відношенню його енергії до швидкості руху та обернено пропорційний довжині хвилі фотона:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

6. *Фотони випромінюються* в разі переходу частинок речовини зі збудженого стану в стан із меншою енергією, в разі прискореного руху заряджених частинок, розпаду деяких частинок, анігіляції.

Наведені властивості фотонів були встановлені не відразу. На початку ХХ ст. навіть ідея існування частинок світла зустрічала різке неприйняття. Адже інтерференція і дифракція світла показували, що світло — це хвилі. Через 50 років після появи гіпотези М. Планка, коли існування фотонів уже не викликало сумнівів, А. Ейнштейн писав: «...після 50 років роздумів я так і не зміг наблизитися до відповіді на питання, що ж таке світловий квант».

### 3 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Споживана потужність електричної лампи розжарювання — 100 Вт. Скільки фотонів щосекунди випромінює нитка розжарення лампи, якщо на випромінювання світла витрачається 4,4 % електричної енергії? Вважайте, що довжина хвилі випромінювання дорівнює 600 нм.

*Аналіз фізичної проблеми.* За умовою, випромінювання лампи можна розглядати як сукупність фотонів однакової енергії. Оскільки кожний фотон має енергію  $E$ , їхня сумарна енергія дорівнює  $W = EN$ , а потужність випромінювання (корисна потужність)  $P_{\text{кор}} = \frac{W}{t}$ , де  $t$  — час, за який лампа випромінює  $N$  фотонів. Корисну потужність можна знайти зі співвідношення:  $\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{спож}}}$ .

**Дано:**

$$P_{\text{спож}} = 100 \text{ Вт}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\eta = 0,044$$

$$\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$N = ?$$

**Розв'язання.** Енергія фотона дорівнює:  $E = h\nu$ , де  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , тому  $E = \frac{hc}{\lambda}$ . Таким чином,  $P_{\text{кор}} = \frac{W}{t} = \frac{EN}{t} = \frac{h\nu N}{t} = \frac{hcN}{\lambda t}$ .

Із формули ККД маємо:  $P_{\text{кор}} = \eta P_{\text{спож}}$ .

Отже,  $\eta P_{\text{спож}} = \frac{hcN}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{\eta P_{\text{спож}} \lambda t}{hc}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[N] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot (\text{м} / \text{с})} = \frac{(\text{Дж} / \text{с}) \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{м}} = 1;$$

$$N = \frac{0,044 \cdot 100 \cdot 6,0 \cdot 10^{-7}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8} = 1,3 \cdot 10^{19}.$$

*Відповідь:*  $N = 1,3 \cdot 10^{19}$ .



### Підбиваємо підсумки

Світло випромінюється окремими порціями енергії — квантами. Енергія кванта залежить тільки від частоти світлової хвилі:  $E = h\nu$ , де  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — стала Планка.

• А. Ейнштейн довів, що світло випромінюється, поглинається та поширяється у вигляді частинок світла — фотонів.

• За сучасними уявленнями, фотон є електрично нейтральною частинкою, яка не має маси, рухається зі швидкістю, що дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі, має енергію  $E = h\nu$  та імпульс  $p = \frac{h}{\lambda}$ , де  $\lambda$  — довжина хвилі.



### Контрольні запитання

1. Що таке абсолютно чорне тіло? 2. Як пов'язані температура тіла, довжина світлової хвилі та енергія, яку випромінює тіло (див. рис. 33.1)? 3. У чому полягає гіпотеза М. Планка? 4. Як розрахувати енергію кванта випромінювання? 5. Що таке фотон? Які властивості він має?



### Вправа № 33

1. Якщо подивитися на зоряне небо, можна помітити, що зорі мають різні відтінки блакитного, жовтого, червоного тощо. Поверхні яких зір мають більшу температуру? Обґрунтуйте свою відповідь, скориставшись графіком на рис. 33.1.
2. Визначте енергію, імпульс кванта і довжину хвилі електромагнітного випромінювання частотою  $5 \cdot 10^{14}$  Гц.
3. Визначте імпульс і енергію кванта ультрафіолетового випромінювання, довжина хвилі якого 20 нм.
4. Знайдіть імпульсі фotonів синього та червоного випромінювань, довжини хвиль яких дорівнюють 480 і 720 нм відповідно. Енергія яких фотонів є більшою і в скільки разів?
5. Тривалість імпульсу рубінового лазера 1 мс. За цей час лазер випромінює  $2 \cdot 10^{19}$  фотонів із довжиною хвилі 694 нм. Чому дорівнює потужність спалаху лазера?
6. Чутливість сітківки ока до жовтого світла становить  $3,3 \cdot 10^{-18}$  Вт. Скільки фотонів жовтого світла має щосекунди поглинатися сітківкою, щоб око зафіксувало його наявність? Вважайте, що довжина хвилі дорівнює 600 нм.
7. Які властивості фотонів суперечать вашим уявленням про навколишній світ?

## § 34. ФОТОЕФЕКТ. ЗАКОНИ ФОТОЕФЕКТУ



Ще двадцять років тому в більшості людей словосполучення «сонячні батареї» асоціювалось із системою забезпечення космічного корабля енергією. Але вже в 2016 р. сумарна потужність «земних» сонячних батарей склала понад 100 ГВт, що майже в 10 разів більше, ніж потужність усіх атомних електростанцій України. Про те, яке наукове відкриття привело до створення цих перспективних джерел електричної енергії, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

## 1 Фотоэффект і його спостереження

Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випромінюванням (емісією) електронів, називають **фотоэффектом**.

Розрізняють **зовнішній фотоэффект**, за якого фотоелектрони вилітають за межі тіла, і **внутрішній фотоэффект**, за якого електрони, «вирвані» світлом із молекул і атомів, залишаються всередині тіла.

Зовнішній фотоэффект можна спостерігати за допомогою електрометра з прикріпленою до нього цинковою пластинкою (рис. 34.1, а). Якщо пластині передати від'ємний заряд і освітлювати її ультрафіолетовим випромінюванням, стрілка електрометра швидко опускається, що свідчить про швидке розрядження пластини. У разі позитивного заряду пластини такий ефект не спостерігається. Пояснити це можна тим, що, поглинаючи кванти ультрафіолетового випромінювання, пластина висилає електрони (рис. 34.1, б). Якщо пластина заряджена негативно, то електрони відштовхуються від неї й пластина втрачає заряд.

**?** Чому показ електрометра майже не змінюється, якщо пластина заряджена позитивно?

## 2 Закони фотоэффекту

Зовнішній фотоэффект відкрив німецький фізик Г. Герц у 1887 р., а детально дослідив російський учений Олександр Григорович Столетов (1839–1896) у 1888–1890 рр. Для вивчення фотоэффекту О. Г. Столетов використав пристрій, сучасне зображення якого схематично наведено на рис. 34.2. Усередині камери, з якої викачано повітря, розташовані два електроди (катод К і анод А), на які подається напруга від джерела постійного струму. Електроны, викинуті з катода, рухаються в електричному полі від катода до анода, вимірюючи силу фотоструму за допомогою мікроамперметра  $\mu\text{A}$ .

Крізь кварцове віконце падає світло, під дією якого катод випромінює електрони. Рухаючись в електричному полі від катода до анода, електрони створюють **фотострум**, сила якого вимірюється мікроамперметром. Якщо за допомогою потенціометра  $\Pi$  збільшувати напругу на електродах, сила фотоструму теж збільшується (рис. 34.3).

Із рис. 34.3 бачимо, що за певної напруги сила фотоструму досягає максимального значення і далі залишається незмінною. Це відбувається

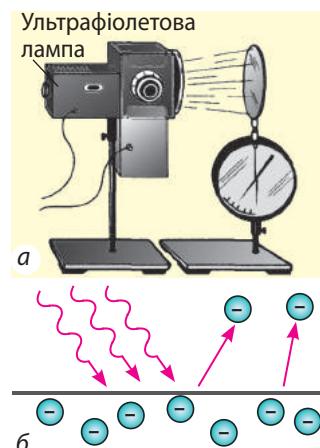


Рис. 34.1. Зовнішній фотоэффект: а — спостереження; б — механізм явища

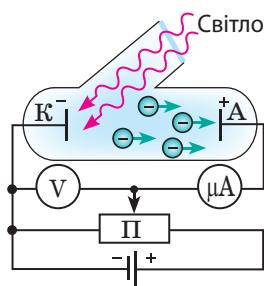


Рис. 34.2. Схема досліду для вивчення фотоэффекту

Зі збільшенням світлового потоку ( $\Phi_2 > \Phi_1$ ) кількість електронів, що їх «вибиває» світло з поверхні катода, збільшується, тому збільшується струм насичення

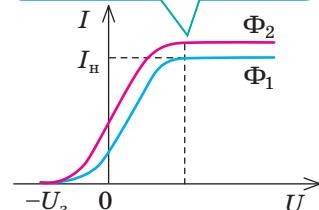
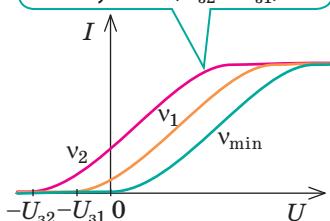


Рис. 34.3. Графік залежності сили фотоструму  $I$  від напруги  $U$  на електродах за незмінної частоті падаючої світлової хвилі і різних значень світлового потоку  $\Phi$

Зі збільшенням частоти світлової хвилі ( $v_2 > v_1$ ) затримуюча напруга  $U_3$  (а отже, й максимальна початкова швидкість фотоелектронів) збільшується ( $U_{32} > U_{31}$ )



**Рис. 34.4.** Графік залежності сили фотоструму  $I$  від напруги  $U$  на електродах за незмінного світлового потоку і різних значень частоти випромінювання, що падає на фотокатод

### Закони зовнішнього фотоефекту

**Перший закон.** Кількість фотоелектронів, яку випромінює катод за одиницю часу, прямо пропорційна інтенсивності світла.

**Другий закон.** Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується зі збільшенням частоти падаючого світла і не залежить від інтенсивності світла.

**Третій закон.** Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі  $\lambda_{\text{чевр}}$  (червона межа фотоефекту), за якої починається фотоефект. Опромінення речовини світловими хвильами більшої довжини фотоефекту не викликає.

тоді, коли всі електрони, які випромінює катод, досягають анода.

Найбільше значення сили фотоструму називають **силою струму насиження**  $I_n$ :

$$I_n = \frac{q_{\max}}{t} = \frac{Ne}{t},$$

де  $q_{\max}$  — заряд, перенесений фотоелектронами за час  $t$ ;  $N$  — кількість «вибитих» електронів;  $e$  — модуль заряду електрона.

Зі зменшенням напруги між електродами сила фотоструму зменшується (див. рис. 34.3). Але навіть коли напруга між електродами досягне нуля, струм не зникне, адже фотоелектрони мають певну початкову швидкість, тому ті з них, що вилетіли в напрямку анода, досягнуть його й за відсутності поля. Щоб виміряти цю швидкість, анод з'єднують із негативним полюсом джерела струму, а катод — із позитивним. У цьому випадку електричне поле виконує від'ємну роботу і гальмує електрони. З досягненням певної **затримуючої** (запірної) напруги  $U_3$  навіть найшвидші електрони не дістануться анода, а отже, **фотострум припиниться**. Згідно з теоремою про кінетичну енергію робота електростатичного поля дорівнює зміні кінетичної енергії фотоелектрона ( $A_{\text{ел}} = \Delta E_{k\max}$ ):

$$eU_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

де  $m$  — маса електрона;  $v_{\max}$  — максимальна початкова швидкість фотоелектрона.

Дослід показує, що **затримуюча напруга** (а отже, й початкова швидкість фотоелектронів) збільшується в разі збільшення частоти світлової хвилі, яка падає на катод, і зменшується в разі зменшення її частоти; за певної частоти світлової хвилі фотоефект припиняється (рис. 34.4).

Змінюючи по черзі інтенсивність і частоту падаючого світла, а також матеріал, з якого виготовлений катод, О. Г. Столетов установив **три закони зовнішнього фотоефекту** (див. текст ліворуч).

### 3

### За що А. Ейнштейн одержав Нобелівську премію

Якщо перший закон фотоефекту можна було пояснити в межах класичної електромагнітної теорії

світла, то наступні два закони прямо суперечили уявленням, які існували на той час. Знадобилося понад 20 років і геніальність двох фізиків — М. Планка і А. Ейнштейна, щоб розгадати цю «загадку». Саме ідею Планка про кванти використав Ейнштейн для пояснення законів фотоэффекту. Тоді вже було відомо, що кожному металу відповідає своя *робота виходу* (див. таблицю):

**Робота виходу**  $A_{\text{вих}}$  — це фізична величина, що характеризує метал і дорівнює енергії, яку треба передати електрону для того, щоб він зміг подолати сили, які утримують його на поверхні цього металу.

А. Ейнштейн припустив: *унаслідок поглинання фотона металом енергія фотона ( $E_{\Phi} = h\nu$ ) може бути повністю передана електрону й витратитися на здійснення роботи виходу  $A_{\text{вих}}$  та надання електрону кінетичної енергії  $E_{k\max}$ .*

**Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоэффекту:**

$$E_{\Phi} = A_{\text{вих}} + E_{k\max}, \text{ або } h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

Рівняння Ейнштейна дає можливість пояснити всі закони зовнішнього фотоэффекту. Саме за пояснення явища фотоэффекту А. Ейнштейн одержав найвищу наукову нагороду — Нобелівську премію (1921 р.).

*Робота виходу електронів із поверхні деяких металів  
(1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж)*

Метал	$A_{\text{вих}}, \text{eV}$
Вольфрам	4,5
Золото	4,3
Калій	2,2
Кобальт	4,4
Літій	2,4
Мідь	4,7
Нікель	4,5
Платина	6,35
Срібло	4,3
Хром	4,6
Цезій	1,8
Цинк	4,2

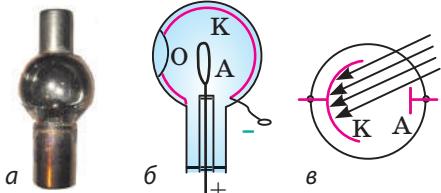
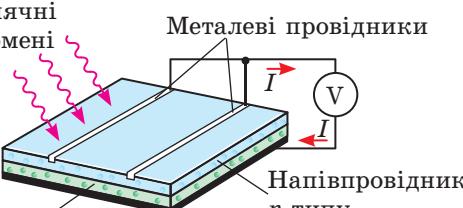
Закони фотоэффекту	Пояснення
1. Кількість фотоелектронів, що іх випромінює катод за одиницю часу, прямо пропорційна інтенсивності світла.	Більша інтенсивність світла означає більшу кількість фотонів, якіпадають на катод. Поглинаючись електронами речовини, фотони сприяють випромінюванню електронів.
2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується в разі збільшення частоти падаючого світла і не залежить від інтенсивності світла.	Електрон може поглинуть тільки один фотон (більше — лише за дуже великої інтенсивності світла), тому максимальна кінетична енергія електрона визначається тільки енергією фотона, а отже, частотою світла і не залежить від кількості фотонів.
3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі $\lambda_{\max} = \lambda_{\text{чев}}$ (червона межа фотоэффекту), за якої починається фотоэффект. Опромінення речовини світловими хвильами, які мають більшу довжину, фотоэффекту не викликає.	Максимальна довжина світлової хвилі (мінімальна частота) відповідає мінімальній енергії фотона: якщо $h\nu < A_{\text{вих}}$ , то електрони не вилітатимуть із речовини. Умова

$$h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} = A_{\text{вих}}$$

визначає червону межу фотоэффекту.

## 4 Де і як застосовують фотоефект

Фотоефект отримав широке застосування у пристроях для перетворення світлових сигналів на електричні або для безпосереднього перетворення світлої енергії на електричну. Існують два великих класи таких пристройів: **вакуумні та напівпровідникові фотоелементи**.

Вакуумні фотоелементи	Напівпровідникові фотоелементи
<p>Дія вакуумних фотоелементів ґрунтуються на зовнішньому фотоефекті.</p> <p>Вакуумні фотоелементи здебільшого застосовують у різноманітних <i>фотореле</i> (для автоматичного вимикання і вимикання освітлення, сортування деталей за формою і кольором, у системах безпеки тощо) і <i>вимірювальних приладах</i> (для вимірювання освітленості, вимірювання потужності імпульсних оптических сигналів і т. ін.). Нижче подано вигляд (а), будову (б) і схематичне позначення (в) <i>вакуумного фотоелемента</i>.</p>  <p>а б в</p> <p>Вакуумний фотоелемент має таку будову: у скляному балоні, з якого відкачано повітря, закріплена металева кільце — анод А; внутрішня поверхня балона, за винятком невеликого віконця О, покрита світло-чутливим шаром металу, що слугує катодом К.</p> <p>Коли через віконце на катод по-трапляє світло, катод випромінює електрони, які прямають до анода, і електричне коло, що містить fotoелемент, замикається.</p>	<p>Дія напівпровідниковых фотоелементів заснована на <i>внутрішньому фотоефекті</i>.</p> <p>Напівпровідникові фотоелементи застосовують у чутливих <i>фотоприймачах</i>, які перетворюють слабкі світлові сигнали на електричні; у <i>сонячних батареях</i>, в яких сонячна енергія перетворюється на електричну.</p> <p>Сонячні промені</p> <p>Металеві провідники</p> <p>Напівпровідник <i>n</i>-типу</p> <p>Напівпровідник <i>p</i>-типу</p>  <p>Напівпровідниковий фотоелемент складається із двох пластин (шарів), які виготовлені з напівпровідників різного типу провідності — електронної (напівпровідник <i>n</i>-типу) і діркової (напівпровідник <i>p</i>-типу). Світло, що падає на <i>n</i>-шар, «вибиває» електрони із кристалічної гратки. «Звільнені» електрони прямають у <i>p</i>-шар, де займають вільні дірки. Унаслідок цього процесу між шарами виникає різниця потенціалів. Фотоприймачі застосовують у <i>цифрових фотоапаратах</i> — їхня матриця складається з великої кількості напівпровідниковых fotoелементів, кожен з яких приймає «свою» частину світлового потоку, перетворює її на електричний сигнал і передає його у відповідне місце екрана.</p> <p>Застосування фотоефекту в енергетиці пов'язане насамперед із <i>сонячними батареями</i>.</p>

## 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Цинкова пластина освітлюється монохроматичним світлом із довжиною хвилі 300 нм. Якого максимального потенціалу набуде пластина? Червона межа фотоефекту для цинку  $\lambda_{\max} = 332$  нм.

*Аналіз фізичної проблеми.* Пластина припиняє втрачати електрони, коли електрони повністю затримуються електричним полем пластини, яка завдяки фотоэффекту набуває позитивного заряду. Вважаючи, що потенціал точок поля на достатній відстані від пластини дорівнює нулю, маємо:  $U_3 = \phi$ .

**Дано:**

$$\begin{aligned}\lambda &= 3,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ \lambda_{\max} &= 3,32 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ h &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ c &= 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}\end{aligned}$$

$\phi = ?$

*Пошук математичної моделі, розв'язання.*

Відповідно до формули Ейнштейна:  $h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$ ,  
де  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ,  $A_{\text{вих}} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$ ,  $\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3 = e\phi$ .

Урахувавши, що  $U_3 = \phi$ , маємо:  $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} + e\phi$ , отже:

$$\phi = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_{\max}}}{e} = \frac{hc}{e} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right).$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[\phi] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{Кл}} \cdot \left( \frac{1}{\text{м}} - \frac{1}{\text{м}} \right) = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В};$$

$$\phi = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left( \frac{1}{3,00 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{3,32 \cdot 10^{-7}} \right) \approx 0,40 \text{ (В)}.$$

*Відповідь:*  $\phi \approx 0,40 \text{ В}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випромінюванням електронів, називають фотоэффектом.
- Експериментально встановлено три закони фотоэффекту.
  1. Кількість фотоелектронів, що їх випромінює катод за одиницю часу, прямо пропорційна інтенсивності світла.
  2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується зі збільшенням частоти падаючого світла й не залежить від інтенсивності світла.
  3. Дляожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі  $\lambda_{\max}$  (червона межа фотоэффекту), за якої починається фотоэффект. Опромінення речовини світловими хвильами більшої довжини фотоэффекту не викликає.
- Пояснити закони фотоэффекту з позицій квантової теорії дозволило рівняння А. Ейнштейна для фотоэффекту:  $E_\Phi = A_{\text{вих}} + E_{k\max}$ , або  $h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$ .
- Photoeffect використовують у різних датчиках для систем керування і безпеки. На сьогодні основна галузь використання внутрішнього фотоэффекту — виробництво сонячних батарей.



### Контрольні запитання

1. Дайте означення фотоэффекту.
2. Чим внутрішній фотоэффект відрізняється від зовнішнього? Де їх застосовують?
3. Опишіть пристрій для вивчення фотоэффекту. Які фізичні величини вимірюють під час експерименту? Як подають його результати?
4. Які висновки можна зробити, проаналізувавши вольт-амперну характеристику фотоэффекту? Які фізичні величини можна визначити за цим графіком?
5. Сформулюйте закони фотоэффекту та поясніть їх, спираючись на рівняння А. Ейнштейна для фотоэффекту.

**Вправа № 34**

1. Схему якого досліду зображенено на рис. 1? Хто першим провів цей дослід? Які явища спостерігав учений?
2. Фотони з енергією 3,4 еВ спричиняють фотоефект із поверхні цезію. Якою є максимальна кінетична енергія фотоелектронів?
3. Енергія фотонів, що падають на фотокатод, утричі більша за роботу виходу електронів з поверхні матеріалу, із якого виготовлений фотокатод. Знайдіть відношення максимальної кінетичної енергії фотоелектронів до роботи виходу.
4. Якою є червона межа фотоефекту для цезію? Чи спостерігатиметься фотоефект, якщо зразок, виготовлений із цезію, освітлювати видимим світлом?
5. На рис. 2 подано вольт-амперну характеристику фотоефекту для деякого металу. Побудуйте вольт-амперну характеристику для цього металу 1) в разі збільшення частоти падаючого випромінювання; 2) в разі зменшення падаючого світлового потоку.
6. Визначте максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, «вирваних» із калієвого фотокатода фіолетовим світлом із довжиною хвилі 420 нм.
7. Червона межа фотоефекту для певного металу відповідає довжині хвилі 600 нм. Якою є частота випромінювання, що спричиняє емісію фотоелектронів, кінетична енергія яких утримується більшою за роботу виходу?
8. Знайдіть частоту світла, якщо електрони, «вирвані» цим світлом із поверхні металу, повністю затримуються напругою 2,0 В. Photoефект у цьому металі починається за частоти падаючого світла  $6 \cdot 10^{14}$  Гц.
9. За графіком залежності затримуючої напруги від частоти падаючого світла (рис. 3) знайдіть сталу Планка.
10. Сонячні батареї на сьогодні є одним із найперспективніших джерел електричної енергії. Дізнайтесь, у яких країнах ця галузь енергетики розвивається найкраще. Якими є перспективи її розвитку в Україні?

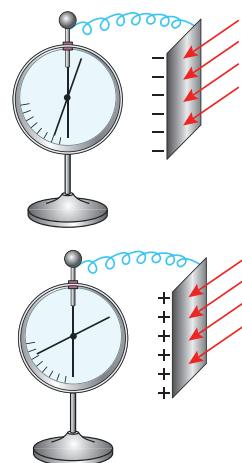


Рис. 1

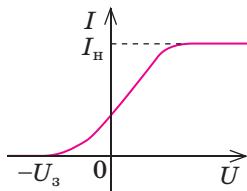


Рис. 2

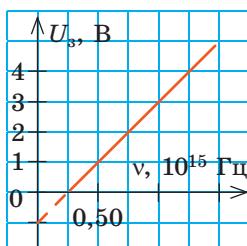


Рис. 3

**ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО****Фахівець із розробки, монтажу, обслуговування сонячних електростанцій**

Ще двадцять років тому застосування альтернативних джерел енергії виглядало як дивацтво. А зараз уже є країни, де виробництво електричної енергії за допомогою альтернативних джерел, перш за все сонячних батарей, перевищує 50% у загальному балансі. І ця тенденція буде зберігатися. Тож наш наступний прогноз щодо професії майбутнього — фахівці з розробки, монтажу, обслуговування сонячних електростанцій.

## § 35. ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ В ПРИРОДІ І ТЕХНІЦІ



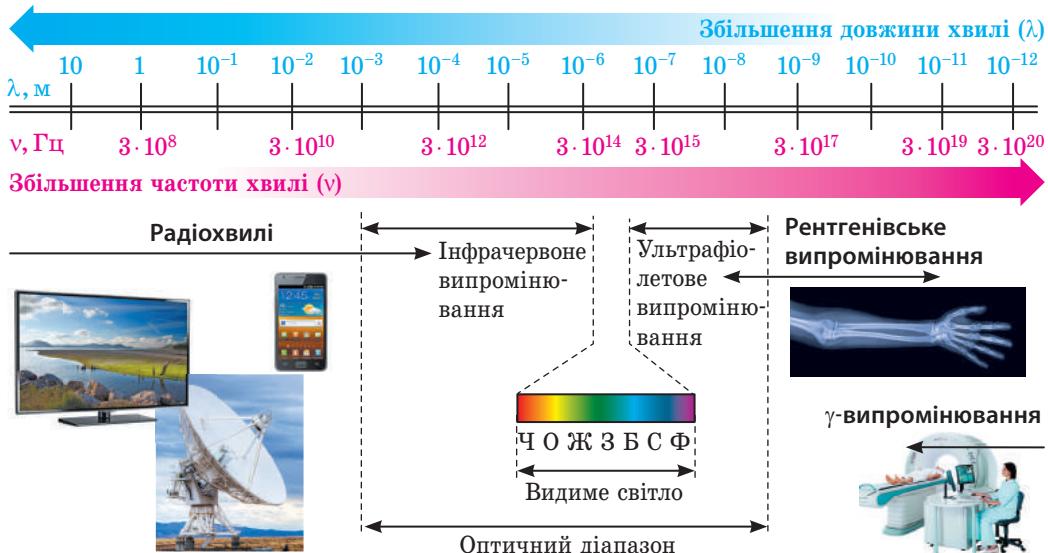
Електромагнітні хвилі (електромагнітне випромінювання) — це поширення у просторі коливань електромагнітного поля. Електромагнітні хвилі можуть випромінюватися різноманітними об'єктами — від величезних зір до атомних ядер. Про шкалу електромагнітних хвиль ви дізналися ще в курсі фізики 9-го класу. Отже, згадуємо і дізнаємося нове.

### 1 Шкала електромагнітних хвиль

**Шкала (спектр) електромагнітних хвиль** — безперервна послідовність частот і довжин електромагнітних хвиль, що існують у природі.

За способом випромінювання хвиль, що належать до тієї чи іншої ділянки спектра, розрізняють: низькочастотне випромінювання й радіохвилі; інфрачервоне випромінювання, видиме світло й ультрафіолетове випромінювання; рентгенівське випромінювання; гамма-випромінювання (рис. 35.1).

Принципової відмінності між окремими ділянками спектра немає — усі ці види випромінювань являють собою електромагнітні хвилі. Ці хвилі поширяються у вакуумі з однаковою швидкістю, яка дорівнює швидкості світла; породжуються зарядженими частинками, що рухаються прискорено; одночасно мають і хвильові, і квантові властивості, оскільки корпускулярно-хвильовий дуализм — це загальна властивість природи. Зі збільшенням частоти (зменшенням довжини) на перший план поступово виходять квантові властивості електромагнітного випромінювання, зі зменшенням частоти — хвильові. В оптичному діапазоні і квантові, і хвильові властивості електромагнітного випромінювання виявляються майже однаково.



**Рис. 35.1.** Шкала (спектр) електромагнітних хвиль — безперервна послідовність частот і довжин електромагнітних хвиль, що існують у природі

**?** Сподіваємося, що вам не складно навести приклади на підтвердження останнього твердження.

Розглянемо спектр електромагнітних хвиль докладніше.

## 2 Радіохвилі

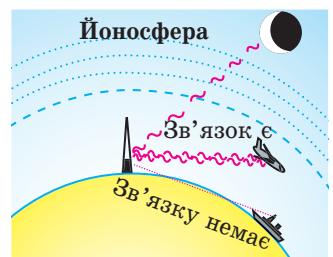
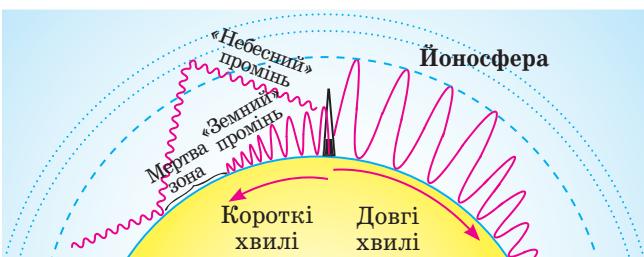
**Радіохвилі** — електромагнітні хвилі довжиною від 100 км (3 кГц) до  $\sim 0,1$  мм (3 ТГц).

**Радіохвилі** — від наддовгих із довжиною понад 10 км до ультракоротких і мікрохвиль із довжиною менш ніж 0,1 мм — *породжуються змінним електричним струмом*.

*Низькочастотне випромінювання* (наддовгі радіохвилі) виникає, наприклад, навколо провідників, в яких тече змінний струм, і поблизу генераторів електричного струму. Оскільки енергія цих хвиль є дуже малою, вони можуть поширюватися на невеликі відстані й серйозно не впливають на організми, в тому числі на людину.

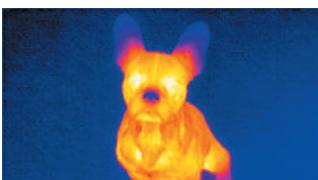
Електромагнітні хвилі *радіодіапазону* породжуються високочастотним змінним струмом, який створюють генератори високочастотних електромагнітних коливань.

Особливості поширення хвиль радіодіапазону			
Довгі радіохвилі	Середні радіохвилі	Короткі радіохвилі	Ультракороткі радіохвилі
Довжина: від 1 до $\sim 10$ км	Довжина: 100 м — 1 км	Довжина: 10 — 100 м	Довжина: від $\sim 0,1$ мм до 10 м
Здатні обгинати земну поверхню, тому багато міжнародних радіостанцій ведуть мовлення на довгих хвильах; цей діапазон хвиль виділений для морської навігації.	Поширяються в межах 1 тис. км, оскільки можуть відбиватися тільки від йоносфери. Радіопередачі на середніх хвильах краще приймаються вночі, коли підвищується відбивна здатність йоносферного шару.	Відбившись від йоносфери, повертаються до Землі, відбиваються від її поверхні, знову спрямовуються до йоносфери, де знову відбиваються. Так, багаторазово відбиваючись, радіохвилі може кілька разів обійти земну кулю.	Практично не відбиваються від йоносфери, поширяються в межах прямої видимості. Порівняно з іншими хвилями радіодіапазону ультракороткі радіохвилі легко модулювати, їх можна спрямовувати вузьким пучком, вони менше розсіюються. Саме тому ці радіохвилі набули широкого застосування у стільниковому зв'язку, телебаченні й радіолокації.



**3****Електромагнітні хвилі оптичного діапазону**

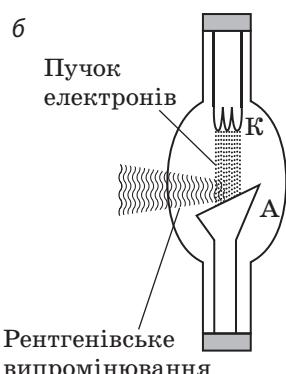
Будь-які хвилі оптичного діапазону *випромінюються збудженими атомами під час їх переходу в стан з меншим рівнем енергії*. Збудження атома відбувається внаслідок поглинання ним певної порції (кванта) енергії. Наприклад, під час непружного зіткнення атомів (або молекул) частина їх кінетичної енергії може витратитися на збудження, а потім випромінитися у вигляді кванта світла. Кожен ізольований атом, подібно до коливального контуру, може випромінювати тільки хвилі певних частот (щоправда, коливальний контур випромінює хвилі тільки однієї частоти).

Інфрачервоне (теплове) випромінювання	Видиме світло	Ультрафіолетове випромінювання
		
Довжина хвилі: від ~ 760 нм до ~ 1–2 мм	Довжина хвилі: від ~ 400 до ~ 760 нм	Довжина хвилі: від ~ 10 до ~ 400 нм
<ul style="list-style-type: none"> <li>Інфрачервоні промені випромінюють будь-які тіла, що мають температуру, вищу за абсолютний нуль. Саме на цьому ґрунтуються їх застосування у тепловізорах — приладах нічного бачення.</li> <li>Людське око не здатне бачити інфрачервоне випромінювання, адже енергії квантів недостатньо, щоб збудити нервові клітинки в оці. Але багато представників фауни мають спеціальні «пристосування» — своєрідні «прилади нічного бачення», які здатні сприймати ці промені.</li> <li>Інфрачервоне випромінювання зазвичай є корисним для людини, але у великих дозах може спричинити запаморочення, втрату свідомості — тепловий і сонячний удари.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Видиме світло випромінюють досить нагріті тіла, причому температура, за якої тіло починає випромінювати світло, залежить від речовини, з якої складається це тіло. Випромінюванням видимого світла можуть супроводжуватися і деякі хімічні реакції (хемілюмінесценція), завдяки яким світяться світлячки, радіолярії тощо.</li> <li>Видиме біле світло розділяють на сім кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій (індиго), фіолетовий.</li> </ul> <p>Людське око найкраще сприймає світлові хвилі довжиною 555 м, які відповідають зеленій частині спектра.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ультрафіолет випромінюють Сонце та інші зорі, електричні дуги, спеціальні кварцові лампи.</li> <li>Людське око не реагує на ультрафіолетове випромінювання. Наймірніше, це пов'язано з еволюцією, адже ці промені добре поглинаються водою, яка входить до складу рогівки ока. Ультрафіолет має високу хімічну активність, тому у великих дозах негативно впливає на людину. Саме тому не варто перебувати на сонці, коли сонячне випромінювання найбільш інтенсивне. Проте в невеликих дозах ультрафіолет є корисним: він сприяє виробленню вітаміну D, зміцнює імунну систему, стимулює низку важливих життєвих функцій в організмі.</li> </ul>

*Зверніть увагу:* в оптичному діапазоні спектра електромагнітних хвиль стають суттєвими явища, зумовлені атомною будовою речовини, тому окрім хвильових виявляються квантові властивості випромінювання.



**Рис. 35.2.** Перший рентгенівський знімок: кисть руки Берти Рентгена (дружини В. Рентгена) з обручкою



**Рис. 35.3.** Рентгенівська трубка: а — вигляд; б — схематичне зображення

## 4

### Рентгенівське випромінювання

У ХХІ ст. навряд чи знайдеться доросла людина, яка хоча б раз у житті не робила рентгенівського знімка. Наприкінці ж XIX ст. зображення кисті людини з видимою структурою кісток (рис. 35.2.) обійшло шпалти газет усього світу й стало справжньою сенсацією для фізиків. За відкриття в 1895 р. рентгенівського випромінювання німецький фізик *Вільгельм Конрад Рентген* (1845–1923) став першим у світі лауреатом Нобелівської премії.

**Рентгенівське випромінювання (Х-випромінювання)** — електромагнітні хвилі довжиною від ~ 0,001 нм до ~ 100 нм.

Рентгенівське випромінювання виникає внаслідок взаємодії швидких електронів з атомами катода в *рентгенівській трубці*, яка являє собою вакуумну скляну колбу з двома електродами — анодом А і катодом К (рис. 35.3). Між електродами створюється висока напруга (10–500 кВ), а катодом пропускають електричний струм; коли катод нагрівається, то з його поверхні починають вилітати (емітувати) електрони.



Згадайте, як називають явище емісії електронів із поверхні металу внаслідок нагрівання.

Електрони, які випромінюють катод, розганяються електричним полем до величезних швидкостей. Їх потрапляння на анод спричиняє два види рентгенівського випромінювання: *гальмівне*, зумовлене величезним прискоренням електронів під час їхнього гальмування на аноді, та *характеристичне*, зумовлене високоенергетичними збудженнями електронних оболонок атомів.

Рентгенівське випромінювання найширше застосовують у медицині, адже воно має властивість проходити крізь непрозорі предмети (наприклад, тіло людини). Кісткові тканини менш прозорі для рентгенівського випромінювання, ніж інші тканини організму людини, тому кістки чітко видно на рентгенограмі. Рентгенівське випромінювання чинить руйнівну дію на клітини організму, тому застосовувати його потрібно надзвичайно обережно. Рентгенівську зйомку використовують також у промисловості (для виявлення дефектів), хімії (для аналізу сполук), фізиці (для дослідження структури кристалів).

## 5

**Гамма-випромінювання**

**Гамма ( $\gamma$ )-випромінювання** — електромагнітні хвилі довжиною менш ніж 0,05 нм.

$\gamma$ -випромінювання випускається збудженими атомними ядрами під час ядерних реакцій, радіоактивних перетворень атомних ядер і перетворень елементарних частинок.

$\gamma$ -випромінювання використовують у дефектоскопії (виявлення дефектів усередині деталей); радіаційній хімії (наприклад, у процесі полімеризації); сільському господарстві й харчовій промисловості (стерилізація харчів); медицині (стерилізація приміщен, променева терапія). На організми  $\gamma$ -випромінювання чинить мутагенний і канцерогенний вплив. Разом із тим чітко спрямоване й дозоване  $\gamma$ -випромінювання застосовують для знищенння ракових клітин (променева терапія) (рис. 35.4).

*Зверніть увагу! У діапазонах рентгенівського випромінювання і  $\gamma$ -випромінювання на перший план виступають квантові властивості електромагнітного випромінювання.*

**Підбиваємо підсумки**

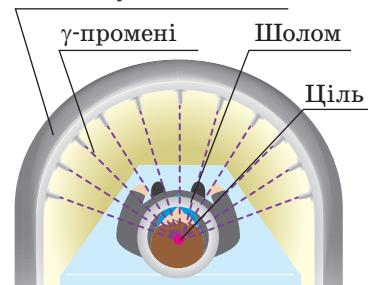
- Шкала електромагнітних хвиль — безперервна послідовність частот і довжин електромагнітних хвиль, що існують у природі.
- За способом випромінювання та приймання хвиль, що належать до тієї чи іншої ділянки спектра, розрізняють низькочастотне випромінювання і радіохвилі (створюються змінним електричним струмом); інфрачервоне випромінювання, видиме світло й ультрафіолетове випромінювання (випускається збудженими атомами); рентгенівське випромінювання (створюється під час швидкого гальмування заряджених частинок);  $\gamma$ -випромінювання (випускається збудженими атомними ядрами).

- Усі види випромінювань є електромагнітними хвильами, а отже, поширюються у вакуумі зі швидкістю світла. Зі збільшенням частоти (зменшенням довжини) хвилі збільшується проника здатність електромагнітного випромінювання і поступово на перший план виходять квантові властивості випромінювання.

**Хто відкрив  $\text{X}$ -промені**

Значний внесок у дослідження  $\text{X}$ -випромінювання, яке згодом було названо рентгенівським, зробив видатний учений українського походження Іван Павлович Пулюй (1845–1918), адже саме він ще в 1881 р. винайшов трубку, яку використав потім В. Рентгена у своїх дослідах і яка стала прообразом трубок сучасних рентгенівських апаратів. Фахівці з історії фізики дотепер сперечуються про те, хто насправді відкрив  $\text{X}$ -промені (див. також рубрику «Фізика і техніка в Україні» наприкінці § 35).

Радіоактивний ізотоп Кобальту



**Рис. 35.4.** Використання  $\gamma$ -випромінювання для лікування онкозахворювань. Щоб  $\gamma$ -промені не знищували здорові клітини, застосовують декілька слабких пучків  $\gamma$ -променів, які фокусують на пухлині



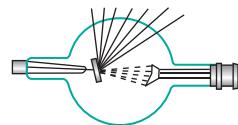
### Контрольні запитання

- Назвіть відомі вам види електромагнітного випромінювання.
- Що спільного між усіма видами електромагнітного випромінювання? У чому їх відмінність?
- Як змінюються властивості електромагнітного випромінювання зі збільшенням його частоти?
- Наведіть приклади застосування різних видів електромагнітного випромінювання.
- Як уникнути негативного впливу деяких видів електромагнітного випромінювання на здоров'я людини?

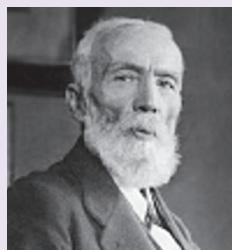


### Вправа № 35

- Схему якого пристрою подано на рисунку? Хто першим створив цей пристрій? Назвіть основні частини пристрою.
- Чому ультрафіолетові промені використовують для стерилізації приміщень, а інфрачервоні — ні?
- Чому високо в горах слід обов'язково захищати очі окулярами?
- Яку швидкість набирають електрони в рентгенівській трубці, що працює під напругою 32 кВ?
- Відомо, що електромагнітне випромінювання чинить хімічну дію, зокрема завдяки електромагнітному випромінюванню відбувається фотосинтез. Підготуйте коротке повідомлення про значення фотосинтезу для життя на Землі.
- Спираючись на властивості різних видів електромагнітного випромінювання, складіть інструкції щодо правил поведінки під час перебування на пляжі; під час медичних обстежень; під час роботи за комп'ютером.



### ФІЗИКА І ТЕХНІКА В УКРАЇНІ



**Іван Павлович Пулюй** (1845–1918) — фізик і електротехнік українського походження, громадський діяч. Автор близько 50 наукових праць, насамперед із проблем катодного випромінювання та катодних X-променів, електротехніки й електроенергетики.

I. П. Пулюй народився в містечку Гримайлів на Тернопільщині. Після закінчення Тернопільської гімназії продовжив навчання у Віденському університеті, здобув ступінь доктора натуральної філософії у Страсбурзькому університеті.

Дотепер залишається спірним питання про відкриття рентгенівського випромінювання, і якщо Вільгельма Рентгена знає увесь світ, то ім'я Івана Пулюя стало відомим широкому загалу нещодавно. Проте ще за 14 років до В. Рентгена I. П. Пулюй сконструував трубку, яка згодом стала прообразом сучасних рентгенівських апаратів.

I. П. Пулюй набагато глибше за В. Рентгена проаналізував природу та механізми виникнення X-променів (пізніше їх було названо рентгенівськими), а також продемонстрував їхні властивості. Одним із перших I. П. Пулюй почав конструювати й виготовляти вакуумні пристрії. Широко відомою стала люмінесцентна газорозрядна лампа, яка увійшла в історію техніки як «лампа Пулюя» (Pulujlampe). Знімки в X-променях, виконані Пулюєм за допомогою цієї лампи, найчастіше відтворювались у європейських науково-популярних виданнях як неперевершенні за якістю для ілюстрації застосування X-променів у медицині.

Ще одна із розробок ученої — запатентований винахід, який дав змогу використовувати лінію передачі змінного струму для одночасного телефонного зв'язку.

Ім'я I. П. Пулюя носить Тернопільський національний технічний університет; НАНУ заснувала премію імені Івана Пулюя за видатні роботи в галузі прикладної фізики.



## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 5

**Тема.** Дослідження заломлення світла.

**Мета:** дослідити заломлення світла на межі «скло — повітря», визначити показник заломлення скла відносно повітря.

**Обладнання:** скляна пластинка з паралельними гранями, аркуш гофрованого картону, олівець, 4 шпильки, косинець; ножиці, посудина з водою.



### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань і обчислень відразу заносять до таблиці.

II

#### Підготовка до експерименту

1. Згадайте причини заломлення світла, закони заломлення; запишіть формулу для визначення показника заломлення.

2. Підготуйте рисунки для виконання роботи (див. рис. 1). Для цього:

1) покладіть скляну пластинку на сторінку зошита й олівцем окресліть контур пластинки;

2) накресліть пряму  $k$ , перпендикулярну відрізкам, що відповідають паралельним граням пластинки; позначте точку  $O$ .

3) за допомогою циркуля накресліть коло радіуса 3–4 см із центром у точці  $O$ ;

4) під кутом приблизно  $45^\circ$  накресліть промінь, який задаватиме напрямок пучка світла, що падає в точку  $O$ ; позначте точку перетину променя і кола літерою  $A$ ;

5) повторіть дії, описані в пунктах 1–4, ще тричі (виконайте ще три рисунки), спочатку збільшивши, а потім зменшивши кут падіння.

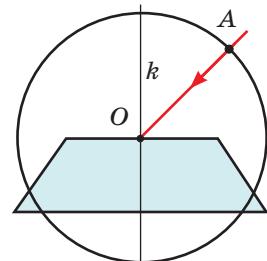


Рис. 1

#### Експеримент

1. Покладіть під аркуш зошита з першим контуром аркуш гофрованого картону, накладіть на контур скляну пластинку і встреміть вертикально в точки  $A$  і  $O$  шпильки 1 і 2 (див. рис. 2).

2. Дивлячись крізь пластинку за положенням шпильок 1 і 2, установіть

напрямок заломленого променя. Для цього навпроти нижньої заломлюючої грани пластинки встреміть шпильки 3 і 4 так, щоб основи всіх чотирьох шпильок здавалися розташованими на одній прямій.

3. Приберіть шпильки і пластинку, проведіть через основи шпильок 3 і 4 пряму, позначте точку  $M$  і накресліть заломлений промінь  $OM$  (див. рис. 2 і 3).

4. Знайдіть точку перетину променя  $OM$  із колом (точку  $B$ ).

5. Повторіть дії, описані в пунктах 1–4, ще для трьох контурів.

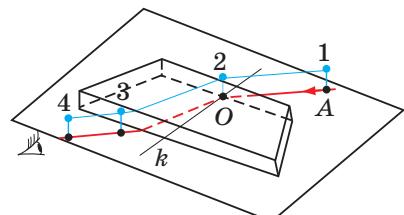


Рис. 2

### ► Опрацювання результатів експерименту

На кожному рисунку:

1. Зазначте кут падіння і кут заломлення.
2. Із точок  $A$  і  $B$  опустіть перпендикуляри на пряму  $k$  і виміряйте довжини  $a$  і  $b$  отриманих відрізків (див. рис. 3).
3. Визначте показник заломлення скла відносно повітря:  $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{a/r}{b/r} = \frac{a}{b}$ .
4. Побудуйте графік залежності  $a(b)$  і визначте середнє значення показника заломлення (див. Додаток 2).
5. Визначте відносну і абсолютну похибки вимірювання показника заломлення скла відносно повітря, округліть результати, скориставшись правилами округлення (див. Додаток 2).

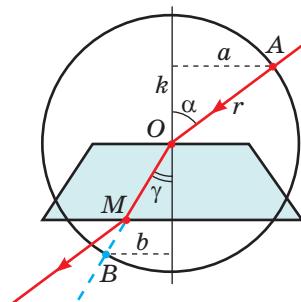


Рис. 3

Номер досліду	Довжина відрізка		Показник заломлення		Похибка експерименту		Результат $n = n_{\text{sep}} \pm \Delta n$
	$a$ , мм	$b$ , мм	$n$	$n_{\text{sep}}$	$\varepsilon, \%$	$\Delta n$	

### ■ Аналіз експерименту та його результатів

За результатами сформулюйте висновок.

### + Творче завдання

Скориставшись рис. 4, продумайте і запишіть план проведення експерименту з визначення показника заломлення води відносно повітря. Виріжте з картону круг і проведіть експеримент. Проаналізуйте результат, сформулюйте висновок.

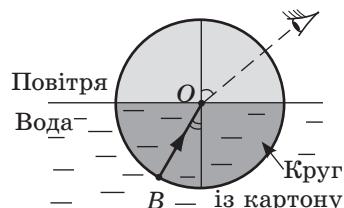


Рис. 4



## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 6

**Тема.** Вимірювання оптичної сили лінзи та системи лінз.

**Мета:** визначити оптичні сили збиральної та розсіювальної лінз; переконатися, що оптична сила  $D$  системи двох тонких лінз, складених упритул, дорівнює сумі оптичних сил цих лінз:  $D = D_1 + D_2$ .

**Обладнання:** короткофокусна збиральна лінза і розсіювальна лінза на підставках, екран, джерело світла (свічка або електрична лампа), мірна стрічка, напрямна рейка.



Рис. 1

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

## II Підготовка до експерименту

Запишіть формулу тонкої лінзи, проаналізуйте її та подумайте, які вимірювання вам слід зробити, щоб визначити оптичну силу лінзи.

## Експеримент

### Дослід 1. Вимірювання оптичної сили збиральною лінзою

- Зберіть установку, як показано на рис. 1, використавши збиральну лінзу.
- Дістаньте на екрані чітке збільшене зображення джерела світла.
- Виміряйте відстань  $d_1$  від джерела світла до збиральної лінзи і відстань  $f_1$  від збиральної лінзи до екрана.

### Дослід 2. Вимірювання оптичної сили розсіювальною лінзою

- Зберіть установку, як показано на рис. 2, розташувавши пристрій вздовж напрямної рейки.
- Переміщуючи збиральну лінзу та екран, дістаньте на екрані чітке зменшене зображення джерела світла.
- Виміряйте відстань  $d_2$  від джерела світла ( $S$ ) до розсіювальної лінзи, зазначте на рейці положення розсіювальної лінзи (див. рис. 3).
- Приберіть розсіювальну лінзу і, не чіпаючи збиральну лінзу й екран, пересувайте джерело світла в напрямку збиральної лінзи, доки на екрані знову не з'явиться чітке зображення джерела світла.
- Виміряйте відстань  $f_2$  від місця, де була розсіювальна лінза, до нового положення джерела світла ( $S_1$ ) (див. рис. 3).



Рис. 2

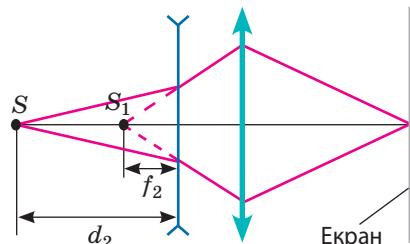


Рис. 3

### Дослід 3. Вимірювання оптичної сили системи лінз, складених упритул

- Складіть розсіювальну і збиральну лінзи впритул одну до одної, розташуйте систему лінз між джерелом світла та екраном і дістаньте на екрані чітке збільшене зображення джерела світла.
- Виміряйте відстань  $d_3$  від джерела світла до системи лінз і відстань  $f_3$  від системи лінз до екрана.

Збиральна лінза				Розсіювальна лінза				Система лінз				$\varepsilon_D$ , %
$d_1$ , м	$f_1$ , м	$D_1$ , дптр	$F_1$ , м	$d_2$ , м	$f_2$ , м	$D_2$ , дптр	$F_2$ , м	$d_3$ , м	$f_3$ , м	$D_3$ , дптр	$F_3$ , м	

### ► Опрацювання результатів експерименту

- Скориставшись формулами  $D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$  і  $F = \frac{1}{D}$ , визначте для кожного досліду оптичну силу і фокусну відстань лінзи (системи лінз).

*Зверніть увагу:* для досліду 2 відстань  $f_2$  від лінзи до зображення слід брати зі знаком «-», оскільки  $S_1$  — це уявне зображення джерела світла  $S$  у розсіювальній лінзі.

- Оцініть відносну похибку експерименту, скориставшись формулою

$$\varepsilon_D = \left| 1 - \frac{D_1 + D_2}{D_3} \right| \cdot 100\%.$$

### ■ Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулюйте висновок.

### + Творче завдання

Вважаючи, що глибина  $f$  очного дна (відстань від оптичного центра оптичної системи «око» до сітківки) дорівнює 15 мм, оцініть найбільшу оптичну силу вашого ока. Для цього закройте одне око, а напроти другого розмістіть «ширму» — два розсунуті пальці. Дивлячись через «ширму» на зубочистку, повільно наблизяйте її до «ширми» доти, доки зубочистка не почне роздвоюватися. Виміряйте відстань  $d$  від зубочистки до ока і, скориставшись формулою тонкої лінзи, визначте найбільшу оптичну силу ока ( $D_{\max}$ ).

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 7

**Тема.** Вимірювання довжини світлової хвилі.

**Мета:** навчитися вимірювати довжину світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки.

**Обладнання:** лампа з прямою ниткою розжарення, пристрій для визначення довжини світлової хвилі, штатив із муфтою, дифракційна ґратка.

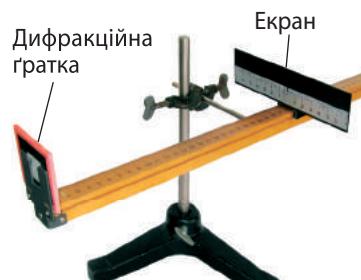


Рис. 1

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).*

*Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.*

### II Підготовка до експерименту

- Визначте період  $d$  дифракційної ґратки. (Зазвичай на ґратці вказують кількість  $N$  штрихів на 1 мм, а період ґратки обчислюють за формулою:  $d = \frac{10^{-3} \text{ м}}{N}$ .)
- Зберіть установку, зображену на [рис. 1](#).

## ► Експеримент

- Дивлячись крізь дифракційну ґратку і щілину на лампу розжарювання, спостерігайте на екрані приладу різкі дифракційні спектри, лінії яких паралельні штрихам на шкалі (див. рис. 2, рис. 3).

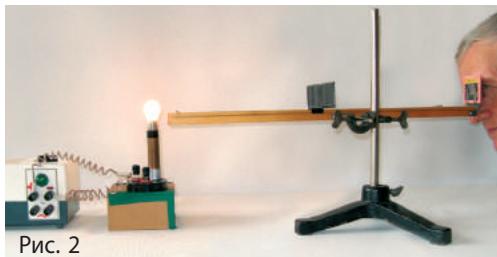


Рис. 2

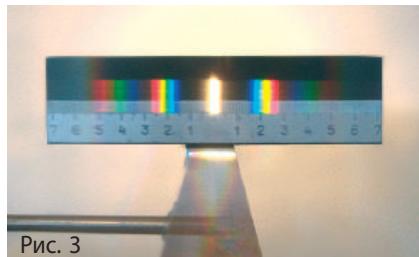


Рис. 3

- За шкалою на екрані визначте спочатку відстань  $a_1$  від центра щілини до межі фіолетового коліору спектра першого порядку, розташованої праворуч від щілини, потім відстань  $a_2$  від центра щілини до межі фіолетового коліору спектра першого порядку, розташованої ліворуч від щілини.
- Повторіть дії, описані в п. 2, для межі червоного коліору спектра першого порядку.
- Виміряйте відстань  $l$  від ґратки до екрана.

Період ґратки $d$ , м	Колір спектра	Відстань від центра щілини до межі			Відстань від ґратки до екрана $l$ , м	Довжина хвилі	
		$a_1$ , м	$a_2$ , м	$a_{\text{сер}}$ , м		вимірюна $\lambda$ , нм	таблична $\lambda_{\text{табл}}$ , нм
	Фіолетовий						380–450
	Червоний						620–760

## ► Опрацювання результатів експерименту

- Обчисліть середні значення відстаней від щілини до відповідних меж фіолетового і червоного коліорів спектрів першого порядку.
  - Скориставшись формулою  $\lambda = \frac{da_{\text{сер}}}{l}$ , обчисліть довжину світлової хвилі фіолетового коліору та світлової хвилі червоного коліору.
  - Оцініть відносну похибку експерименту, порівнявши значення довжин хвиль, отриманих у ході експерименту, з табличним значенням:
- $$\varepsilon_\lambda = \left| 1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\text{табл}}} \right| \cdot 100 \%$$

## ► Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулюйте висновок.

## Творче завдання

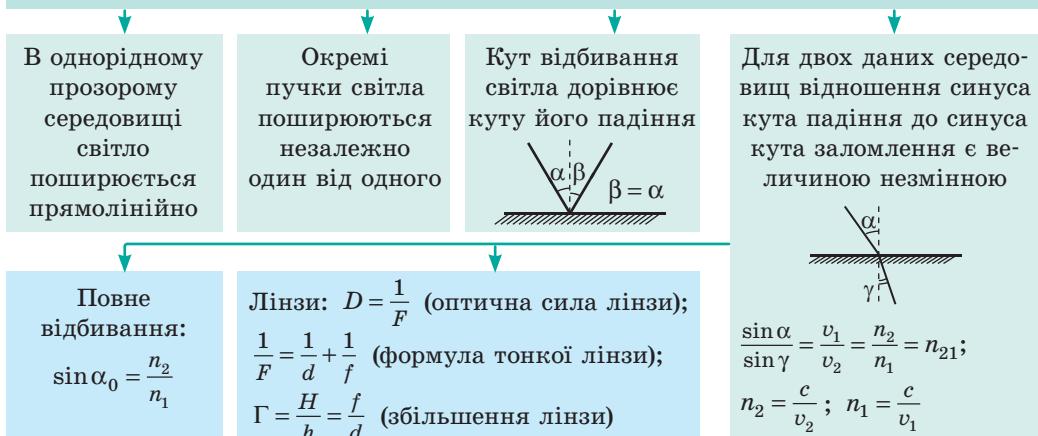
Визначте довжину хвилі світла червоного коліору за дифракційним спектром другого порядку. Порівняйте значення довжини хвилі світла червоного коліору, отримане в результаті цього експерименту, з тим, що було отримане в ході виконання експериментальної роботи. Запишіть причини розбіжності.

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ III «ОПТИКА»

1. Ви розширили свої знання про *світло*, яке є об'єктом вивчення *оптики* — розділу фізики, що вивчає явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль видимого діапазону та з їхньою взаємодією із речовиною.

2. Ви згадали *світлові явища* та закони поширення *світла*.

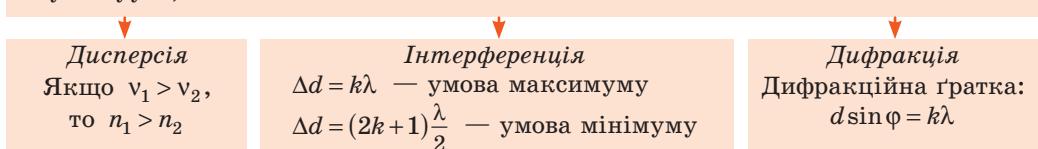
### Закони геометричної оптики



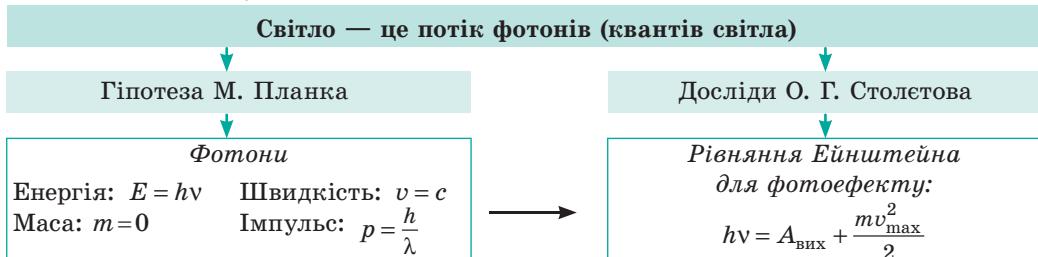
3. Ви дізналися про *хвильові властивості світла*.

*Світло* — це електромагнітна хвіля довжиною 400–760 нм.

$c = \lambda v$ , де  $c$  — швидкість поширення світла у вакуумі;  $\lambda$  — довжина світлової хвилі у вакуумі;  $v$  — частота світлової хвилі



4. Ви виявили, що *світло має одночасно хвильові та квантові властивості*.



5. Ви згадали про *електромагнітні хвилі* та їхні властивості, дізналися про особливості поширення електромагнітних хвиль у просторі.

**Електромагнітні хвилі** (електромагнітне випромінювання) — це поширення в просторі коливань електромагнітного поля

$$c = \lambda v$$



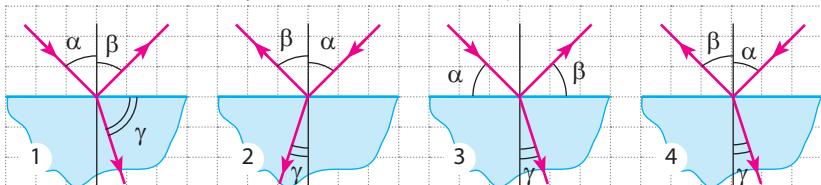


## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ III «ОПТИКА»

**Завдання 1.** Промінь монохроматичного світла довжиною 750 нм падає під кутом  $60^\circ$  із повітря на прозору плоскопаралельну пластину. Вважайте, що показник заломлення матеріалу, з якого виготовлено пластину, дорівнює 1,5; показник заломлення повітря вважайте — 1.

- (1 бал) На якому з наведених рисунків правильно зазначено всі три кути: кут падіння  $\alpha$ , кут відбивання  $\beta$  і кут заломлення  $\gamma$ ?

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.



- (2 бали) Якою є швидкість поширення світла в пластині?  
а)  $1,5 \cdot 10^8$  м/с; б)  $2 \cdot 10^8$  м/с; в)  $3 \cdot 10^8$  м/с; г)  $4,5 \cdot 10^8$  м/с.
- (2 бали) Якими є довжина і частота світлової хвилі, що поширюється у пластині?
- (3 бали) Обчисліть товщину пластини, якщо після проходження крізь неї світловий промінь зміщується на 10 мм.

**Завдання 2.** Предмет розташований на відстані 2 м від збиральної лінзи з фокусною відстанню 0,5 м.

- (1 бал) Якою є оптична сила лінзи?  
а)  $-0,5$  дптр; б)  $+1$  дптр; в)  $-1,5$  дптр; г)  $+2$  дптр.
- (2 бали) Який вид зображення дає лінза?  
а) дійсне збільшене; б) уявне збільшене; в) дійсне зменшене; г) уявне зменшене.
- (2 бали) На якій відстані від лінзи розташоване зображення предмета?

**Завдання 3.** Для визначення довжини світлової хвилі використали дифракційну ґратку, період якої дорівнює 0,016 мм.

- (2 бали) Які з наведених прикладів можна пояснити дифракцією світла?  
а) неможливість побачити атоми в мікроскоп;  
б) райдужне забарвлення крилець метеликів;  
в) райдужне забарвлення DVD-диска;
- (2 бали) Яку найбільшу довжину хвилі можна визначити за допомогою зазначеної дифракційної ґратки?
- (3 бали) Червона лінія спектра другого порядку розташована на відстані 14,2 см від середньої лінії. Відстань від ґратки до екрана — 1,5 м. Визначте довжини хвиль червоного і фіолетового променів, якщо ширина спектра другого порядку дорівнює 6,7 см.

**Завдання 4.** Електрони, що вилітають під впливом світла з поверхні металу, повністю затримуються гальмівним полем за різниці потенціалів 0,95 В. Робота виходу електронів з поверхні металу — 2 еВ.

- (2 бали) Якою є енергія квантів світла, що падає на катод?  
а) 0,95 еВ; б) 1,05 еВ; в) 2 еВ; г) 2,95 еВ.
- (3 бали) Визначте максимальну швидкість фотоелектронів.

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, полічіть суму балів. Поділіть суму на два. Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

## РОЗДІЛ IV. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

### § 36. ДОСЛІД Е. РЕЗЕРФОРДА. ПОСТУЛАТИ Н. БОРА. ЕНЕРГЕТИЧНІ РІВНІ АТОМА



30 квітня 1897 р. на засіданні Лондонського королівського товариства англійський фізик Джозеф Джон Томсон (1856–1940) доповів про експериментальне підтвердження існування субатомних частинок, а саме електронів, гіпотеза про існування яких була висунута фізиками за 40 років до цього. Дата доповіді Томсона вважається «днем народження» електрона. Можна сказати, що саме в цей день фізики остаточно переконалися в тому, що атом має складну будову. Тож яку будову має атом?

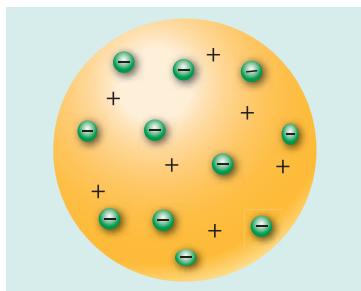


Рис. 36.1. Модель атома Томсона («пудинг із родзинками»)

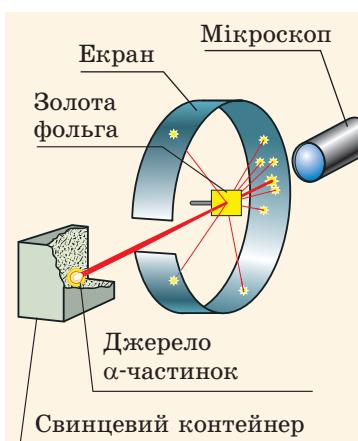


Рис. 36.2. Схема досліду з розсіюванням  $\alpha$ -частинок (дослід Резерфорда)

#### 1 Як з'явилася ядерна модель атома

Саме Дж. Томсон у 1903 р. запропонував одну з перших моделей будови атома. Він припустив, що атом має форму кулі, по всьому об'єму якої рівномірно розподілений позитивний заряд, а негативно заряджені електрони вкраплені в кулю (рис. 36.1); сумарний заряд електронів дорівнює заряду кулі, тому атом є електрично нейтральним.

Як ви вважаєте, чому модель атома, запропонована Дж. Томсоном, отримала назву «пудинг із родзинками»?

Подальший прогрес у дослідженнях внутрішньої структури атома пов'язаний з ім'ям англійського фізика Ернеста Резерфорда (1871–1937). У дослідах, проведених під його керівництвом у 1908–1911 рр., вивчалося розсіювання  $\alpha$ -частинок ядрами Ауруму.

Для дослідів учени використали  $\alpha$ -радіоактивну речовину, яку розташували у свинцовому контейнері з вузьким отвором. Пучок  $\alpha$ -частинок із контейнера спрямовувався на тонку золоту фольгу, а далі потрапляв в екран, покритий шаром кристалів цинк сульфіду (рис. 36.2). Якщо в такий екран влучала  $\alpha$ -частинка, то в місці її влучання відбувався слабкий спалах світла. Учені спостерігали спалахи за допомогою мікроскопа та реєстрували місця влучання  $\alpha$ -частинок в екран.

У результаті дослідів було виявлено:  
1) переважна більшість  $\alpha$ -частинок проходить

крізь золоту фольгу, не змінюючи напрямку свого руху; 2) деякі з  $\alpha$ -частинок відхиляються від початкової траєкторії; 3) приблизно одна з 20 000  $\alpha$ -частинок відскакує від фольги, начебто натикаючись на якусь перешкоду (рис. 36.3).

Зрозуміло, що Е. Резерфорд не міг бачити внутрішню структуру атома, тому він залучив логіку.

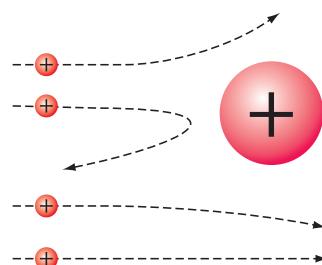
Якщо позитивний заряд і маса рівномірно розподілені по всьому об'єму атома (так вважав Дж. Томсон), то всі  $\alpha$ -частинки повинні пролетіти крізь фольгу практично не відхиляючись (маленькі електрони не можуть зупинити досить важкі й швидкі  $\alpha$ -частинки — ядра атома Гелію, що рухаються зі швидкістю 10 000 км/с).

Якщо ж позитивний заряд і маса зосереджені всередині атома — в невеликому порівнянні з атомом об'єкти, — то, зіштовхнувшись із ним, позитивно заряджена  $\alpha$ -частинка може відскочити назад, а ті  $\alpha$ -частинки, які пролітають близько до цього об'єкта, можуть відхилилися внаслідок електричного відштовхування.

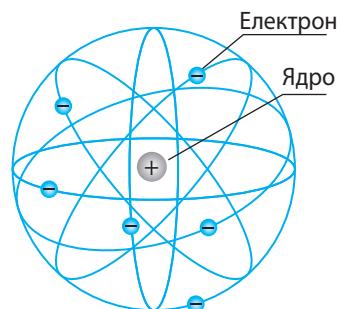
Очевидно, що результатам експерименту відповідає саме друге припущення. У 1911 р., після дослідів із розсіянням  $\alpha$ -частинок, Резерфорд запропонував **планетарну (ядерну) модель будови атома**: атом складається з позитивно зарядженого ядра, в якому зосереджена мало не вся маса атома; біля ядра по певних орбітах обертаються електрони (рис. 36.4).

Планетарна модель атома, близькуче пояснивши результати експериментів із розсіюванням  $\alpha$ -частинок, разом із тим *суперечила законам класичної електродинаміки*.

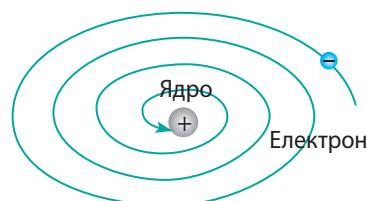
Річ у тім, що рух планетарною орбітою є рухом із прискоренням (доцентровим), а відповідно до теорії Дж. Максвелла прискорений рух зарядженої частинки має супроводжуватися випромінюванням електромагнітних хвиль. Таким чином, електрон в атомі мав би випромінювати електромагнітні хвилі, а отже, втрачати енергію. А наслідками цього були б зменшення швидкості руху електрона та його падіння на атомне ядро (рис. 36.5). Проте атом є дуже стійким...



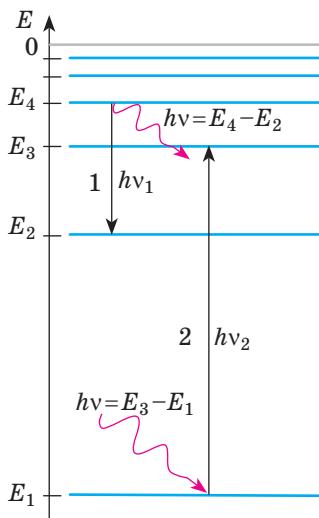
**Рис. 36.3.** Траєкторії  $\alpha$ -частинок, що пролітають поряд із ядром Ауруму



**Рис. 36.4.** Планетарна модель будови атома, запропонована Е. Резерфордом. Учений також розрахував розмір ядра: воно виявилося дуже малим — порядку  $10^{-15}$  м, що в 100 000 разів менше, ніж розмір атома ( $10^{-10}$  м).



**Рис. 36.5.** Якби електрон рухався навколо ядра планетарною орбітою, то відповідно до законів класичної фізики він мав би за  $10^{-8}$  с упасти на ядро, а власне атом припинив би своє існування



**Рис. 36.6.** Схема переходів атома з одного енергетичного стану в інший (переходи показано стрілками): у разі переходу на нижчий енергетичний рівень атом випромінює квант електромагнітної енергії (перехід 1), а поглинувши квант, атом стрибком переходить на вищий енергетичний рівень (перехід 2)

#### Зверніть увагу!

- Енергія будь-якого стаціонарного стану атома є від'ємною, оскільки зумовлена взаємодією електронної хмари і ядра атома, що мають заряди протилежних знаків.
- Енергію енергетичних станів атомів зазвичай подають в електрон-вольтах (eВ), тому, розв'язуючи задачі, *сталу Планка* краще брати в електрон-вольт-секундах:

$$h \approx 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eВ} \cdot \text{с}$$

## 2 Постулати Н. Бора

Модифікацію планетарної моделі запропонував у 1913 р. данський фізик *Нільс Бор* (1885–1962), який був упевнений, що розглядати будову атома слід із точки зору квантових уявлень. Бор припустив існування особливих станів атомів і сформулював два постулати. Наведемо постулати Бора в сучасному формулуванні.

### Перший постулат Н. Бора (про стаціонарні стани):

Атомна система може перебувати тільки в особливих стаціонарних (квантових) енергетичних станах, кожному з яких відповідає певне значення енергії; перебуваючи в стаціональному стані, атом не випромінює енергію.

### Другий постулат Н. Бора (про квантові стрибки):

При переході з одного стаціонарного енергетичного стану в інший атом випромінює або поглинає квант електромагнітної енергії:

$$h\nu = |E_k - E_m|,$$

де  $h\nu$  — енергія кванта;  $E_k$  — енергія початкового стану атома;  $E_m$  — енергія стану, в який перейшов атом.

*Випромінювання* кванта енергії (фотона) відбувається внаслідок переходу атома зі стану з більшою енергією у стан із меншою енергією ( $E_k > E_m$ ); у результаті *поглинання* кванта атом переходить зі стану з меншою енергією у стан із більшою енергією ( $E_k < E_m$ ) (рис. 36.6).



Атом Гідрогену перейшов зі стану з енергією  $-13,6$  еВ у стан з енергією  $-3,4$  еВ. У цьому випадку атом поглинув фотон чи випромінив?

Для атома дійсно стійким є тільки *стаціонарний стан із найнижчим рівнем енергії* — **основний стан**, у якому атом може перебувати нескінченно довго. Щойно атом буде переведено у стан із вищим рівнем енергії, тобто щойно атом поглине фотон певної частоти, як цей атом довільно переїде в основний стан із випромінюванням фотона такої самої частоти або кількох фотонів менших частот. Саме тому всі стаціонарні стани атома, *крім основного*, називають **збудженими станами**.

**Зверніть увагу!** Стационарний стан атома означає, що його електрони певним (визначенім)

чином локалізовані в просторі: у Н. Бора йшлося про *орбіти електрона*, зараз ми говоримо про *орбіталі*. При квантовому переході атома з одного енергетичного стану в інший змінюється форма електронної хмари.

### 3 Фізичні основи квантової механіки

Формулюючи свої постулати, Н. Бор, як і Е. Резерфорд, спирається на уявлення, що електрон усередині атома поводиться як частинка, що рухається певною орбітою. І в цьому була його помилка. Кількісна теорія, побудована Бором, виявилася недостатньою, щоб пояснити випромінювання складних атомів і випромінювання молекул, — учений зміг побудувати лише теорію випромінювання атома Гідрогену.

Річ у тім, що поведінка електрона всередині атома скоріше нагадує хвилю. «Але ж електрон — це частинка», — скажете ви і будете й праві, й не праві, адже електрон, як і світло, одночасно має властивості хвилі й частинки.

У 1924 р. французький фізик *Луї де Бройль* (1892–1987) висунув гіпотезу, згідно з якою *корпускулярно-хвильовий дуалізм є характерним не лише для фотонів, а й для будь-яких інших мікрочастинок*.

**Корпускулярно-хвильовий дуалізм** — універсальна властивість матеріальних об'єктів, яка полягає в тому, що в поведінці того самого об'єкта можуть виявлятись і корпускулярні, і хвильові риси.

Уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм частинок лежить в основі *квантової механіки*, яка є одним із основних напрямів сучасної фізики.

За Луї де Бройлем, формули для розрахунку енергії ( $E = h\nu$ ) та імпульсу ( $p = \frac{h}{\lambda}$ ) слід вважати *універсальними* — такими, що справджаються як для фотонів, так і для будь-яких інших частинок.

*Кожний рухомий частинці відповідає певна хвиля — хвиля де Бройля,* довжину якої визначають за формулою:  $\lambda = \frac{h}{p}$ .

Довжина хвилі де Бройля для всіх частинок виявляється дуже малою. Наприклад, для електронів, розігнаних до швидкості  $7,3 \cdot 10^6$  м/с, вона дорівнює  $1 \cdot 10^{-10}$  м (розмір атома), а для нейtronів, що вилітають з ядра Урану зі швидкістю  $4 \cdot 10^6$  м/с під час його поділу, — лише  $1 \cdot 10^{-13}$  м.

Разом із тим зараз експериментально виявлено хвильові властивості не тільки електронів та інших елементарних частинок (рис. 36.7), але й атомів і молекул.

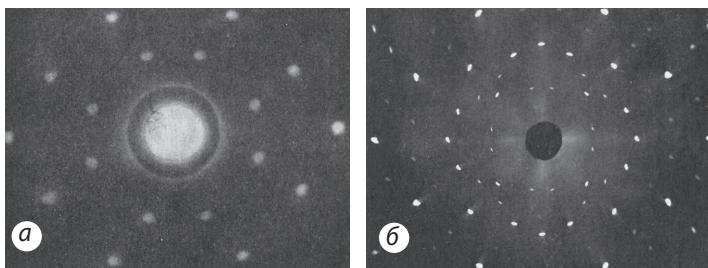
### Хвилі чи частинки?

І не хвилі,  
і не частинки!



«Речовина і світло одночасно мають властивості хвиль і частинок, однак у цілому це не хвилі, й не частинки, і не суміш того й іншого. Наши механічні поняття не спроможні повністю охопити реальність, для цього недостатньо реальних образів».

*Сергей Вавилов  
(1891–1951)  
радянський фізик,  
засновник школи  
фізичної оптики*



**Рис. 36.7.** Дифракція нейтронів (а) і рентгенівських променів (б) на монокристалі NaCl, який виконує функцію дифракційної гратки

Квантова механіка, на відміну від класичної, використовує інший метод опису стану системи. У будь-якій задачі класичної механіки матеріальна точка (або тіло) має визначені координати, які характеризують її положення в просторі, та визначену швидкість (або імпульс). У квантовій механіці й координата, й імпульс одночасно визначаються лише з деякою точністю ( $\Delta x$  — невизначеність координати;  $\Delta p$  — невизначеність імпульсу), тобто можна знайти лише ймовірність виявлення об'єкта в певній ділянці простору, ймовірність наявності в об'єкта певного імпульсу.



### Підбиваємо підсумки

- Дослідження, проведені фізиками в XIX ст., довели атомарну структуру речовини й підтвердили, що атом має складну будову.
- Експерименти під керівництвом Е. Резерфорда дозволили створити планетарну модель атома.
- Розвитком планетарної моделі атома стали постулати Бора, згідно з якими атоми можуть перебувати тільки в певних стаціонарних станах. У стаціональному стані атом не випромінює електромагнітні хвилі. Випромінювання/поглинання електромагнітних хвиль (чітко визначеній частоти) відбувається тільки при переході атома з одного стаціонарного стану в інший.
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм є універсальною властивістю будь-яких матеріальних об'єктів. Хвильові властивості матеріального об'єкта, який має імпульс  $p$ , характеризує довжина хвилі де Броїля:  $\lambda = \frac{h}{p}$ .



### Контрольні запитання

1. Опишіть модель атома Дж. Томсона.
2. Опишіть дослід під керівництвом Е. Резерфорда із розсіювання  $\alpha$ -частинок атомами Ауруму. Яких висновків дійшов Резерфорд на підставі результатів цього досліду?
3. У чому розбіжність між моделями атомів, запропонованими Дж. Томсоном і Е. Резерфордом?
4. У чому недосконалість планетарної моделі атома?
5. Сформулюйте постулати Н. Бора.
6. У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму?



### Вправа № 36

1. На схемі енергетичних рівнів деякого атома (рис. 1) подано переходи цього атома з одного енергетичного стану в інший. Під час яких переходів атом випромінює фотон? поглинає фотон?
2. Під час якого переходу атома (див. рис. 1) частота випроміненого або поглиненого ним фотона є найбільшою? Під час якого переходу є більшою довжина хвилі?

3. Під час переходу атомів Меркурію в основний стан випромінюються фотони з енергією 4,5 еВ. Якою є довжина хвилі випромінювання?
4. На схемі енергетичних рівнів деякого атома (рис. 2) подано переходи цього атома з одного енергетичного стану в інший. Визначте, фотон якої енергії поглине атом, якщо перейде: а) зі стану  $E_1$  у стан  $E_2$ ; б) зі стану  $E_1$  у стан  $E_4$ . Відомо, що  $\nu_{13} = 6 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{24} = 4 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{32} = 3 \cdot 10^{14}$  Гц.
5. У Великому адронному колайдері протони сягають швидкості, яка лише на 3 м/с менша від швидкості поширення світла у вакуумі. Визначте довжину хвилі де Бройля для цих протонів. Маса протона  $1,7 \cdot 10^{-27}$  кг.
6. Дізнайтесь, чому на рисунку на початку параграфа зображені трубки Крукса.

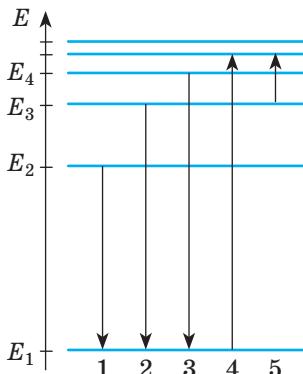


Рис. 1

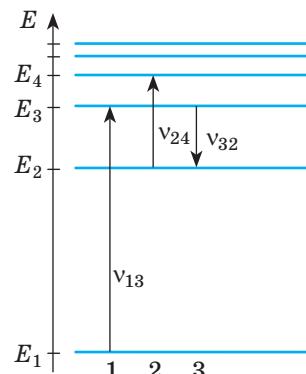


Рис. 2

## § 37. ВИДИ СПЕКТРІВ. ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ



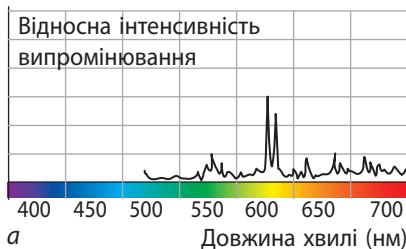
«Дві речі сповнюють душу завжди новим і все сильнішим здивуванням і благоговінням, чим частіше і триваліше ми розмірковуємо про них, — це зоряне небо наді мною і моральний закон у мені», — писав німецький філософ Іммануїл Кант (1724–1804). Утім світло, яке випромінюють зорі, — це не лише дивовижна краса: воно несе до нас інформацію про температуру і склад зір, про їх рух і процеси, що в них відбуваються. Слід лише навчитися читувати цю інформацію. Дізнаємось, які знання про будову атома допомогли «дотягнутися» до зір.

### 1

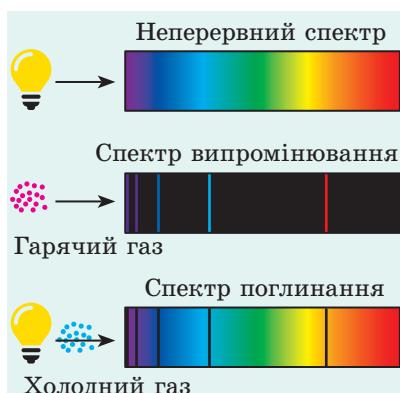
#### Лінійчасті спектри випромінювання і поглинання

Якщо кинути дрібочку кухонної солі в полум'я газового пальника, воно забарвлюється в жовтий колір. Причина цього явища вам уже відома з курсу хімії: до складу кухонної солі входить Натрій, і саме атоми цього елемента зумовлюють характерне жовте випромінювання. Розберемося в механізмі появи цього випромінювання.

У полум'ї пальника натрій нагрівається, і атоми Натрію переходять у збуджений стан. Повертаючись в основний стан, атоми *випромінюють*



**Рис. 37.1.** Лінійчастий спектр Натрію: а — залежність відносної інтенсивності випромінювання полуся, що містить атоми Натрію, від довжини хвилі; б — спектр випромінювання (подвійна жовта лінія на темному фоні); в — спектр поглинання (подвійна темна лінія на фоні неперервного спектра)



#### Зверніть увагу!

Газ найінтенсивніше поглинає світло саме тих довжин, які він випромінює в нагрітому стані, тому темні лінії спектра поглинання розташовані точно в тих місцях, де спостерігаються світлі лінії спектра випромінювання.

електромагнітні хвилі, причому відповідно до постулатів Бора — чітко визначених частот, а отже, і довжин. Для Натрію найбільша інтенсивність випромінювання припадає на довжини хвиль, які відповідають світлу жовтого кольору (рис. 37.1, а).

Численні дослідження довели, що за нагрівання до дуже високої температури атоми будь-якого хімічного елемента можуть випромінювати світло, вузький пучок якого розкладається призмою на кілька пучків. Якщо газ розріджений і перебуває в атомарному (не молекулярному) стані, то на екрані спектрографа спостерігаються *різнокольорові лінії*, розділені широкими темними смугами. Сукупність цих ліній називають **лінійчастим спектром випромінювання** (рис. 37.1, б).

Існує і зворотне явище: якщо біле світло пропускати через речовину в газоподібному стані, то спостерігаються *темні лінії на фоні неперервного спектра*. Сукупність цих ліній називають **лінійчастим спектром поглинання** (рис. 37.1, в).

Зазначимо, що лінійчастий спектр будь-якого конкретного хімічного елемента не збігається з лінійчастим спектром інших хімічних елементів, а отже, є своєрідною «візитівкою» елемента.

*Лінійчасті спекtri дають лише розріджені гази в атомарному стані:* спостерігаючи крізь призму за світінням газового розряду в газорозрядній трубці, можна побачити лінійчастий спектр випромінювання, характерний для газу, яким заповнена трубка.

Якщо густину газу збільшувати, то спектральні лінії поступово розширяються і, коли міжмолекулярна взаємодія між частинками (атомами, молекулами, йонами) газу стає суттєвою, лінії зливаються, утворюючи **неперервний спектр**. Саме тому *стиснені гази, рідини і тверді тіла в нагрітому стані дають неперервний спектр випромінювання*.



Який спектр ви побачите, дивлячись крізь спектрометр на нитку розжарення лампи? на Сонце? на газовий розряд у неоновій трубці?

**2****Молекулярні спектри**

Спектри молекулярних газів відрізняються від атомних спектрів і виглядають як *система смуг із численних і дуже близько розташованих одна до одної ліній*. Такий спектр називають **смугастим спектром** (рис. 37.2).

Така спектральна картина пояснюється тим, що при збудженні молекули відбуваються як енергетичні переходи в атомах (атоми переходят у стани з більшим рівнем енергії), так і збудження коливань атомів усередині молекули й обертання молекули. Енергія коливального руху атомів усередині молекули та енергія оберточного руху молекули теж підпорядковуються законам квантової фізики і мають низку дискретних значень. Таким чином, один енергетичний рівень розбивається на безліч коливальних підрівнів. Кількість можливих переходів (повернень в основний стан) різко збільшується, що зумовлює виникнення величезної кількості ліній спектра, які зливаються в широкі смуги.

**3****Основи спектрального аналізу**

Уже зазначалося, що дослідження лінійчастих спектрів випромінювання та поглинання одноатомних газів дозволяє ідентифікувати склад цих газів, адже кожний газ в атомарному стані дає власний набір ліній спектра (власний чітко визначений набір довжин хвиль). Ці лінії завжди розташовані в тих самих місцях спектра, незалежно від способу збудження атомів. Зараз визначено спектри всіх атомів й складено таблиці спектрів.

За інтенсивністю випромінювання можна визначити концентрацію певних елементів у даному розрідженому газі: чим більше атомів даного хімічного елемента в суміші газів, тим яскравіші відповідні лінії в спектрі випромінювання або темніші — в спектрі поглинання.

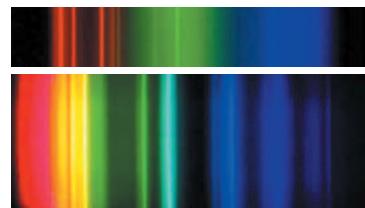
Метод якісного і кількісного визначення складу речовини за її спектром називають **спектральним аналізом**.

Методом спектрального аналізу було відкрито багато елементів. Першим із таких елементів був Цезій (від латин. *caesius* — блакитний) — один із найрідкісніших елементів на Землі. Цезій отримав назву завдяки двом яскравим блакитним лініям у спектрі випромінювання.

Спектральний аналіз — основний метод вивчення астрономічних об'єктів. Саме за його допомогою астрофізики дізналися про хімічний склад зір, газових хмар та інших астрономічних об'єктів.

Завдяки універсальності й надзвичайній точності (спектральний аналіз дозволяє виявити елемент у суміші або сполуці навіть якщо його маса не перевищує  $10^{-10}$  г) метод спектрального аналізу широко застосовують у хімії, металургії, ядерній фізиці.

Зазначимо, що спектральний аналіз молекулярних газів здійснюється за їх молекулярними спектрами, а от визначити склад речовини, яка перебуває у твердому або рідкому стані, за допомогою спектрального аналізу неможливо — спочатку її слід перевести в газоподібний стан.



**Рис. 37.2.** Смугасті спектри складаються з низки смуг, розділених темними проміжками

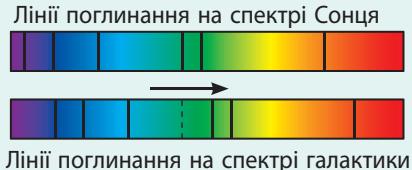
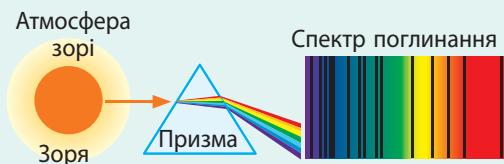
### Звідки ми знаємо властивості далеких зір

Ще в 1802 р. англійський лікар і хімік *Вільям Хайд Волластон* (1766–1828), розглядаючи у спектроскоп Сонце, помітив декілька темних ліній, які перетинали райдужну різновокольорову смугу. Він не надав цьому значення, вважаючи лінії недоліком призми. Але через 17 років німецький фізик *Йозеф Фраунгофер* (1787–1826) переконався, що причина виникнення темних ліній криється власне в Сонці. «Наблизив зорі» — так написано на могилі Й. Фраунгофера, а спектр поглинання Сонця й досі називають *фраунгоферовими лініями*.

- **Лінії поглинання у спектрах зір дозволяють нам дізнатися про їхній хімічний склад, температуру, тиск, швидкість тощо.**

- За М. Планком, зі збільшенням температури зорі максимум потужності її випромінювання зміщується в бік фіолетового кольору, тому, порівнюючи потужності світла різних кольорів, можна *вимірювати температуру поверхні зорі*.

- Вимірювати швидкості руху зір, відстані до них, а також відкривати екзопланети допомагає *ефект Допплера*. Він полягає в тому, що для спостерігача довжина хвилі від рухомого джерела змінюється: якщо джерело наближається, вона зменшується, якщо віддаляється — збільшується. Виявилося, що лінії спектрів віддалених галактик зміщаються в бік червоної частини спектра (**червоне зміщення**), тобто ці галактики віддаляються від нас із величезною швидкістю.



### Підбиваємо підсумки

- Дослідження фізиків у XIX ст. довели атомарну структуру речовини й підтвердили, що атом має складну будову.
- Атоми газоподібних речовин в атомарному стані за підвищених температур випромінюють електромагнітні хвилі чітко визначених частот — їм властивий лінійчастий спектр випромінювання. Лінійчастий спектр кожного елемента характеризується індивідуальним для цього елемента набором частот.
- Якщо газ опромінюють білим світлом, на суцільному спектрі спостерігаються чорні смуги безпосередньо на тих частотах, на яких відбувається випромінювання даного елемента. Це — лінійчастий спектр поглинання.
- Спектри випромінювання газів у молекулярному стані відрізняються від аналогічних спектрів атомарних газів наявністю великої кількості близько розташованих ліній, які під час спостережень часто зливаються в смуги (смугастий спектр).
- Дослідження спектрів випромінювання дозволяє одержати інформацію про елементний склад речовин; дослідження спектрів поглинання зір та інших астрономічних об'єктів дозволяє дізнатися про їх хімічний склад, температуру, тиск, швидкість та інші важливі параметри.



## Контрольні запитання

- Чому атоми випромінюють світло?
- Що мають спільного і чим відрізняються лінійчасті спектри випромінювання і поглинання?
- Чому кожному хімічному елементу притаманний власний лінійчастий спектр?
- Які речовини і в якому стані випромінюють лінійчастий спектр? смугастий спектр? неперервний спектр?
- Назвіть характерні риси спектрів випромінювання молекул.
- Де застосовують спектральний аналіз?
- Наведіть приклади застосування спектрального аналізу в астрономії.



## Вправа № 37

- Яким є спектр розрідженої атомарного водню? молекулярного водню? Яким є спектр сильно стисненого водню?
- На рис. 1 подано лінії спектра поглинання Гідрогену (а) і двох сумішей газів (б, в). У якій суміші є Гідроген?
- На рис. 2 подано лінії спектра поглинання двох газів (а, б) і суміші газів (в). Чи є в суміші гази а і б?

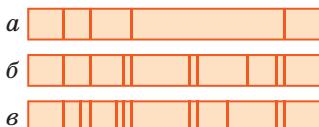


Рис. 1

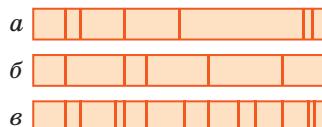


Рис. 2

- Чому під час спектрального аналізу молекулярних сполук використовують характеристичне, а не гальмівне рентгенівське випромінювання?
- Гелій у перекладі з грецької — «сонце», адже вперше його було виявлено саме на Сонці за допомогою спектрального аналізу. Дізнайтесь, які ще елементи були відкриті за допомогою спектрального аналізу.

## § 38. КВАНТОВО-ОПТИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ (ЛАЗЕРИ)



Наприкінці 50-х — на початку 60-х рр. ХХ ст. фахівці з квантової фізики здійснили низку відкриттів, які згодом значно змінили життя людства. Гідне місце серед цих відкриттів належить винайденню квантових генераторів. Що приховане під цією назвою, яка мовби зйшла зі сторінок науково-фантастичних романів?

### 1

#### Спонтанне і вимушене випромінювання

Якщо атом якимось чином перевести у збуджений стан, то, повертаючись в основний стан, він випромінює квант світла. «Стандартним» способом збудження світлового випромінювання є зіткнення атомів за високих температур, проте існують й інші (нетеплові) способи збудження атомів. Атоми речовини можуть перейти у збуджений стан під час хімічних реакцій, унаслідок обробки речовини звуком високої частоти, опромінення рентгенівськими та  $\gamma$ -променями, внаслідок розтирання, розколювання речовини тощо.

## Люмінесценція і люмінофори

Явище нетеплового світння речовини, яке відбувається після поглинання речовиною енергії збудження, називають **люмінесценцією**, а речовини, які здатні перетворювати поглинуту нетеплову енергію на світлове випромінювання, — **люмінофорами**.



Прикладом застосування люмінесценції є так звані лампи денного світла. Ці лампи являють собою трубки, заповнені випарами ртуті за низького тиску. Внутрішню поверхню трубок вкрито люмінофором. Ультрафіолетове випромінювання, яке утворюється внаслідок газового розряду у випарах ртуті, потрапляє на люмінофор, і він починає випромінювати світло, близьке до денного.

Деякі люмінофори використовують як індикатори радіації.

Органічні люмінофори — **люмогени** — застосовують для виготовлення яскравих флуоресцентних фарб, люмінесцентних матеріалів, наприклад матеріалів для дорожніх знаків тощо.

Час життя атома у збудженному стані зазвичай є дуже нетривалим і становить  $10^{-9}\text{--}10^{-10}$  с, після чого атом «самостійно» (спонтанно) повертається в основний стан із випромінюванням фотонів (або фотона) чітко визначених частот.

**Випромінювання, що виникає внаслідок спонтанного переходу атомів у стан із нижчим рівнем енергії, називають спонтанним випромінюванням.**

Спонтанне випромінювання некогерентне, адже кожен атом починає і закінчує випромінювати незалежно від інших. Проте в деяких випадках перехід атома зі збудженого стану в основний може відбуватися вимушено.

**Випромінювання, яке виникає під впливом зовнішньої електромагнітної хвилі, називають індуктованим (вимушеним) випромінюванням.**

Природно, що індуковане випромінювання ініціюється не будь-якою електромагнітною хвилею, а лише хвилею, яка має частоту, що дорівнює *власній частоті переходу*.

**Власна частота переходу** — частота фотона, унаслідок поглинання якого атом переходить з основного стану в збуджений.

Уже зазначалося, що атом перебуває у збудженному стані дуже короткий час. Однак є речовини, атоми яких мають збуджені стани, в яких вони можуть перебувати протягом доволі тривалого часу, порядку  $10^{-3}$  с. Такі збуджені стани атомів називають **метастабільними**. Індуковане випромінювання таких атомів спричинило появу принципово нового типу генераторів світла — **квантових генераторів**. Особливостями індукованого випромінювання є його монохроматичність і когерентність.

Згадайте, яке випромінювання називають монохроматичним? когерентним?

2

## Як працює квантовий генератор

Власне назва «квантовий генератор» має означати, що цей пристрій «виробляє» кванти електромагнітного випромінювання. Але ж якщо керуватися такою логікою, то звичайна лампа теж є квантовим генератором, проте це не так.

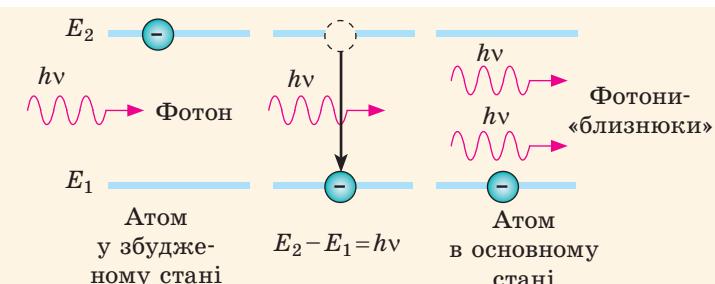


Рис. 38.1. Схема вимушеного випромінювання

**Квантовий генератор** — це джерело електромагнітних хвиль, дія якого будується на явищі вимушеного випромінювання.

Перший квантовий генератор був створений у 1954 р. двома незалежними одна від одної групами радіофізиків — радянськими фізиками Миколою Геннадійовичем Басовим (1922–2001), Олександром Михайловичем Прохоровим (1916–2002) і групою американських учених під керівництвом Чарлза Гарда Таунса (1915–2015). Винайдений квантовий генератор випромінював електромагнітні хвилі радіодіапазону.

У 1960 р. були створені перші **лазери** — *квантові генератори, які працюють в оптичному діапазоні*. Принцип роботи лазерів такий. Якщо на збуджений атом падає фотон, енергія якого дорівнює енергії збудження, то взаємодія цього фотона зі збудженим атомом спричиняє повернення атома в основний стан із випромінюванням вторинного фотона. Напрямок руху та енергія вторинного фотона такі самі, як у фотона, що спричинив випромінювання, тобто виникають два фотони-«блізнюки» (рис. 38.1). Якщо в речовині буде багато збуджених атомів, то кожний із фотонів-«блізнюків» спричинить появу двох нових «блізнюків» і т. д. Урешті-решт виникне «лавина» фотонів з однаковими характеристиками.

Розглянемо, як відбуваються посилення та генерація електромагнітного випромінювання в рубінових лазерах. Активним середовищем таких лазерів є кристал рубіну. Рубін — це кристал алюміній оксиду ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), у якому невелика кількість атомів Алюмінію ( $\sim 0,05\%$ ) заміщена атомами Хрому (атоми Хрому мають метастабільний стан). Кристалу надають форми циліндра (рис. 38.2), на два торці якого наносять відбивний шар (дзеркало). Одна із дзеркальних поверхонь повністю відбиває світло, друга є частково прозорою: 92 % світлового потоку відбивається від неї, а близько 8 % пропускається. Рубіновий стрижень поміщений усередину імпульсної спіральної лампи, яка є джерелом збуджувального випромінювання. Під час спалаху лампи атоми Хрому, поглинаючи випромінювання певної частоти, переходят із основного стану з енергією  $E_1$  у збуджені стани з енергіями  $E_3$ ,  $E_4$  (рис. 38.3).

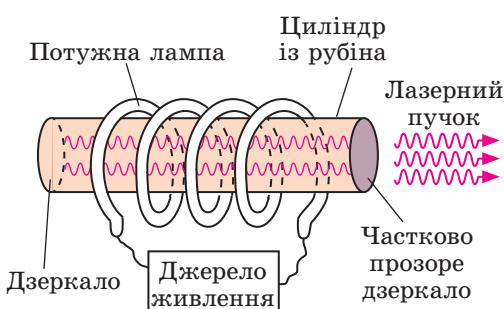
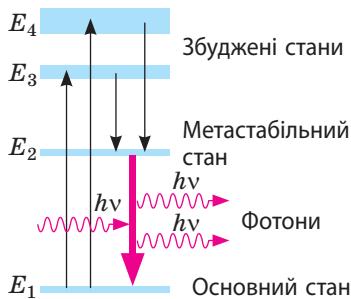


Рис. 38.2. Схематична будова рубінового лазера



**Рис. 38.3.** Схема переходів атомів Хрому у збуджений, метастабільний та основний стани

### Різні види квантових генераторів

Квантові генератори мають різні назви залежно від того, яку довжину хвилі випромінює генератор, і всі ці назви походять від абревіатури англійського словосполучення *amplification by stimulated emission of radiation* (посилення шляхом стимулюючого випромінювання).

- Першим квантовим генератором був **мазер** — пристрій, який випромінював когерентні електромагнітні хвилі в міліметровому радіодіапазоні (англ. *microwave* — мікрохвильовий).
- Квантові генератори іншого типу — **лазери** — працюють в оптичному діапазоні шкали електромагнітних хвиль (англ. *light* — світло).
- **Разер** — квантовий генератор, який випромінює рентгенівські хвилі.
- **Газер** — квантовий генератор, який...

**?** Сподіваемось, що вам не складно відповісти, в якому діапазоні шкали електромагнітних хвиль працюють газери.

Процес переведення атомів з основного стану в збуджений називають **накачуванням**, а лампу, яку використовують для цього, — **лампою накачування**.

Час перебування атомів Хрому в збудженному стані (на рівнях з енергіями  $E_3$ ,  $E_4$ ) є малим, і тому майже миттєво більша частина атомів переходить у метастабільний стан з енергією  $E_2$  (рис. 38.3).

Варто одному атому Хрому здійснити спонтанний переход із метастабільного стану в основний із випромінюванням фотона, як виникає лавина фотонів, спричинена індукованим випромінюванням атомів Хрому, що перебувають у метастабільному стані. Якщо напрямок руху первинного фотона є чітко перпендикулярним до торців рубінового циліндра (а такі фотони є завжди), то первинні та вторинні фотони відбиваються від одного торця й летять крізь кристал до другого торця. На своєму шляху фотони спричиняють вимушене випромінювання в інших атомах Хрому і т. д. Процес завершується за  $10^{-8}$ – $10^{-10}$  с. Потужність світлового випромінювання лазера може сягати  $10^9$  Вт, що перевищує потужність електростанції.

### 3

### Де застосовують лазери

Сучасні квантові генератори є досить різноманітними: вони працюють у різних діапазонах довжин хвиль (мазери, лазери, разери, газери), мають різну активну речовину (твердотілі, газові, напівпровідникові, рідкі). Ми не розглядаємо галузі застосування всіх типів квантових генераторів, зупинимося на **лазерах — квантових генераторах**, які працюють в оптичному діапазоні.

Як джерела когерентного монохроматичного світла лазери знайшли своє застосування в наукових дослідженнях.

Лазерні пучки застосовують у **косметології** та **медицині**, зокрема в хірургії, офтальмології (рис. 38.4). Під час операцій, здійснюваних за допомогою «лазерного скальпеля», край ран не кровоточать, а можливість «приварити» лазером відшаровану сітківку до очного дна врятувала багатьох людей від сліпоти.

Потужні лазери, зокрема інфрачервоні на вуглекислому газі, використовують для обробки матеріалів (різання, зварювання, свердління) — за допомогою сфокусованого лазерного пучка.

Лише за допомогою лазерів удалося реалізувати новий метод отримання зображень тривимірних об'єктів — *голографію*.

Передаючи лазерні пучки за допомогою волоконно-оптичного кабелю, здійснюють *телефонний і телевізійний зв'язок*. Висока частота-носій ( $\sim 10^{13} - 10^{14}$  Гц) дозволяє одним світлопроводом передати мільйони музичних і телевізійних передач.

За допомогою лазерного випромінювання визначають відстань до рухомих об'єктів та їхню швидкість. *Лазерна локація* точніша за радіолокацією: світлові хвилі значно коротші, ніж радіохвилі, тому лазерні пучки менше розширяються і майже не обгибають перешкоди.



### Підбиваємо підсумки

- Атом випромінює світло під час переходу з одного енергетичного стану в інший.
- Якщо збуджений атом переходить у стан із нижчим рівнем енергії самовільно, таке випромінювання називають спонтанним. Спонтанне випромінювання є некогерентним і поліхроматичним.
- Випромінювання, яке виникає під впливом зовнішньої електромагнітної хвилі, називають індукованим (вимушеним). Таке випромінювання є когерентним і монохроматичним.
- Джерела когерентного монохроматичного електромагнітного випромінювання називають квантовими генераторами. Квантові генератори, які працюють в оптичному діапазоні довжин електромагнітних хвиль, називають лазерами. Лазери застосовують у медицині, для передачі інформації тощо.



### Контрольні запитання

1. Яке випромінювання називають спонтанним? індукованим (вимушеним)? Називте їх властивості.
2. Яку властивість повинні мати атоми активної речовини в оптичному квантовому генераторі?
3. Як улаштований лазер?
4. Поясніть, як працює лазер.
5. Наведіть приклади застосування лазерів.



### Вправа № 38

1. Наведіть приклади люмінесценції в природі.
2. Чому звичайну лампу не можна вважати квантовим генератором?
3. Максимального енергетичного рівня атоми рубінового лазера сягають у разі поглинання світлових хвиль довжиною 560 нм, при цьому лазер генерує хвилі довжиною 694 нм. Яку енергію випромінює атом під час переходу зі стану з найбільшим рівнем енергії у метастабільний стан?



**Рис. 38.4.** Застосування лазерів у медицині: а — лазерне лікування шкіри; б — лазерний скальпель; в — лазерна корекція зору

4. Лазерна указка — це портативний квантово-оптичний генератор. Скільки фотонів за секунду випромінює такий генератор, якщо він працює на довжині хвилі 532 нм, а потужність його випромінювання становить 5 мВт? Світло якого кольору випромінює ця лазерна указка?
5. Оберіть певну галузь застосування лазерів і підготуйте коротке повідомлення про розвиток і перспективи розвитку цієї галузі.
6. Одну з груп дослідників, що займаються вивченням лазерів і розробляють високоінтенсивні лазерні системи, очолює канадійка Донна Стрикланд (народ. 1959 р.), лауреатка Нобелівської премії з фізики (2018 р.). Дізнайтесь, за що вона отримала цю почесну нагороду.



### Експериментальне завдання

Підготуйте низку цікавих дослідів із використанням лазерної указки. Методику проведення дослідів можете придумати самі або пошукати необхідну інформацію в Інтернеті.



### Фізика в цифрах

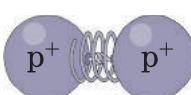
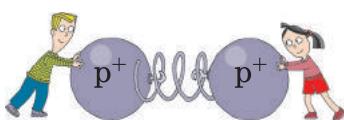
#### *Яку лазерну указку вибрати*

Існують різні лазери. За однакової потужності зелені лазери сприймаються людським оком яскравішими, ніж червоні, у 4–15 разів, ніж синьо-фіолетові — у 20 разів, ніж фіолетові — у 190 разів.

Навіть малопотужні лазери можуть бути небезпечними для зору. Кожен пристрій має інформацію щодо класу його небезпеки. У таблиці наведено інформацію про те, якої потужності зелені лазери доцільно використовувати за різних умов.

Подія	Потужність зеленого лазера, мВт
Презентація в закритому приміщенні	5
«Екскурсія» зоряним небом за містом	5
«Екскурсія» зоряним небом у місті	20–50
Екскурсія, пов’язана з показом пам’яток архітектури	50–100 (хмарний день); 200–300 (сонячний день)

## § 39. ПРОТОННО-НЕЙТРОННА МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНІ СИЛИ. ЕНЕРГІЯ ЗВ’ЯЗКУ



Уявіть собі перші теплі весняні дні та велику перерву в школі. Ледь пролунав дзвоник — і першокласники миттю розбігаються шкільним подвір’ям. Здається, немає сили, що може утримати їх разом. На перший погляд, протони в ядрі мають поводитися подібно до цих школярів — «розбігтися» в різні боки під впливом електростатичних сил відштовхування, а саме ядро має миттєво розвалитися. Але ж цього не відбувається! Логічно припустити, що є якісь інші сили, які утримують протони разом. Що це за сили?

**1****Згадуємо будову ядра атома**

Атомне ядро складається із частинок двох видів: **протонів**, які мають позитивний електричний заряд, і **нейtronів**, які не мають заряду. Маса протона приблизно дорівнює масі нейтрона і в 1800 разів більша за масу електрона.

Протони і нейtronи, що входять до складу ядра атома, називають **нуклонами** (від латин. *nucleus* — ядро).

Сумарну кількість протонів і нейtronів в атомі називають **нуклонним (масовим) числом** і позначають символом  $A$ .

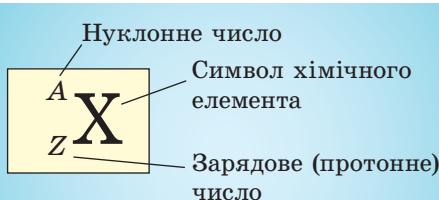
Атом є електрично нейтральним: у нейтральному атомі сумарний заряд протонів у ядрі дорівнює сумарному заряду електронів. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона (елементарному заряду  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), тому *в нейтральному атомі кількість протонів дорівнює кількості електронів*.

Кількість протонів у ядрі називають **зарядовим (протонним) числом** і позначають символом  $Z$ . Порядковий номер елемента в Пе-ріодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва відповідає кількості протонів у ядрі, тобто зарядовому числу.

Знаючи зарядове ( $Z$ ) і масове ( $A$ ) числа ядра атома, можна визначити кількість нейtronів ( $N$ ) у цьому ядрі:  $N = A - Z$ .

Вид атомів, який характеризується певним значенням зарядового числа та певним значенням масового числа, називають **нуклідом** (рис. 39.1).

Якщо різні нукліди мають однакове зарядове число, то їхні хімічні властивості



$$\text{Кількість нейtronів: } N = A - Z$$

**Історія вивчення атомного ядра**

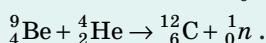
**1911 р.** Англійський фізик *Ернест Резерфорд* (1871–1937) у досліді з розсіюванням  $\alpha$ -частинок ядрами Аурому відкрив ядро атома.

**1913 р.** Англійський фізик *Генрі Мозлі* (1887–1915) вимірював електричні заряди атомних ядер.

**1919 р.** *E. Резерфорд*, опромінюючи  $\alpha$ -частинками азот, відкрив **протон**  ${}_1^1 p$  — ядро атома Гідрогену.

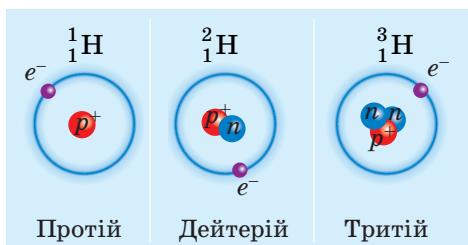
**1920 р.** *E. Резерфорд*, опромінюючи  $\alpha$ -частинками низку елементів, виявив, що з їх ядер  $\alpha$ -частинки теж вибивають протони. Учений дійшов висновку, що ядра атомів усіх елементів містять протони, і припустив можливість існування в атомному ядрі нейтральної частинки з масою, що приблизно дорівнює масі протона.

**1932 р.** Англійський фізик *Джеймс Чедвік* (1891–1974) під час дослідів з опроміненням  $\alpha$ -частинками берилію відкрив **нейtron**  ${}_0^1 n$ :



**1932 р.** Радянський фізик *Дмитро Дмитрович Іваненко* (1904–1994) і німецький фізик *Вerner Карл Гейзенберг* (1901–1976) висунули гіпотезу щодо **протонно-нейtronної будови ядра**. (Д. Д. Іваненко народився в Полтаві, працював у Харкові, Києві, Ленінграді (зараз Санкт-Петербург), Москві.)

**Рис. 39.1.** Позначення нукліда хімічного елемента



**Рис. 39.2.** Ізотопи Гідрогену, які існують у природі;  $e^-$  — електрон,  $p^+$  — протон,  $n$  — нейtron

є однаковими — нукліди належать одному хімічному елементу.

Різновиди атомів того самого хімічного елемента, ядра яких містять однакове число протонів, але різну кількість нейтронів, називають **ізотопами** («однакові за місцем»).

Кожний хімічний елемент має декілька ізотопів (рис. 39.2).

Скільки протонів і нейтронів містять ядра Урану  $^{238}_{92}\text{U}$  і  $^{235}_{92}\text{U}$ ? Чи можна їх назвати ізотопами?

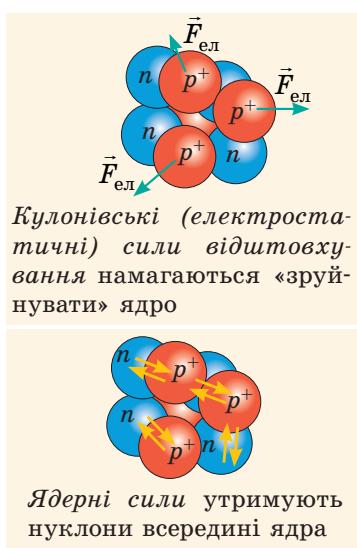
## 2

### Якими є основні властивості ядерних сил

Ядра є дуже стійкими. Але яким чином у складі одного ядра і на дуже близькій відстані один від одного утримуються протони, адже однайменно заряджені частинки відштовхуються, нейтрони не мають заряду, а сили гравітаційного притягання у  $10^{36}$  разів менші від сил електростатичного відштовхування?

З'ясовано, що нуклони притягуються один до одного завдяки **сильній взаємодії**, яка набагато сильніша за електромагнітну взаємодію. Зазначимо, що сильна взаємодія — це фундаментальна взаємодія, яка виявляється не лише як взаємодія нуклонів.

Сили, які діють між протонами й нейтронами в ядрі та забезпечують існування атомних ядер, називають **ядерними силами** (рис. 39.3).



**Рис. 39.3.** Сили взаємодії між нуклонами всередині ядра

#### Основні властивості ядерних сил:

1) це **найпотужніші сили**, які існують у природі, — вони у 100–1000 разів більші за електростатичні сили відштовхування двох протонів, розташованих на близькій відстані ( $\sim 10^{-15}$  м);

2) є **тільки силами притягання**;

3) є **близькодійними**: вимірювання показали, що ядерні сили виявляються лише на відстанях, які приблизно дорівнюють розміру нуклона ( $\sim 10^{-15}$  м);

4) **не залежать від заряду**: на однаковій відстані сили, що діють між двома протонами, між двома нейтронами або між протоном і нейтроном, є однаковими;

5) **мають властивість насищення**: нуклон виявляється здатним до ядерної взаємодії одночасно лише з невеликою кількістю розташованих поряд нуклонів.

**3****Енергія зв'язку атомного ядра**

Ядерні сили набагато сильніші за кулонівські, тому, щоб «розділити» ядро на окремі нуклони, необхідно виконати роботу, тобто витратити певну енергію.

Енергію, необхідну для повного розщеплення ядра на окремі нуклони, називають **енергією зв'язку атомного ядра** ( $E_{\text{зв}}$ ).

За законом збереження енергії така сама енергія повинна виділитися під час утворення ядра. А як розрахувати цю енергію? Відповідь дала теорія відносності: енергія і маса пов'язані формулою Ейнштейна:

$$E = mc^2.$$

Ретельні вимірювання довели, що *маса будь-якого ядра менша від суми мас нуклонів, із яких це ядро складається*:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n,$$

де  $m_{\text{я}}$  — маса ядра;  $Zm_p$  — маса протонів у ядрі;  $Nm_n$  — маса нейtronів у ядрі.

Різницю маси нуклонів, з яких складається ядро, і маси ядра називають **дефектом мас**:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{я}}$$

Оскільки під час утворення ядра маса системи зменшується, то енергію, яка виділиться під час утворення ядра, а отже, й енергію зв'язку можна визначити за формулою:

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = [(Zm_p + Nm_n) - m_{\text{я}}] \cdot c^2$$

**4****Питома енергія зв'язку атомного ядра**

Для того щоб розуміти, чому одні ядерні реакції відбуваються з поглинанням енергії, а під час інших енергія, навпаки, виділяється, необхідно знати про *питому енергію зв'язку*.

**Питома енергія зв'язку**  $f$  — це фізична величина, яка характеризує ядро певного нукліда й чисельно дорівнює енергії зв'язку, що припадає на один нуклон ядра:

$$f = \frac{E_{\text{зв}}}{A},$$

де  $E_{\text{зв}}$  — енергія зв'язку;  $A$  — кількість нуклонів у ядрі (масове число).

**Зверніть увагу!**

- У ядерній фізиці не зручно використовувати одиниці СІ (маси та енергії частинок є дуже малими), тому зазвичай масу частинок подають в атомних одиницях маси (1 а. о. м. = =  $1,660\,54 \cdot 10^{27}$  кг), а енергію — у мегаелектрон-вольтах (1 MeV =  $1,602\,22 \times 10^{-13}$  Дж). Нескладно довести: якщо  $\Delta m = 1$  а. о. м., то  $E_{\text{зв}} = 931,5$  MeV, отже:

$$E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot k,$$

$$\text{де } k = 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}}$$

- Якщо в задачі дано масу нейтрального атома (а не масу ядра), то, щоб врахувати масу електронів, дефект мас обчислюють за формулою:

$$\Delta m = (Zm_H + Nm_n) - m_{\text{ат}},$$

де  $m_{\text{ат}}$  — маса нейтрального атома,  $m_H$  — маса атома Гідрогену  ${}_1^1\text{H}$ ;  $m_n$  — маса нейтрона.

- ?** Доведіть останню рівність, врахувавши, що кількість електронів у нейтральному атомі дорівнює кількості протонів у його ядрі, а атом Гідрогену  ${}_1^1\text{H}$  складається з одного протона й одного електрона.

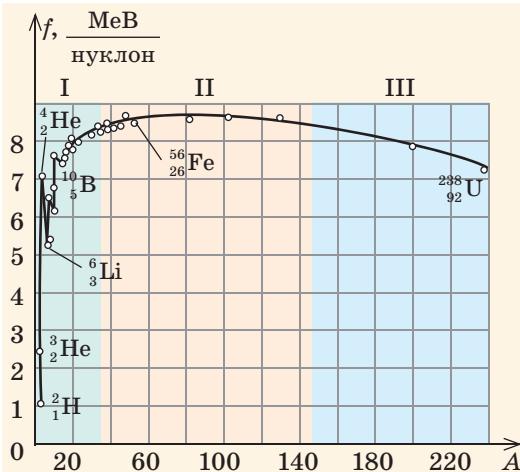


Рис. 39.4. Графік залежності питомої енергії зв'язку ядер різних нуклідів від кількості нуклонів у ядрі:  $f(A)$

На графіку залежності  $f(A)$  можна виділити три ділянки.

- Ділянка I (легкі ядра) — крива залежності поступово піднімається, тобто питома енергія зв'язку збільшується; це означає, що в разі синтезу (об'єднання) легких ядер у більш важкі буде виділятися енергія.

- Ділянка II (ядра елементів середньої частини Периодичної системи хімічних елементів) майже рівна, на цій ділянці крива досягає слабкого максимуму, який означає, що елементи цієї частини найбільш стійкі.

- Ділянка III (важкі ядра) — питома енергія зв'язку плавно зменшується, тому ядра стають менш стійкими і під час поділу цих ядер буде вивільнятися енергія.

На рис. 39.4 подано графік залежності питомої енергії зв'язку ядер різних нуклідів від кількості нуклонів у ядрі — графік залежності  $f(A)$ . Аналіз графіка дозволяє знайти способи, якими можна отримати ядерну енергію: перший спосіб полягає в поділі важкого ядра (реакція поділу), другий — в об'єднанні легких ядер в одне (реакція синтезу). Унаслідок і реакції поділу, і реакції синтезу утворюються ядра з більшою питомою енергією зв'язку: на один нуклон припадає більший дефект мас — маса, що залишилась, перетворюється на енергію.

## 5

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Обчисліть питому енергію зв'язку ядра Гелію ( ${}^4_2\text{He}$ ). Необхідні дані знайдіть у таблиці «Маса деяких нуклідів» (Додаток 1).

**Аналіз фізичної проблеми.** У ядрі Гелію  ${}^4_2\text{He}$  2 протони ( $Z=2$ ) і 4 нуклони ( $A=4$ ). Використавши числові значення мас атома Гідрогену, нейтрона та атома Гелію, одержимо дефект мас в атомних одиницях маси та знайдемо питому енергію зв'язку.

**Дано:**

$$m_{\text{He}} = 4,002\,60 \text{ а. о. м.}$$

$$m_{\text{H}} = 1,007\,83 \text{ а. о. м.}$$

$$m_n = 1,008\,66 \text{ а. о. м.}$$

$$k = 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а. о. м.}}$$

$$Z=2$$

$$A=4$$

$$f = ?$$

**Пошук математичної моделі, розв'язання.**

$$\text{За означенням питомої енергії зв'язку: } f = \frac{E_{\text{зв}}}{A}.$$

$$\text{Енергію зв'язку визначимо за дефектом мас } \Delta m: E_{\text{зв}} = \Delta m k, \\ \text{де } \Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{He}}.$$

Знайдемо значення шуканої величини:

$$\Delta m = 2 \cdot 1,007\,83 \text{ а. о. м.} + 2 \cdot 1,008\,66 \text{ а. о. м.} - 4,002\,60 \text{ а. о. м.} = \\ = 0,030\,38 \text{ а. о. м.}$$

$$E_{\text{зв}} = 0,030\,37 \text{ а. о. м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а. о. м.}} \approx 28,3 \text{ МеВ};$$

$$f \approx \frac{28,3 \text{ МеВ}}{4 \text{ нуклона}} \approx 7,07 \frac{\text{МеВ}}{\text{нуклон}}.$$

**Відповідь:**  $f \approx 7,07 \text{ МеВ / нуклон.}$



## Підбиваємо підсумки

- Ядра атомів складаються з нуклонів — протонів і нейтронів. Кількість протонів ( $Z$ ) у ядрі атома даного елемента дорівнює порядковому номеру цього елемента в Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва, кількість нуклонів ( $A$ ) дорівнює масовому числу.
- Різновиди хімічного елемента, атоми яких містять у своїх ядрах однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, називають ізотопами даного хімічного елемента.
- У ядрі нуклони утримуються разом завдяки дії ядерних сил. Ядерні сили є близькодійними — на відстанях, більших за розмір нуклона, вони не виявляються.
- Маса ядра атома є меншою, ніж сума мас нуклонів у його складі. Зазначену різницю називають дефектом мас  $\Delta m$ . Дефект мас визначає енергію зв'язку:  $E_{\text{зв}} = \Delta m c^2$ .
- Вивільнення ядерної енергії можливе, наприклад, унаслідок злиття (синтезу) легких ядер і поділу важких ядер.

## Контрольні запитання



1. Із яких частинок складається атомне ядро? 2. Як визначити кількість протонів і нейтронів у ядрі? Наведіть приклад. 3. Дайте означення нукліда. 4. Які нукліди називають ізотопами? Наведіть приклади. 5. Який тип взаємодії забезпечує утримання нуклонів у ядрі атома? 6. Дайте означення ядерних сил, назвіть їхні властивості. 7. Що таке дефект мас і як його визначити? 8. Дайте означення енергії зв'язку. Як її обчислити? 9. Охарактеризуйте питому енергію зв'язку як фізичну величину. 10. Чому під час злиття легких ядер і під час поділу важких вивільняється енергія?

## Вправа № 39



1. Визначте, скільки протонів і скільки нейтронів міститься в ядрі Флуору  $^{19}_9\text{F}$ ; ядрі Телуру  $^{127}_{52}\text{Te}$ ; ядрі Меркурію  $^{201}_{80}\text{Hg}$ .
2. Для ядра ізотопу якого елемента енергія зв'язку дорівнює нулю?
3. За графіком залежності питомої енергії зв'язку від масового числа (див. рис. 39.4) визначте, виділенням чи поглинанням енергії супроводжується розпад ядра, яке складається з 210 нуклонів.
4. Знайдіть дефект мас, енергію зв'язку та питому енергію зв'язку ядра Нітрогену  $^{14}_7\text{N}$ .
5. Якою є питома енергія зв'язку ядра ізотопу Оксигену-17?
6. У результаті розпаду ядра Урану-235 утворились ядра Барію-142 і Кріптону-91. Скільки енергії при цьому виділилося? Питома енергія зв'язку ядра Урану-235 — 7,59 MeV/нуклон, ядра Барію-142 — 8,38 MeV/нуклон, ядра Кріптону-91 — 8,55 MeV/нуклон.
7. Наведений у пункти 1 § 39 перелік імен учених, які зробили значний внесок у дослідження будови атомного ядра, можна продовжити: *Ірен Жоліо-Кюрі, Ліза Майтнер, Отто Ган, Френсіс Вільям Астон* та ін. За розробку оболонкової моделі ядра лауреаткою Нобелівської премії з фізики (1963 р.) стала *Марія Гепнерт-Майєр*. Підготуйте коротке повідомлення (1–2 хв) про відкриття одного з цих дослідників чи дослідниць.

## § 40. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ОСНОВНИЙ ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ



Алхіміки Середньовіччя мріяли про філософський камінь, який перетворював би всі речовини на золото. «Сучасна алхімія» — так назвав Е. Резерфорд свою книгу про перетворення атомних ядер. Про те, які зміни відбуваються з ядром під час радіоактивного випромінювання, йтиметься в цьому параграфі.

### 1

#### Згадуємо історію відкриття радіоактивності

Історія відкриття радіоактивності почалася з відкриття рентгенівського випромінювання. Поштовхом до досліджень стало припущення, що рентгенівське випромінювання може виникати при флуоресценції деяких речовин, опромінених сонячним світлом. Такою речовиною і скористався французький фізик *Анрі Антуан Беккерель* (1852–1908) у лютому 1896 р. Для досліджень він випадково обрав здатну до флуоресценції маловідому сіль Урану.

Знаючи, що рентгенівські промені, на відміну від світлових, проходять крізь чорний папір, учений поклав на загорнуту в чорний папір фотопластинку крупинки уранової солі й виніс на сонячне світло. Після проявлення на фотопластинці виявилися темні плями саме в тих місцях, де лежала уранова сіль. Таким чином було з'ясовано, що уранова сіль дійсно висилає випромінювання, яке має велику проникну здатність.

Продовжити дослідження Беккерелю завадила хмарна погода, і він поклав готову до досліду фотопластинку з урановою сіллю та мідним хрестом між ними в шухляду стола. Через три дні учений вирішив проявити фотопластинку. Результат був несподіваним: на пластинці з'явився контур хреста. Тож сонячне світло було ні до чого: сіль Урану сама, без впливу зовнішніх факторів, висилає невидиме випромінювання.

Пізніше таке випромінювання назувати **радіоактивним випромінюванням**; **здатність речовин до радіоактивного випромінювання — радіоактивністю; нукліди, ядра яких мають таку здатність, — радіонуклідами**.

#### Відкриття Радіо

Термін радіоактивність був уведений у науку *Марією Склодовською-Кюрі* (1867–1934). «Чи тільки Уран висилає “промені Беккереля”?» — з пошуку відповіді на це запитання почала вона свою роботу з вивчення радіоактивності. У 1898 р. М. Склодовська-Кюрі та її чоловік *П'єр Кюрі* (1859–1906) відкрили два нові елементи — Радій і Полоній. Радій виявився в мільйони разів активнішим за уран, але отримати цю речовину в достатній для дослідів кількості виявилося досить складно. Знадобилося ще 4 роки копіткої роботи (майже вручну подружжям було оброблено 11 т руди!), щоб отримати крихітну пробірку радію.

За дослідження радіоактивності по-партнерськи Кюрі разом із А. Беккерелем отримали в 1903 р. Нобелівську премію з фізики, а в 1911 р. Марія Склодовська-Кюрі одержала ще й Нобелівську премію з хімії. За всю історію тільки чотири особи ставали лауреатами Нобелівської премії двічі.



## 2 Природа радіоактивного випромінювання

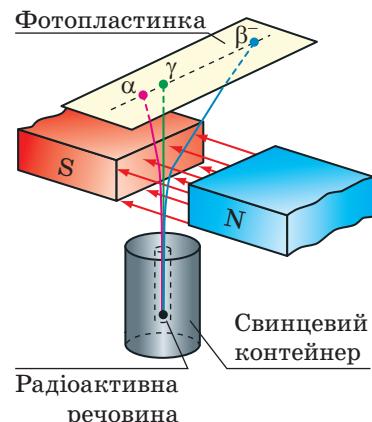
Досліди з вивчення природи радіоактивного випромінювання показали, що різні радіонукліди можуть випромінювати промені трьох видів:

1)  $\alpha$ -випромінювання — позитивно заряджені важкі частинки (ядра атомів Гелію);

2)  $\beta$ -випромінювання:  $\beta^-$ -випромінювання — негативно заряджені легкі частинки (швидкі електрони),  $\beta^+$ -випромінювання — позитивно заряджені легкі частинки (швидкі позитрони);

3)  $\gamma$ -випромінювання — високочастотні електромагнітні хвилі.

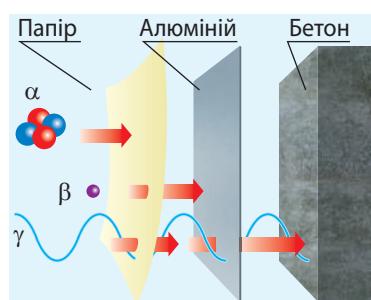
На рис. 40.1 подано схему одного з таких дослідів: пучок радіоактивного випромінювання потрапляє спочатку в сильне магнітне поле постійного магніту, а потім на фотопластинку. Після проявлення фотопластинки на ній чітко видно три темні плями, які свідчать про те, що урановий зразок висилає промені трьох видів.



**Рис. 40.1.** Схема досліду з вивчення природи радіоактивного випромінювання: урановий зразок ( $^{238}_{92}\text{U}$  і  $^{235}_{92}\text{U}$  у суміші з їх дочірніми радіонуклідами) є джерелом  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -випромінювань

Види радіоактивного випромінювання			
$\alpha$ -випромінювання	$\beta^-$ -випромінювання	$\beta^+$ -випромінювання	$\gamma$ -випромінювання
Потік $\alpha$ -частинок — ядер атомів Гелію $^4_2\text{He}$ , які рухаються зі швидкістю порядку $10^7$ м/с. $q_\alpha = +2e \approx 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m_\alpha \approx 4,0$ а. о. м $\approx 6,6 \cdot 10^{-27}$ кг	Потік $\beta^-$ -частинок — електронів $^0_{-1}e$ , які летять зі швидкістю, наближеною до швидкості світла. $q(\beta^-) = -e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m_e \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ а. о. м $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг	Потік $\beta^+$ -частинок — позитронів $^0_{+1}e$ , які летять зі швидкістю, наближеною до швидкості світла. $q(\beta^+) = -e \approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m(e^+) \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ а. о. м $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг	$\gamma$ -випромінювання — електромагнітні хвилі надзвичайно високої частоти (понад $10^{18}$ Гц). Швидкість поширення цих хвиль у вакуумі становить $3 \cdot 10^8$ м/с.

Радіоактивне випромінювання не фіксується органами чуття людини, проте може привести до згубних наслідків. Простіше за все захиститися від  $\alpha$ - і  $\beta$ -випромінювань: щоб зупинити  $\alpha$ -частинки, достатньо тонкого аркуша паперу (0,1 мм);  $\beta$ -випромінювання повністю поглинається, наприклад, алюмінієвою пластинкою завтовшки 1 мм. Найбільш небезпечним для людини є  $\gamma$ -випромінювання.

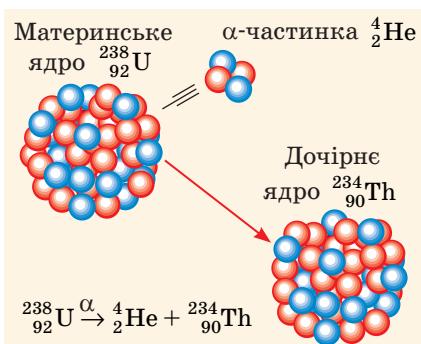


Які методи захисту від радіаційного випромінювання ви знаєте?

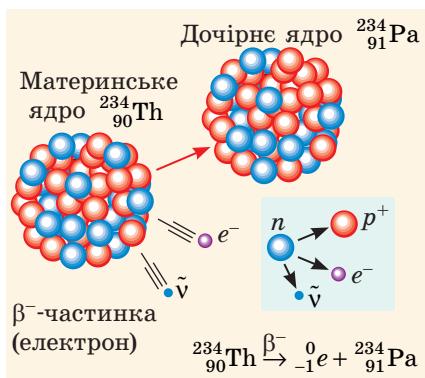
### Як захиститися від радіоактивного випромінювання

Дізнавшись про викид радіоактивних речовин, слід зробити, зокрема, таке.

- Сховатися в будівлі: бетонні й цегляні стіни повністю захищають від  $\alpha$ - і  $\beta$ -випромінювання й добре поглинають  $\gamma$ -випромінювання.
- Зачинити всі вікна, двері, вентиляційні тратки.
- Зняти вуличний одяг, запакувати його в поліетиленовий пакет, прийняти душ.
- Герметично запакувати запас питної води, їжі.
- Намагатися вживати ѹодомісткі продукти (горіхи, морські водорості тощо), продукти, багаті на клітковину.



**Рис. 40.2.** Під час  $\alpha$ -розпаду материнське ядро спонтанно розпадається на дві частини:  $\alpha$ -частинку і дочірнє (нове) ядро



**Рис. 40.3.** Під час  $\beta^-$ -розпаду один із нейтронів материнського ядра перетворюється на протон, електрон і електронне антинейтрино:

${}_0^1n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\nu$ ; електрон і антинейтрино випромінюються, протон залишається в ядрі (утворюється нове ядро)

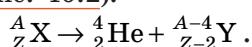
### Правила зміщення

Вивчення радіоактивності показало, що **радіоактивне випромінювання є наслідком перетворень ядер атомів**. Причому ці перетворення відбуваються **довільно** (без зовнішніх причин), їх не можна прискорити або сповільнити, вони не залежать від зовнішнього впливу, тобто на них не впливають зміни тиску і температури, дії магнітного й електричного полів, хімічні реакції, зміна освітленості тощо.

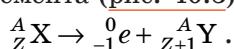
**Радіоактивність** — здатність ядер радіонуклідів довільно перетворюватися на ядра інших елементів із випромінюванням мікрочастинок.

Випромінюючи  $\alpha$ - чи  $\beta$ -частинки, вихідне (материнське) ядро перетворюється на ядро атома іншого елемента (дочірнє ядро);  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпади можуть супроводжуватися  $\gamma$ -випромінюванням. Після низки експериментів було встановлено загальні правила таких перетворень — **правила зміщення**:

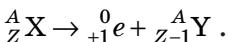
1. Під час  $\alpha$ -розпаду кількість нуклонів у ядрі зменшується на 4, протонів — на 2, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на 2 одиниці менший від порядкового номера вихідного елемента (рис. 40.2):



2. Під час  $\beta^-$ -розпаду кількість нуклонів у ядрі не змінюється, а кількість протонів збільшується на 1, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на одиницю більший за порядковий номер вихідного елемента (рис. 40.3):



3. Під час  $\beta^+$ -розпаду кількість нуклонів у ядрі не змінюється, а кількість протонів зменшується на 1, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на одиницю менший за порядковий номер вихідного елемента (рис. 40.4):



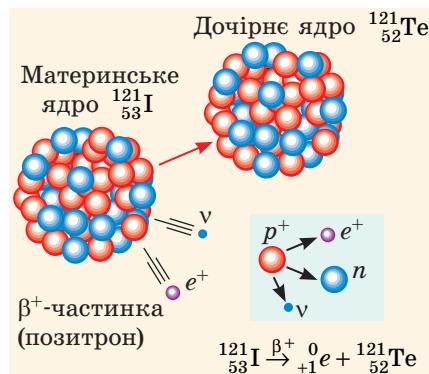
Ядро якого елемента утвориться внаслідок  $\beta^-$ -розпаду ядра Радію  ${}_{88}^{228}\text{Ra}$ ?

**Зверніть увагу!** Під час  $\beta$ -розпаду окрім електрона (або позитрона) з ядра вилітає ще одна частинка — **антинейтрино** або **нейтрино**. Через дуже малу масу і відсутність заряду ці частинки дуже слабко взаємодіють із речовиною, і це утруднює їх виявлення в експерименті (див. § 43).

**4**

#### Основний закон радіоактивного розпаду

Візьмемо закриту скляну колбу, що містить певну кількість Радону-220, — він є радіоактивним, і його ядра спонтанно розпадаються з випромінюванням  $\alpha$ -частинок. А чи можна дізнатися, яке саме ядро розпадеться першим? А яке останнім? Ні, дізнатися про це неможливо: *роздад того чи іншого ядра радіонукліда — подія випадкова*. Водночас поведінка будь-якої радіоактивної речовини підлягає чітко визначеній закономірності: кожний радіонуклід має власний *період піврозпаду* (див. таблицю). Так, у наведеному випадку, приблизно за 55,6 с кількість радону в колбі зменшиться вдвічі. Ще через 55,6 с із решти залишиться теж половина і т. д. Таким чином, інтервал часу 55,6 с є періодом піврозпаду Радону-220.



**Рис. 40.4.** Під час  $\beta^+$ -розпаду один із протонів материнського ядра перетворюється на нейtron, позитрон і електронне нейтрино:  ${}_{1}p \rightarrow {}_{0}n + {}_{+1}^{0}e + {}_{0}^{0}\nu$ ; позитрон і нейтрино випромінюються, нейtron залишається в ядрі (утворюється нове ядро)

*Період піврозпаду деяких радіоактивних нуклідів*

Радіонуклід	Період піврозпаду
Йод-131	8 діб
Калій-40	1,25 млрд років
Карбон-14	5700 років
Кобальт-60	5,3 року
Плутоній-239	24 тис. років
Радій-226	1600 років
Радон-220	55,6 секунди
Радон-222	3,8 доби
Стронцій-89	50,5 доби
Стронцій-90	28,9 року
Уран-235	0,7 млрд років
Уран-238	4,5 млрд років
Цезій-137	30 років

**Період піврозпаду**  $T_{1/2}$  — це фізична величина, що характеризує радіонуклід і дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер даного радіонукліда.

Одиниця періоду піврозпаду в СІ — **секунда**:  $[T_{1/2}] = 1 \text{ с (s)}$ .

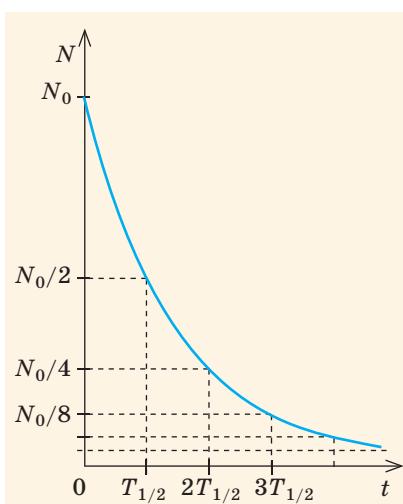
Нехай у початковий момент часу радіонуклідний зразок містить  $N_0$  ядер деякого радіонукліда. Унаслідок радіоактивного розпаду кількість цих ядер із часом буде зменшуватися. Через час  $t_1$ , що дорівнює періоду піврозпаду

$(t_1 = T_{1/2})$ , кількість ядер, що не розпалися, зменшиться вдвічі:  $N_1 = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot 2^{-1}$ ; ще через період піврозпаду  $(t_2 = 2T_{1/2})$  із решти ядер залишиться теж половина:  $N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0 \cdot 2^{-1}}{2} = N_0 \cdot 2^{-2}$ ; через час  $t_3 = 3T_{1/2}$  кількість ядер дорівнюватиме:  $N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0 \cdot 2^{-2}}{2} = N_0 \cdot 2^{-3}$ . Отже, через  $n$  періодів піврозпаду  $(t = nT_{1/2})$  у зразку залишиться  $N = N_0 \cdot 2^{-n}$  ядер радіонукліда (рис. 40.5).

Урахувавши, що  $n = \frac{t}{T_{1/2}}$ , маємо **основний закон радіоактивного розпаду**:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

де  $N$  — кількість ядер радіонукліда, що залишились у зразку через час  $t$ ;  $N_0$  — початкова кількість ядер;  $T_{1/2}$  — період піврозпаду;  $t$  — час розпаду.



**Рис. 40.5.** Графік залежності кількості  $N$  ядер радіонукліда, які залишилися в зразку, від часу  $t$ .  $T_{1/2}$  — період піврозпаду;  $N_0$  — початкова кількість ядер

### Зверніть увагу!

1 бекерель — це дуже мала активність, тому використовують позасистемну одиницю активності — **кюрі (Ki)**:

$$1 \text{ Ki} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

### 5

### Активність радіонукліда

I Радон-220, і Радон-222 є  $\alpha$ -радіоактивними (іхні ядра можуть спонтанно розпадатися на  $\alpha$ -частинку і відповідне дочірнє ядро). Тож якщо кількість атомів Радону-220 і Радону-222 є однаковою, з якого зразка за 1 с вилетить більше  $\alpha$ -частинок?

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює кількості розпадів, що відбуваються в певному радіоактивному джерелі за секунду, називають **активністю**  $A$  радіоактивного джерела.

Одиниця активності в СІ — **бекерель**:  $[A] = 1 \text{ Бк (Bq)}$ .

1 Бк — це активність такого радіоактивного джерела, в якому за 1 с відбувається 1 акт розпаду:  $1 \text{ Бк} = 1 \text{ розпад/с} = \text{с}^{-1}$ .

Якщо зразок містить атоми лише одного радіонукліда, то активність цього зразка можна визначити за формулою:

$$A = \lambda N,$$

де  $N$  — кількість атомів радіонукліда в зразку на даний час;  $\lambda$  —  **стала радіоактивного розпаду** — фізична величина, яка є характеристикою радіонукліда та пов'язана з періодом піврозпаду співвідношенням:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}; [\lambda] = \text{с}^{-1}.$$

Із часом у радіоактивному зразку кількість ядер радіонуклідів, що не розпалися, зменшується, тому зменшується й активність зразка (рис. 40.5).

### 6 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте масу урану ( $^{235}\text{U}$ ), який має таку саму активність, що й цезій ( $^{137}\text{Cs}$ ) масою 2 мг.

*Дано:*

$$M(\text{U}) = 235 \text{ г/моль}$$

$$M(\text{Cs}) = 137 \text{ г/моль}$$

$$m(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ г}$$

$$A(\text{U}) = A(\text{Cs})$$

$$T_{1/2}(\text{U}) = 7 \cdot 10^8 \text{ років}$$

$$T_{1/2}(\text{Cs}) = 30 \text{ років}$$

$$m(\text{U}) = ?$$

*Розв'язання.* За формулою активності:  $A = \lambda N$ ; де  $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ .

Кількість  $N$  ядер радіонукліда дорівнює:  $N = \frac{m}{M} N_A$ , де  $N_A$  — стала Авогадро. Отже, активність кожного радіонукліда дорівнює:  $A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} N_A$ . За умовою  $A(\text{U}) = A(\text{Cs})$ , отже, маємо:  $\frac{\ln 2}{T_{1/2}(\text{U})} \cdot \frac{m(\text{U})}{M(\text{U})} N_A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}(\text{Cs})} \cdot \frac{m(\text{Cs})}{M(\text{Cs})} N_A$ .

$$\text{Після скорочення: } \frac{m(\text{U})}{T_{1/2}(\text{U}) \cdot M(\text{U})} = \frac{m(\text{Cs})}{T_{1/2}(\text{Cs}) \cdot M(\text{Cs})} \Rightarrow m(\text{U}) = \frac{m(\text{Cs}) T_{1/2}(\text{U}) M(\text{U})}{T_{1/2}(\text{Cs}) M(\text{Cs})}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[m(\text{U})] = \frac{\text{г} \cdot \text{рік} \cdot \text{г} / \text{моль}}{\text{рік} \cdot \text{г} / \text{моль}} = \text{г}; \quad m(\text{U}) = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^8 \cdot 235}{30 \cdot 137} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ (г)}.$$

*Відповідь:*  $m(\text{U}) = 80 \text{ кг}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Більшість нуклідів, що існують у природі, є радіоактивними: їхні ядра довільно розпадаються, випромінюючи мікрочастинки та перетворюючись на інші ядра. Якщо ядро випромінює  $\alpha$ -частинку (ядро атома Гелію), то кількість нуклонів у ядрі зменшується на 4, а протонів — на 2; якщо ядро випромінює  $\beta^-$ -частинку (електрон), то кількість протонів у ядрі збільшується на 1; якщо ядро випромінює  $\beta^+$ -частинку (позитрон), то кількість протонів у ядрі зменшується на 1. I  $\alpha$ -розпад, i  $\beta$ -розпад можуть супроводжуватися  $\gamma$ -випромінюванням — високочастотним електромагнітним випромінюванням.

- Період піврозпаду  $T_{1/2}$  — це фізична величина, що характеризує радіонуклід і дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер цього радіонукліда.

- Кількість ядер  $N$ , що залишились у зразку через час  $t$ , визначає основний закон радіоактивного розпаду:  $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$ .

### Контрольні запитання



- Як було відкрито явище радіоактивності?
- Наведіть приклади природних радіоактивних елементів.
- Опишіть дослід із вивчення природи радіоактивного випромінювання.
- Наведіть означення радіоактивності.
- Які види радіоактивного випромінювання ви знаете? Якою є їхня фізична природа? Звідки в ядрі беруться електрони?
- Як захиstitися від радіоактивного випромінювання?
- Що відбувається з ядром атома під час випромінювання  $\alpha$ -частинки?
- Відбувається з  $\beta$ -частинки?
- Дайте означення періоду піврозпаду.
- Що таке активність радіоактивного джерела? Чи змінюється вона з часом?

**Вправа № 40**

- Під час радіоактивного розпаду з ядра  $^{238}_{92}\text{U}$  випромінюється  $\alpha$ -частинка. На ядро якого елемента перетворюється при цьому ядро Урану-238?
- Ядро Натрію ( $^{24}_{11}\text{Na}$ ), розпадаючись, випромінює електрон. Який це вид радіоактивного розпаду? Ядро якого елемента при цьому утворюється?
- Період піврозпаду Радію-226 становить 1600 років. Скільки ядер цього радіонукліда розпадеться за 4800 років, якщо початкова кількість ядер Радію у зразку  $10^9$ ?
- Період піврозпаду Цезію-137 становить 30 років. Скільки відсотків ядер цього радіонукліда розпадеться за 120 років?
- В організмі людини вміст Калію становить приблизно 0,19 % її маси; радіоактивний нуклід Калію  $^{40}_{19}\text{K}$  становить 0,012 % загальної кількості Калію. Скільки ядер цього радіонукліда розпадається за 1 секунду в організмі людини масою 100 кг?
- Окрім зовнішнього існує небезпека внутрішнього опромінення: радіонукліди можуть потрапити в організм з їжею або водою. Дізнайтесь про причини підвищеної небезпеки цього опромінення та способи захисту від нього.

## § 41. ОТРИМАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОНУКЛІДІВ. МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ ЙОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ



Вивчаючи § 40, ви з'ясували, що ядра деяких хімічних елементів можуть самовільно перетворюватися на інші ядра і що на швидкість цього перетворення не впливають ані тиск, ані температура, ані найпотужніші електромагнітні поля. Дізнаємось, як змусити ядро перетворитися на інше ядро, які ядра при цьому можна отримати, як їх ідентифікувати і де застосувати.

**Зверніть увагу!**

Під час будь-яких ядерних реакцій **виконуються закони збереження:**

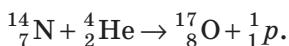
- закон збереження електричного заряду;
- закон збереження енергії-маси;
- закон збереження імпульсу;
- закон збереження масового числа.

**?** Переконайтесь, що в ядерних реакціях, поданих у § 41, і сума зарядових чисел, і сума масових чисел у лівій і правій частинах кожного рівняння є однаковими.

**1****Декілька фактів про ядерні реакції**

Перетворення атомних ядер під час їх взаємодії з елементарними частинками або іншими ядрами називають **ядерною реакцією**.

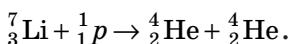
Першу ядерну реакцію здійснив Ернест Резерфорд у 1919 р. Це була реакція взаємодії  $\alpha$ -частинки (ядро атому Гелію) з ядром атома Нітрогену, внаслідок якої утворилися ядро атома Оксигену і протон:



Чому саме  $\alpha$ -частинка? Річ у тім, що  $\alpha$ -частинки мають величезну швидкість і **можуть наблизитися до ядра настільки, що почнуть діяти ядерні сили**.

Продовжуючи досліди, вчені з'ясували, що енергія  $\alpha$ -частинок не вистачає, щоб

достатньо наблизитися до ядер, які мають порядковий номер більший за 19, адже зі збільшенням заряду ядра збільшується й сила кулонівського відштовхування. Щоб дослідити такі ядра, можна було б використати протони (іхній заряд удвічі менший), але швидких протонів у природі не існує. Саме тоді виникла ідея створення прискорювачів заряджених частинок. Перша ядерна реакція на швидких протонах була здійснена в лабораторії Е. Резерфорда в 1932 р.: унаслідок опромінення літію швидкими протонами вдалося розщепити ядро атома Літію на дві  $\alpha$ -частинки:



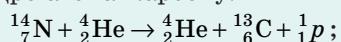
Сучасні прискорювачі забезпечують можливість штучного перетворення або руйнування будь-якого атомного ядра.

Ще більше можливостей для дослідження ядерних реакцій учени отримали у зв'язку з відкриттям нейтрона (1932 р.): *нейtron не має заряду, тому не відштовхується ядром*, отже, його не потрібно прискорювати. У ході дослідження реакцій на нейтронах було виявлено, що *повільний нейtron захоплюється ядром краще, ніж швидкий нейtron*. Цей факт був установлений експериментально групою молодих італійських учених під керівництвом *Енріко Фермі* (1901–1954) у 1934 р. Саме використання повільних нейтронів дозволило з часом створити ядерний реактор (див. § 42).

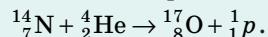
### Здійснення першої ядерної реакції

У 1919 р. Е. Резерфорд виявив, що під час проходження  $\alpha$ -частинок крізь повітря виникають протони. Ученій висунув два *припущення*:

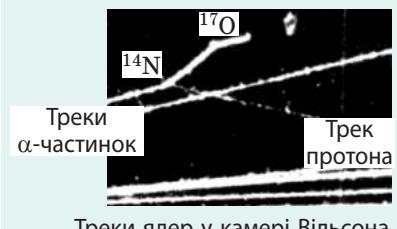
- 1)  $\alpha$ -частинка як швидкий «снаряд» вибиває протон із ядра атома Нітрогену (із азоту на 80 % складається повітря), і це ядро перетворюється на ядро атома Карбону:



- 2)  $\alpha$ -частинка захоплюється ядром атома Нітрогену, нове ядро випромінює протон і перетворюється на ядро Оксигену:



Служним виявилося друге припущення — відповідну реакцію 6 років потому спостерігали в камері Вільсона.



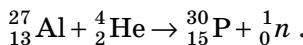
Треки ядер у камері Вільсона. Характерна «вилка» показує, що в момент зіткнення утворюються дві частинки

## 2

### Одержання та використання радіоактивних ізотопів

Згадаємо: ізотопи — це різновиди атомів того самого хімічного елемента, ядра яких містять ту саму кількість протонів, але різну кількість нейтронів. Відповідно **радіоактивні ізотопи** — це різновиди атомів того самого хімічного елемента, ядра яких можуть довільно перетворюватися на ядра інших елементів із випромінюванням мікрочастинок і  $\gamma$ -променів.

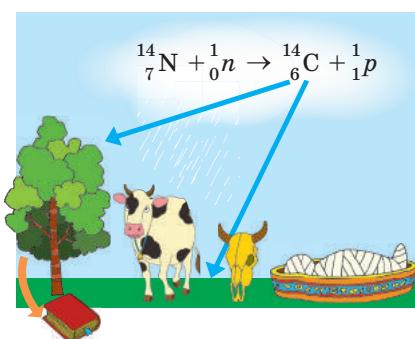
Перший штучний радіоактивний ізотоп — ізотоп Фосфору ( ${}^{30}_{15}\text{P}$ ) — одержало подружжя *Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі* в 1934 р. Опромінюючи алюміній  $\alpha$ -частинками, вони спостерігали випромінювання нейтронів:



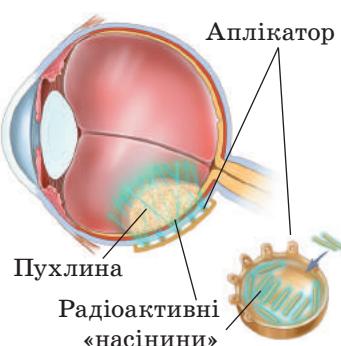
Цікавим було те, що одночасно з випромінюванням нейтронів випромінювались і позитрони.



**Рис. 41.1.** Для покращення якості добрива з'ясовують, як його засвоюють рослини. Для цього до добрива додають радіоактивний ізотоп, а потім досліджують рослини на радіоактивність

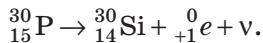


**Рис. 41.2.** За вмістом  $\beta^-$ -радіоактивного Карбону  ${}_{6}^{14}\text{C}$ , період піврозпаду якого 5700 років, можна визначити вік археологічних знахідок: після загибелі дерева, тварин тощо кількість  $\beta$ -розпадів зменшується вдвічі кожні 5700 років



**Рис. 41.3.** Для лікування деяких видів пухлин використовують радіоактивні «аплікатори», які наносять на поверхню пухлини (брахітерапія)

Наявність позитронів означала, що отримане ядро Фосфору-30 було  $\beta^+$ -радіоактивним:



Зараз для кожного хімічного елемента за допомогою ядерних реакцій одержані *штучні радіоактивні ізотопи*, і зазвичай вони є  $\beta^+$ -радіоактивними. У промислових масштабах ізотопи одержують в ядерних реакторах, використовуючи як продукти поділу, так і нейтрони, якими опромінюють речовини.

Штучні та природні радіоактивні ізотопи широко використовують у медицині, сільському господарстві, промисловості, енергетиці тощо. Можна визначити три напрями використання радіоактивних ізотопів.

1. *Використання радіоактивних ізотопів як індикаторів.* Радіоактивність є своєрідною міткою, за допомогою якої можна виявити наявність елемента, простежити за його «поведінкою» під час фізичних і біологічних процесів тощо (див., наприклад, рис. 41.1, 41.2). Саме за допомогою таких індикаторів було доведено, що організм людини майже повністю оновлюється протягом двох років.

2. *Використання радіоактивних ізотопів як джерел  $\gamma$ -випромінювання.* За допомогою  $\gamma$ -випромінювання знищують мікроби ( $\gamma$ -стерилізація), виявляють дефекти всередині металів ( $\gamma$ -дефектоскопія), лікують онкологічні захворювання (рис. 41.3). Опромінення насіння невеликими дозами  $\gamma$ -випромінювання сприяє значному підвищенню врожайності, а опромінення великими дозами може привести до мутацій і отримання рослин із поліпшеними властивостями (радіоселекція).

3. *Використання радіоактивних ізотопів як джерел ядерної енергії.* Наприклад, як паливо для ядерних реакторів широко використовують Плутоній — трансурановий елемент, атоми якого утворюються внаслідок захоплення нейтрону ядром Урану-238:



### 3 Пристрої для реєстрації йонізуючого випромінювання

Загальний принцип реєстрації йонізуючого випромінювання полягає в реєстрації дії, яку чинить це випромінювання.

**Шар фотоемульсії.** Швидка заряджена частинка, рухаючись у шарі фотоемульсії, що містить кристали  $\text{AgBr}$ , на своєму шляху вириває електрони з деяких йонів Брому. Під час проявлення в змінених кристалах утворюються «зерна» металевого срібла — в шарі фотоемульсії проступають сліди (треки) первинної частинки та всіх заряджених частинок, що виникли внаслідок ядерних взаємодій. За товщиною і довжиною треків можна визначити заряди частинок та їхню енергію.

**Сцинтиляційний лічильник** — детектор сцинтиляції — світлових спалахів, які відбуваються в певних речовинах унаслідок ударів заряджених частинок. Саме такі лічильники використовував Е. Резерфорд у своєму досліді з визначення будови атомів (див. § 36).

**Камера Вільсона** (рис. 41.4) — це *трековий детектор*. Вона являє собою ємність, заповнену парою спирту або ефіру. Коли поршень різко опускають, то внаслідок адіабатного розширення пара охолоджується і стає *перенасиченою*. Коли в перенасичену пару потрапляє заряджена частинка, на своєму шляху вона йонізує молекули пари — отримані іони стають центрами конденсації. Ланцюжок крапель сконденсованої пари, який утворюється вздовж траєкторії руху частинки (трек частинки), знімають на камеру або фотографують (рис. 41.5).

**Бульбашкова камера** є теж *трековим детектором*. Принцип її роботи подібний до камери Вільсона, а відмінність полягає в тому, що робочим тілом у бульбашковій камері є пірергріта рідина: іони, які виникають вздовж траєкторії руху частинки, стають центрами конденсації — утворюється ланцюжок бульбашок.

**Газорозрядний лічильник** (рис. 41.6) і **йонізаційна камера** (рис. 41.7) працюють за одним принципом: робоче тіло — газ — розміщено в електричному полі з високою напругою; заряджена частинка, що пролітає крізь газ, йонізує його, і в пристрой виникає газовий розряд.

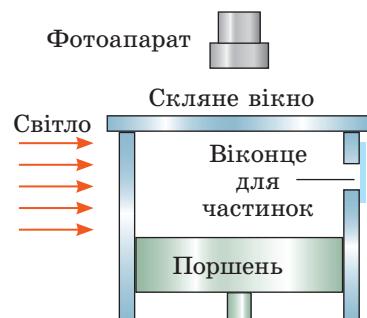


Рис. 41.4. Будова камери Вільсона

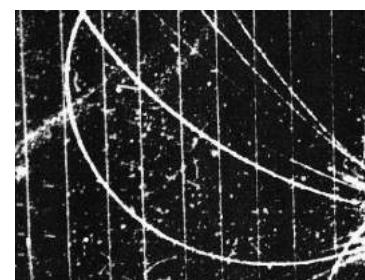


Рис. 41.5. Фотографія треків заряджених частинок у камері Вільсона

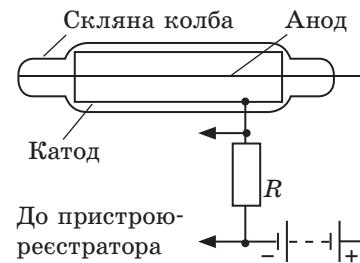


Рис. 41.6. Будова газорозрядного лічильника (лічильника Гейгера — Мюллера)



Рис. 41.7. Йонізаційна камера

У деяких йонізаційних камерах уздовж траєкторії руху частинки спостерігається виникнення стримерів — «згустків» газового розряду, тому такі камери є *трековими детекторами*. В інших видах йонізаційних камер і в газорозрядних лічильниках фіксується імпульс струму — це *імпульсні детектори*. Саме імпульсними є детектори **дозиметрів** — приладів для вимірювання дози *йонізуючого випромінювання*, отриманого приладом за деякий інтервал часу.

 Представники яких професій мають обов'язково користуватися дозиметрами?

## 4

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** У результаті поглинення ядром Нітрогену  $^{14}_7\text{N}$   $\alpha$ -частинки з'являються невідомий елемент і протон. Запишіть ядерну реакцію, визначте невідомий елемент.

**Аналіз фізичної проблеми.** Для розв'язання задачі запишемо ядерну реакцію. У лівій і правій частинах формули реакції суми зарядів, як і суми мас, мають збігатися. Із відповідних рівнянь одержимо зарядове та масове числа невідомого елемента.

**Дано:**

$^{14}_7\text{N}$

$^4_2\alpha$

$^1_1p$

$^A_Z\text{X} - ?$

**Розв'язання.** Запишемо ядерну реакцію:  $^{14}_7\text{N} + ^4_2\alpha \rightarrow ^1_1p + ^A_Z\text{X}$ .

Запишемо суму мас і суму зарядів для обох частин рівняння реакції:

$$14 + 4 = 1 + A; 7 + 2 = 1 + Z. \text{ Із одержаних рівнянь маємо: } A = 17; Z = 8.$$

За Періодичною системою хімічних елементів визначимо: невідомий елемент — це ізотоп Оксигену  $^{17}_8\text{O}$ .

**Відповідь:** ізотоп Оксигену  $^{17}_8\text{O}$ .



### Підбиваємо підсумки

- Ядерною реакцією називають взаємодію ядер або елементарних частинок із ядром, яка відбувається з утворенням частинок, відмінних від вихідних. Під час ядерних реакцій, як і під час будь-яких явищ, що відбуваються у Всесвіті, справджаються закони збереження: закон збереження електричного заряду, закон збереження імпульсу, закон збереження енергії-маси.
- Завдяки ядерним реакціям отримано штучні радіоактивні ізотопи, які використовують у медицині, сільському господарстві, енергетиці тощо.
- Для реєстрації та визначення потужності йонізуючого випромінювання використовують шари фотомульсій, сцинтиляційні лічильники, бульбашкові камери, камери Вільсона, йонізаційні камери.
- Для вимірювання дози йонізуючого випромінювання використовують дозиметри.

### Контрольні запитання



- Що називають ядерною реакцією?
- Хто і коли здійснив першу ядерну реакцію?
- Які відомі вам закони збереження спрощуються під час ядерних реакцій?
- Хто першим отримав штучний радіоактивний ізотоп?
- Наведіть приклади використання природних і штучних радіоактивних ізотопів.
- Які прилади для вимірювання дози йонізуючого випромінювання ви знаєте? Який принцип покладено в основу роботи цих приладів?

**Вправа № 41**

1. Яким детектором — сцинтиляційним, трековим чи імпульсним — є шар фотоемульсії?
2. Унаслідок опромінювання радіонукліда  $^{198}_{80}\text{Hg}$  нейtronами утворюються ядра  $^{198}_{79}\text{Au}$ . Запишіть рівняння ядерної реакції.
3. Відновіть рівняння ядерних реакцій.
  - 1)  $^{19}_{9}\text{F} + ^1\text{p} \rightarrow ^{16}_{8}\text{O} + ?$  ; 2)  $^{27}_{13}\text{Al} + \alpha \rightarrow ^1\text{p} + ?$  ; 3)  $^{55}_{25}\text{Mn} + ? \rightarrow ^{55}_{26}\text{Fe} + ^0_0\text{n}$ .
4. Унаслідок бомбардування ізотопу Нітрогену  $^{14}_{7}\text{N}$  нейtronами отримано  $\beta^-$ -радіоактивний ізотоп Карбону  $^{14}_{6}\text{C}$ . Запишіть рівняння обох реакцій.
5. Визначте вік залишків стародавнього поселення (у тис. років), якщо в деревині, знайденій на місці розкопок, радіоактивного Карбону  $^{14}_{6}\text{C}$  залишилося 12,5 % від його початкової кількості.
6. Вважають, що із всієї атомної індустрії головна користь для людства полягає саме у використанні радіоактивних ізотопів. Об'єднайтесь в команди, оберіть для кожної команди галузь застосування радіоізотопів (медицина, наука, біологія тощо) і проведіть диспут на тему «Саме в нашій галузі не обійтися без радіоактивних ізотопів».
7. Назвіть причини, через які ви завжди і незалежно від того, де мешкаєте, зазнаєте впливу радіації.



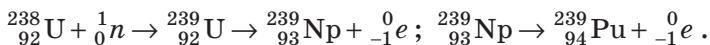
## § 42. ЛАНЦЮГОВА РЕАКЦІЯ ПОДІЛУ ЯДЕР УРАНУ. ТЕРМОЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ



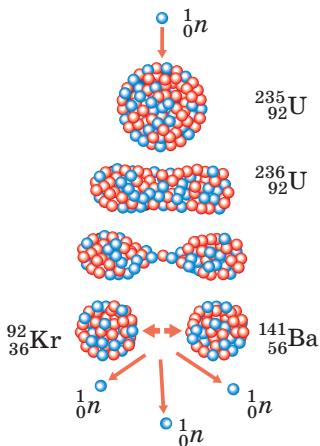
Наприкінці 1938 р. було виявлено, що ядро Урану (важке ядро), поглинаючи нейtron, «лускає» — *розпадається на два осколки (на два легші ядра)*. У січні 1939 р. Енріко Фермі звернув увагу на те, що, за розрахунками, *під час поділу ядра Урану повинні утворюватися нейtronи, які можуть знову захопитися ядрами Урану, тому можлива ланцюгова ядерна реакція*. Згадаємо, як ці два відкриття привели до створення ядерного реактора.

**1****Поділ важких ядер і ланцюгова ядерна реакція**

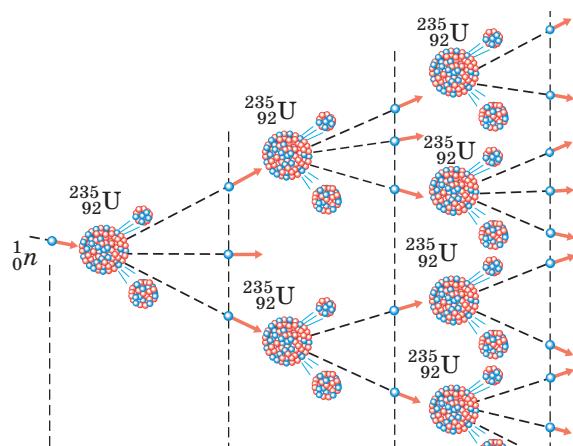
Розглядаючи ядерні реакції, ви дізналися, що ядро може захоплювати нейtron. У більшості випадків це приводить до  $\beta^-$ -радіоактивності: через деякий час один із нейtronів усередині ядра перетворюється на протон, електрон і нейтрино. Електрон і нейтрино вилітають із ядра, а нове ядро має порядковий номер, який на одну одиницю більший за порядковий номер первинного ядра. Саме так були отримані *трансуранові елементи*, наприклад Нептуній і Плутоній:



Захоплення нейтрона ядром Урану може привести й до іншого результату: унаслідок захвату нейтрона ядро збуджується та майже миттєво



**Рис. 42.1.** Схема поділу ядра Урану. Поглинаючи нейтрон, ядро Урану збуджується і набуває видовженої форми; поступово розтягуючись, нове нестійке ядро розпадається на два осколки



**Рис. 42.2.** Схематичне зображення ланцюгової ядерної реакції: під час одного акту поділу ядра Урану вивільняються 2 або 3 нейтрони, завдяки цьому і розвивається ланцюгова ядерна реакція

розпадається (розділяється) на два осколки (рис. 42.1). Під час розщеплення ядра Урану крім осколків поділу вивільнюються нейтрони. Ці вторинні нейтрони можуть спричинити поділ інших ядер Урану, які, у свою чергу, також випускатимуть нейтрони, що здатні викликати поділ наступних ядер, і т. д. Отже, в урановому зразку може відбуватися **ланцюгова ядерна реакція поділу**.

Якщо кількість нейтронів, що вступають у реакцію, збільшувається, то кількість актів поділу зростатиме лавиноподібно (рис. 42.2) — відбудеться **ядерний вибух**. Якщо кількість ядер Урану, що вступили в реакцію, підтримувати на одному рівні, то матимемо справу з **керованою ланцюговою ядерною реакцією поділу**.

**Ланцюгова ядерна реакція супроводжується виділенням величезної кількості енергії**, адже утворюються ядра з більшою питомою енергією зв'язку: для ядра Урану-235 питома енергія зв'язку дорівнює приблизно 7,6 МеВ/нуклон, а для ядер осколків — елементів середньої частини Періодичної системи хімічних елементів — 8,5 МеВ/нуклон. Отже, *під час поділу одного ядра Урану-235 (містить 235 нуклонів) вивільняється близько 200 МеВ енергії:  $\Delta E = (8,5 - 7,6) \cdot 235 \approx 200$  (МеВ);  $\Delta E = 3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж.*

Якщо розпадуться всі ядра, наприклад, в одному молі Урану-235 ( $6,02 \cdot 10^{23}$  ядер), то виділиться енергія  $E = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 2 \cdot 10^{13}$  (Дж). Це еквівалентно енергії, яка виділяється під час згоряння 2000 т дров.



Скільки дров треба спалити, щоб отримати енергію, яка виділяється під час повного розпаду 1 г урану ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ )?

## 2

### Як здійснити ланцюгову ядерну реакцію

Гіпотеза Е. Фермі щодо можливості ланцюгової ядерної реакції відразу була прийнята фізиками, хоча й суперечила фактам: ніхто не бачив цієї реакції в природному урані. Чому ж не бачили? Адже навколо нас завжди є певна

кількість вільних нейtronів (1000 таких нейtronів щосекунди пролітає через тіло людини), які можуть потрапити в урановий зразок і спричинити початок ланцюгової реакції. До того ж дослідження показали, що під час поділу 100 ядер Урану вивільняється 242 нейtronи, а це означає, що урановий зразок майже миттєво повинен вибухати. Цього, однак, не відбувається.

Річ у тім, що природний уран в основному складається з двох радіонуклідів:  $^{235}_{92}\text{U}$  і  $^{238}_{92}\text{U}$ . Уран-235 ділиться під впливом як швидких, так і повільних нейtronів (краще під впливом повільних). А от Уран-238 ділиться під впливом тільки частини швидких нейtronів (він майже не захоплює повільні нейtronи, а 80 % швидких нейtronів захоплює без ділення). У природному урані 149 ядер із 150 є ядрами Урану-238, а більшість нейtronів, вивільнених під час розпаду, є швидкими, тому, якщо вони і захоплюються ядрами Урану-238, вторинні нейtronи майже не з'являються.

Сподіваємося, ви здогадалися: щоб реакція все ж таки відбулася, слід збагачувати природний уран ізотопом  $^{235}_{92}\text{U}$  і (або) сповільнювати нейtronи.

Однак це не все. Навіть якщо взяти чистий уран, що складається тільки з нукліда  $^{235}_{92}\text{U}$ , або чистий плутоній ( $^{289}_{94}\text{Pu}$ ), ядра якого також діляться, захоплюючи нейtron, то за невеликої маси зразка ланцюгова ядерна реакція не розвинеться, адже більшість нейtronів вилетить із зразка, так і не зіштовхнувшись з ядром. Якщо збільшувати масу зразка, то кількість нейtronів, що вступає в реакцію поділу, буде збільшуватися, а з досягненням певної критичної маси почне розвиватися ланцюгова ядерна реакція. Найменшу критичну масу має зразок, виготовлений у формі кулі (за даного об'єму площа сфери є найменшою). Наприклад, найменша критична маса для чистого урану ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) становить близько 50 кг (куля діаметром 17 см), а для чистого плутонію ( $^{289}_{94}\text{Pu}$ ) — 11 кг (куля діаметром 10 см). Якщо два зразки урану ( $^{235}_{92}\text{U}$ ), маса кожного з яких ледь менша від критичної, привести до дотику, відбудеться надпотужний ядерний вибух.

### 3 Як працює ядерний реактор

Ланцюгова реакція поділу, яка відбувається в урані та деяких інших речовинах, є основою для перетворення ядерної енергії на теплову й електричну. Під час ланцюгової реакції безупинно з'являються осколки поділу, які мають величезну кінетичну енергію. Якщо урановий стрижень занурити в теплоносій, то осколки віддаватимуть йому свою енергію. У результаті теплоносій нагріється. Саме так працює ядерний *реактор*, у якому ядерна енергія перетворюється на теплову (рис. 42.3).

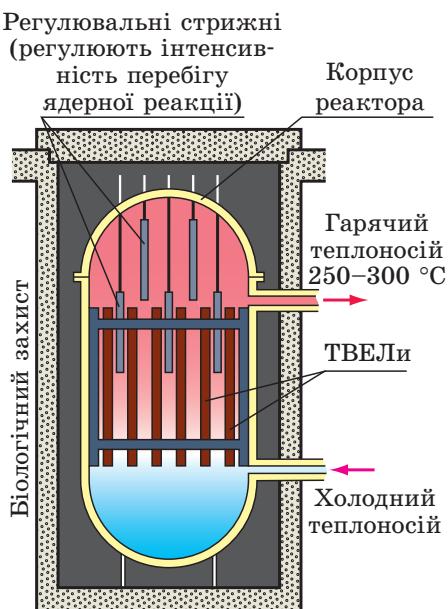


Рис. 42.3. Будова ядерного реактора

**Ядерний реактор** — пристрій, призначений для здійснення керованої ланцюгової реакції поділу, яка завжди супроводжується виділенням енергії.

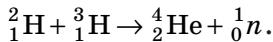
Керована ланцюгова ядерна реакція відбувається в *активній зоні* реактора. ТВЕЛи (рис. 42.4) пронизують всю активну зону реактора і занурені в *теплоносій*, який часто слугує також *сповільнювачем нейтронів*. Продукти поділу нагрівають оболонки ТВЕЛів, і ті передають енергію *теплоносію*.

Отримана енергія перетворюється далі на електричну (рис. 42.5) подібно до того, як це відбувається на звичайних теплових електростанціях.

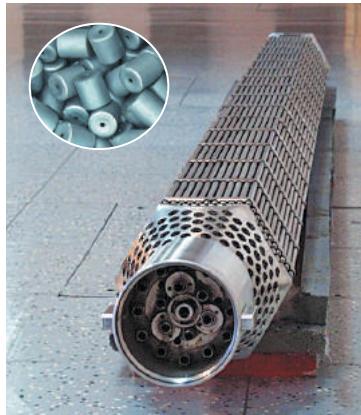
Щоб керувати ланцюговою ядерною реакцією та унеможливити ймовірність вибуху, використовують *регулювальні стрижні*, виготовлені з матеріалу, що добре поглинає нейтрони. Так, якщо температура в реакторі збільшується, стрижні автоматично заглиблюються в проміжки між ТВЕЛами; у результаті кількість нейтронів, що вступають у реакцію, зменшується і ланцюгова реакція сповільнюється.

#### 4 Термоядерні реакції

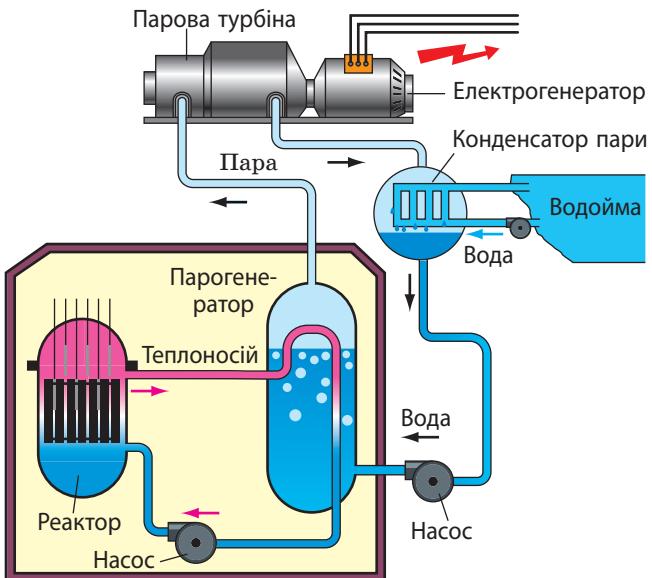
Вивчаючи питому енергію зв'язку, ви з'ясували, що виділення енергії може відбуватися як під час поділу важких ядер, так і під час об'єднання (синтезу) деяких легких ядер. Наприклад, якщо зблізити ядра Дейтерію  $^2_1\text{H}$  і Тритію  $^3_1\text{H}$ , унаслідок їх об'єднання виділиться 17,6 МeВ енергії (3,5 МeВ на кожний нуклон), оскільки утворюється ядро Гелію  $^4_2\text{He}$  з більшою питомою енергією зв'язку:



Реакцію злиття легких ядер у важкі ядра, яка відбувається за дуже високих температур (понад  $10^7$  °C) і супроводжується виділенням енергії, називають **термоядерним синтезом**.



**Рис. 42.4.** ТВЕЛ (тепловидільний елемент) — пристрій, у якому міститься ядерне паливо (таблетки уран(IV) оксиду, збагаченого ізотопом  $^{235}_{92}\text{U}$ )



**Рис. 42.5.** Принцип роботи атомної електростанції

Високі температури, тобто великі кінетичні енергії ядер, потрібні для того, щоб подолати сили електричного відштовхування ядер. Без цього неможливо зблизити легкі ядра на такі відстані, на яких починають діяти ядерні сили притягання.

У природі термоядерні реакції відбуваються в надрах зір, де різні нукліди Гідрогену об'єднуються в ядра атомів Гелію. Так, за рахунок термоядерних реакцій, які відбуваються в надрах Сонця, воно щосекунди випромінює в космічний простір  $3,8 \cdot 10^{26}$  Дж енергії. Це колосальна енергія — щоб стільки її отримати, потрібно спалити в тисячу разів більше вугілля, ніж усі відомі запаси на Землі.

Термоядерні реакції — це майже невищерпне джерело енергії. Фізики вже навчилися створювати умови для виникнення таких реакцій, а от іх використання в промисловому масштабі поки що залишається на рівні експериментів. Освоєння термоядерного синтезу виявилося значно складнішим, ніж здавалося на початку досліджень. Але фізики впевнені: майбутнє енергетики — за термоядерним синтезом.

## 5

### Атомна енергетика України

Україна належить до тих країн світу, в яких завдяки наявності високих технологій, висококваліфікованих інженерів і вчених створена потужна атомна енергетика. На сьогодні в країні працюють чотири атомні електростанції: Запорізька, Рівненська, Южно-Українська, Хмельницька (рис. 42.6–42.9).

На АЕС України діють 15 атомних енергоблоків, загальна потужність яких становить 13 835 МВт, що забезпечує більш ніж половину потреб України в електроенергії. АЕС обслуговуються багатотисячними колективами висококваліфікованих фахівців. Фактично навколо кожної з українських АЕС виросло невелике місто.

Наявність в Україні джерел електроенергії, які працюють на ядерному паливі, безперечно, пом'якшує дедалі більший дефіцит «звичних» вуглеводніх невідновлюваних енергоносіїв: газу, нафти, торфу, кам'яного вугілля.



**Рис. 42.6.** Запорізька АЕС — найбільша атомна електростанція Європи: 6 атомних енергоблоків потужністю 1000 МВт кожен



**Рис. 42.7.** Рівненська АЕС: 4 атомні енергоблоки загальною потужністю 2835 МВт



**Рис. 42.8.** Южно-Українська АЕС: 3 атомні енергоблоки потужністю 1000 МВт кожен



**Рис. 42.9.** Хмельницька АЕС: 2 атомні енергоблоки потужністю 1000 МВт кожен

## Фізика в цифрах

Щосекунди:

- $3,8 \cdot 10^{26}$  Дж енергії випромінює Сонце в навколошній простір.
- $1,7 \cdot 10^{17}$  Дж енергії падає від Сонця на Землю.
- $0,8 \cdot 10^{17}$  Дж енергії досягає поверхні Землі.
- ✓  $10^{14}$  Дж енергії накопичується рослинами в ході фотосинтезу.
- ✓  $10^{13}$  Дж енергії (10 % енергії фотосинтезу) припадає на ріллю, луки, пасовища.
- ✓  $0,5 \cdot 10^{13}$  Дж енергії споживає людина (тобто вона споживає половину енергії, накопиченої ріллею, луками, пасовищами).



## Підбиваємо підсумки

- Поглинення нейтрона ядром Урану може спричинити розпад ядра. Ця реакція супроводжується звільненням нейтронів, які містяться в ядрі, а ті, у свою чергу, можуть спричинити поділ інших ядер Урану — відбуватиметься ланцюгова ядерна реакція, яка супроводжується виділенням енергії.
- Процес перетворення ядерної енергії на теплову здійснюється в ядерних реакторах — пристроях, призначених для здійснення керованої ланцюгової реакції поділу. Основні складові ядерного реактора: сповільнювач нейтронів; теплоносій; система керування ланцюговою ядерною реакцією; система захисту.
- Виділенням енергії супроводжується і процес синтезу деяких легких ядер. Така реакція отримала назву термоядерної, оскільки для її початку необхідна дуже висока температура.
- Зараз в Україні працюють чотири атомні електростанції загальною потужністю 13 835 МВт, що забезпечує понад половину потреб України в електроенергії.

## Контрольні запитання



1. Які процеси відбуваються внаслідок поглинення нейтрона ядром Урану?
2. Опишіть механізм ланцюгової ядерної реакції. 3. Чи може ланцюгова ядерна реакція відбуватися в природному урані? Відповідь обґрунтуйте. 4. Як побудований ядерний реактор? Для чого призначенні його основні елементи?
5. Як працює атомна електростанція? 6. Звідки «беруть» енергію зорі?



## Вправа № 42

1. Яка відповідь є правильною? Найбільша частка енергії, що вивільняється під час поділу ядра Урану, припадає: а) на кінетичну енергію вивільнених нейтронів; б) енергію  $\gamma$ -випромінювання; в) кінетичну енергію осколків поділу; г) енергію нейтрино, які випромінюються продуктами поділу.
2. На скільки щосекунди змінюється маса Сонця, якщо потужність його випромінювання становить  $3,8 \cdot 10^{26}$  Вт?
3. Якій енергії відповідає спалення в ядерному реакторі 15 г урану ( $^{235}_{92}\text{U}$ ), якщо в результаті поділу одного його ядра виділяється 200 МeВ енергії?
4. Потужність реактора атомного криголама — 80 000 кВт. За добу реактор споживає 500 г урану ( $^{235}_{92}\text{U}$ ). Визначте ККД реактора.
5. Із дейтерію і тритію в результаті термоядерної реакції синтезу утворилося 2 г гелію. Яка енергія при цьому виділилася?
6. Дізнайтесь, які експерименти провели науковці, які пристрой побудували, які способи утримання плазми винайшли, намагаючись створити термоядерний реактор.

## § 43. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ

Ми вже говорили про «відкриття на кінчику пера». Прикладом такого відкриття для людей, що жили в XIX ст., було виявлення нової планети — Нептуна. Квантова механіка і теорія відносності дали фізикам у руки «чарівне перо», дозволивши масово передбачати існування нових об'єктів. Про те, які елементарні частинки було відкрито фізиками-теоретиками, йтиметься в цьому параграфі.

### 1 Які ще бувають елементарні частинки

На початку ХХ ст., пояснюючи будову атома, його ядра, процеси радіоактивного розпаду і ядерних реакцій, учені оперували в основному чотирма частинками: електрон, протон, нейtron і фотон. Здавалося б, їх було цілком достатньо для пояснення всіх спостережуваних явищ. Але природа підносила вченим нові сюрпризи. Так, для пояснення експериментів з опромінення нейtronами протонів знадобилося припущення про існування *мезонів*. Ця частинка була «вигадана» японським фізиком *Хідекі Юкавою* (1907–1981). Дослідження  $\beta$ -розпаду змусили швейцарського фізика *Вольфганга Ернста Паулі* (1900–1958) у 1930 р. «винайти» частинку-phantom — *нейтрино*. А от експериментальне виявлення нейтрино відбулося понад двадцять років потому.

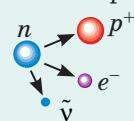
У 1928 р. англійський фізик *Поль Адріен Дірак* (1902–1984), розв'язуючи задачу про рух електрона зі швидкістю, близькою до швидкості світла, дійшов висновку про можливість існування в природі не тільки «звичайного» електрона, а і його антиподи — античастинки електрона. Античастинка електрона дісталася назву *позитрон*. Прикметною рисою позитрона є те, що в разі зіткнення його зі «звичайним» електроном відбувається *анігіляція* — частинки повністю перетворюються на енергію (зникають із випущенням фотонів). Оскільки вся маса електрон-позитронної пари перетворюється на фотони, енергія цих фотонів є дуже великою. Експериментальне спостереження позитрона відбулося тільки через кілька років після його передбачення: у 1932 р. американський фізик *Карл Девід Андерсон* (1905–1991) під час дослідження космічного випромінювання спостерігав слід позитрона в камері Вільсона.

### Позитрон

Позитрон є античастинкою електрона.

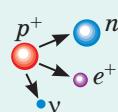
- Маса позитрона дорівнює масі електрона, заряд позитрона за модулем дорівнює заряду електрона, але є позитивним.
- Існування позитронів було передбачено в 1928 р. У 1932 р. позитрон був виявлений у складі космічного випромінювання.
- Електрон ( $\beta^-$ -частинка) і позитрон ( $\beta^+$ -частинка) можуть утворюватися всередині ядра:

✓ електрон утворюється внаслідок перетворення нейтрона — у результаті з'являються протон, електрон і антineйтрино:



$${}_0^1 n \rightarrow {}_1^1 p + {}_{-1}^0 e + {}_0^1 \bar{\nu}$$

- ✓ позитрон утворюється внаслідок перетворення протона — у результаті з'являються нейtron, позитрон і нейтрино:



$${}_1^1 p \rightarrow {}_0^1 n + {}_{+1}^0 e + {}_0^1 \nu$$

## 2

**Як здійснити класифікацію елементарних частинок**

Після створення в 50–60-х рр. ХХ ст. потужних прискорювачів відкриття нових елементарних частинок стало відбуватися дуже часто. З одного боку, це применшило роль кожного нового відкриття, а з іншого — виникла необхідність здійснити систематизацію. Було запропоновано найпростішу класифікацію — розташування частинок у порядку збільшення маси. «Повний перелік» елементарних частинок було розділено на три групи.

У першій групі опинилася тільки одна частинка — *фотон* із нульовою масою. До другої групи увійшли відносно легкі частинки, які були названі *лептонами* (від грец. *leptos* — легкий). Вам відомий представник цієї групи — електрон. Третя група частинок — найважчих — одержала назву *адрони* (від грец. *hadros* — великий, сильний). Цей термін, до речі, увів радянський фізик *Лев Борисович Окунь* (1929–2015). Представники групи адронів вам добре знайомі — нуклони.

 Наведіть приклади різних класифікацій, з якими ви ознайомилися під час вивчення природничих наук. Якими є принципи побудови кожної з них?

Слід зазначити, що всі частинки, які несуть електричний заряд, беруть участь в *електромагнітній взаємодії*. Носіями електромагнітної взаємодії є фотони. У *слабкій взаємодії* беруть участь усі елементарні частинки, окрім фотонів. До адронів відносять частинки, які, окрім того, здатні до *сильної взаємодії*.

Пропонують також дещо інші класифікації елементарних частинок (див., наприклад, [рис. 43.1](#)). Немає сумнівів, що завдяки Великому адронному колайдеру будуть розроблені нові, більш досконалі теорії класифікації елементарних частинок.



**Рис. 43.1.** Одна із сучасних класифікацій елементарних частинок

**3****Що таке кварки**

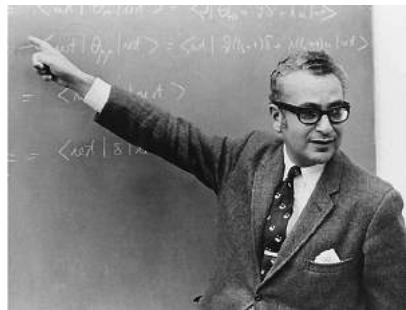
У дослідах із вивчення розсіювання дуже швидких електронів на адронах (а саме на протонах і нейтронах) було виявлено, що більша частина електронів проходить крізь протони та нейтрони, не зазнаючи істотних відхилень, а невелика їх частина розсіюється на якихось центрах. Цей результат був схожий на результати дослідів Е. Резерфорда з дослідження розсіювання  $\alpha$ -частинок під час їх проходження крізь атоми. Для пояснення таких властивостей адронів у 1964 р. було розроблено модель, яка дістала назву *теорія кварків*. Авторами теорії були американські вчені *Маррі Гелл-Манн* (рис. 43.1) і *Джордж Цвейг* (народ. 1937 р.).

Кварками вчені назвали три «справжні» елементарні частинки, з яких будуються всі адрони. Ці частинки було позначено буквами *u*, *d* і *s* (від англ. *up* — угору, *down* — униз, *strange* — дивний). Однак згодом трьох кварків виявилося недостатньо для пояснення властивостей адронів. Необхідним стало припустити існування ще кількох кварків. Після цього в теорії з'явились *антинекварки*. Потім знадобилося пояснити причини об'єднання кварків в адрони. Відповідно до сучасних уявлень, це відбувається за допомогою ще одного типу частинок — *глюонів* (від англ. *glue* — клей). Урешті кількість «справжніх» елементарних частинок знову зросла.

Не зазнаючи всіх деталей, звернемо увагу лише на одну особливість кварків: заряд цих частинок не цілий (в елементарних зарядах), а дробовий і дорівнює  $+\frac{2}{3}e$  або  $-\frac{1}{3}e$ , де *e* — елементарний заряд. Наприклад, заряд *d*-кварка дорівнює  $-1/3e$ , *u*-кварка —  $+2/3e$ , *s*-кварка —  $-1/3e$ . Кожний нуклон складається із трьох кварків: протон — із двох *u*-кварків і одного *d*-кварка ( $p=uu\bar{d}$ ), нейtron — із двох *d*-кварків і одного *u*-кварка ( $n=u\bar{d}\bar{d}$ ).

**4****Що далі**

Неважаючи на великий обсяг накопичених знань, сучасна фізика ще дуже далека від досконалості. Заповітною мрією більшості видатних фізиків було і залишається створення єдиної теорії — так званої «теорії всього», за допомогою якої можна було б пояснити всі явища у Всесвіті. Так, останнє десятиріччя свого життя цим займався Альберт Ейнштейн. Певних успіхів у цьому напрямі вже досягнуто в останні роки: у фізиці елементарних частинок створено Стандартну модель — теорію, що об'єднує сильну, слабку й електромагнітну взаємодії елементарних частинок. На сьогодні Стандартна модель узгоджується з експериментами, і недавнє відкриття бозона Гіггса є яскравим підтвердженням цього. Проте дотепер фізики не можуть пояснити природу темної матерії, походження високоенергетичних космічних частинок і багато іншого. Тому вчені намагаються вийти за межі Стандартної моделі. Тож чекаємо на нові відкриття!



**Рис. 43.1.** Маррі Гелл-Манн (1929–2019), американський фізик, лауреат Нобелівської премії з фізики за відкриття системи класифікації елементарних частинок. Один із авторів теорії кварків



### Підбиваємо підсумки

- Теоретичні розробки в галузі квантової механіки дозволили передбачити існування багатьох елементарних частинок (позитрона, нейтрино), які потім були відкриті в результаті експериментальних досліджень.
- Елементарні частинки можна поділити на декілька груп, зокрема: фотон; лептони; адрони. До адронів відносять частинки, здатні до сильної взаємодії, до лептонів — частинки, не здатні до сильної взаємодії.
- Для пояснення експериментів із розсіювання на адронах (протонах і нейтронах) високоенергетичних електронів було висунуто гіпотезу про існування нового типу елементарних частинок — кварків.



### Контрольні запитання

1. Що називають елементарною частинкою? 2. Яку частинку називають позитроном? Чим вона відрізняється від електрона? Хто першим предбачив і хто першим спостерігав цю частинку? 3. Які частинки називають лептонами?
4. Які частинки називають адронами? 5. Що таке кварки? Які заряди мають кварки? Назвіть засновників теорії кварків.

### ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО



#### Фахівець із розробки нанотехнологій

Пам'ятаєте, що означає префікс «нано-»? Нещодавно цим терміном користувалося тільки обмежене коло фахівців з ядерної фізики. Зараз інформацію про нові наноматеріали можна знайти майже в кожній газеті та навіть у глянцевих журналах. Безумовно, сфера застосування наноматеріалів тільки ширшатиме, а фахівці з розробки нанотехнологій будуть потрібні ще довгі роки. Розробка наноматеріалів і відповідних технологій потребує знань практично з усіх розділів фізики: механіки, електрики, термодинаміки, ядерної фізики.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 8

**Тема.** Моделювання радіоактивного розпаду.

**Мета:** змоделювавши радіоактивний розпад, перевірити на моделі закон радіоактивного розпаду.

**Обладнання:** 128 однакових монет, два паперові (пластикові) стакани, таця, кольоворів олівці (ручки), міліметровий папір.



#### ОПИС МОДЕЛІ

Розпад того чи іншого ядра — подія випадкова. Такою самою випадковою подією є випадання «герба» або «цифри» після кидка монети. Тому для моделювання радіоактивного розпаду використаємо таку **модель**.

Ядра в радіонуклідному зразку змоделюємо монетами в паперовому стакані: нехай ядро, що не розпалося, відповідає монета, на якій випаде «герб»; ядро, що розпалося, — монета, на якій випаде «цифра». Тоді кожен кидок купи монет відповідатиме періоду піврозпаду  $T_{1/2}$  (часу, за який розпадається половина ядер радіонукліда в зразку), а кількість  $n$  кидків — кількості періодів піврозпаду, тобто часу  $t = nT_{1/2}$ .

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

*Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).*  
Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

II

#### Підготовка до експерименту

- Підготуйте три таблиці — одну для кожної серії кидків (див. зразок).
- Покладіть 128 монет у паперовий стакан.

▶

#### Експеримент

- Перемішайте монети в паперовому стакані й висипте їх на тацю (рис. 1). Полічіть число монет, на яких випав «герб» (тобто число ядер, що не розпустилися), і покладіть їх у стакан. Монети, на яких випала «цифра» (тобто ядра, що розпустилися), покладіть в інший стакан та відставте його.
- Перемішайте монети, на яких випав «герб», висипте їх на тацю і знову полічіть число монет, на яких випав «герб». Повторюйте цей дослід, доки не залишиться одна монета з «гербом», але не більше ніж ще 6 разів. (Таким чином, усього ви повинні зробити максимум 8 кидків.)
- Повторіть серію кидків (дії, описані в пунктах 1–2) ще 2 рази.

Серія кидків \_\_\_\_\_ (колір графіка \_\_\_\_\_)



Рис. 1

Кількість кидків $n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Число «ядер», що не розпустилися, $N$	128								
Число «ядер», що розпустилися, $N'$	—								

▶

#### Опрацювання результатів експерименту

- На міліметровому папері для кожної серії кидків побудуйте відповідним кольором графік залежності  $N(n)$  — залежності числа  $N$  ядер, які не розпустилися, від кількості кидків (приклад такого графіка див. на рис. 2).
- У тих самих осіях для кожної серії кидків побудуйте графік функції  $N = N_0 \cdot 2^{-n}$ , яка виражає закон радіоактивного розпаду (вважайте, що початкова кількість ядер радіонукліда  $N_0 = 128$ ).

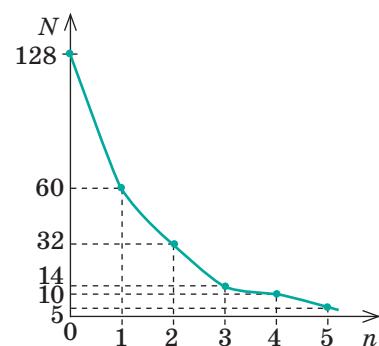


Рис. 2

## Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулюйте висновок, у якому поясніть, чому побудовані графіки не збігаються. Це є закономірністю чи використано недосконалу модель? Чи мають місце обидві причини?

## Творче завдання

З'ясуйте, як вплине на якість моделі процесу радіоактивного розпаду, використаної в роботі, збільшення кількості монет у 3 рази; зменшення кількості монет у 3 рази.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 9

**Тема:** Дослідження треків заряджених частинок за фотографіями.

**Мета:** навчитися аналізувати фотографії із зображенням треків заряджених частинок, отриманих за допомогою камери Вільсона, та ідентифікувати ці частинки.

**Обладнання:** фотографія треків заряджених частинок, аркуш кальки, косинець.

### ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

## II

### Підготовка до експерименту

1. Згадайте, як визначають модуль і напрямок сили, з якою магнітне поле діє на рухому зарядженну частинку (сили Лоренца).
2. Перенесіть треки I і II (рис. 1) на аркуш кальки (усі необхідні позначення, зображення та побудови слід виконувати саме на ньому).

## ▶

### Експеримент

1. Розгляньте фотографію треків заряджених частинок, отриманих за допомогою камери Вільсона (рис. 1):
  - 1) укажіть напрямки початкових швидкостей руху частинок I і II, яким відповідають треки I і II;
  - 2) з'ясуйте, як змінюється товщина кожного треку — від початку до кінця пробігу частинки.

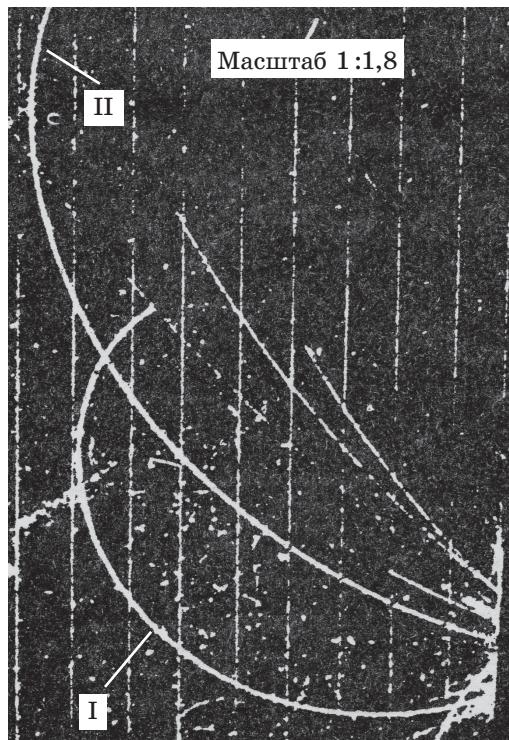


Рис. 1

- 2.** Знаючи, що частинка I ідентифікована як протон і що обидві частинки рухаються перпендикулярно до вектора магнітної індукції магнітного поля, створеного в камері, визначте:
- 1) знак заряду частинки II;
  - 2) напрямок вектора магнітної індукції.
- 3.** Урахувавши масштаб, визначте радіуси  $R_I$  і  $R_{II}$  треків на початку пробігу частинок, для чого (див. рис. 2):
- 1) на зображені треку накреслить дві хорди;
  - 2) до кожної хорди поставте серединний перпендикуляр і позначте точку  $O$  перетину цих перпендикулярів;
  - 3) виміряйте відстань  $R$  від точки  $O$  до початку треку (радіус кривизни).

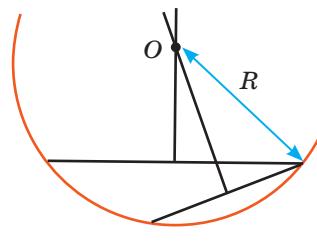


Рис. 2

Номер частинки	Форма треку	Зміна товщини треку	Радіус кривизни треку $R$ , м	Знак заряду частинки	Питомий заряд $\frac{q}{m}$ , Кл/кг	Назва частинки
I						
II						

### ▶ Опрацювання результатів експерименту

За даними таблиці «Питомий заряд деяких частинок» (див. Додаток 1) визначте питомий заряд частинки I.

2. Обчисліть питомий заряд частинки II за формулою:  $\frac{q_{II}}{m_{II}} = \frac{q_I}{m_I} \cdot \frac{R_I}{R_{II}}$ .
3. Знаючи питомий заряд частинки II, ідентифікуйте її: визначте, ядром якого елемента є ця частинка.

### □ Аналіз експерименту та його результатів

За результатами дослідження сформулюйте висновок.

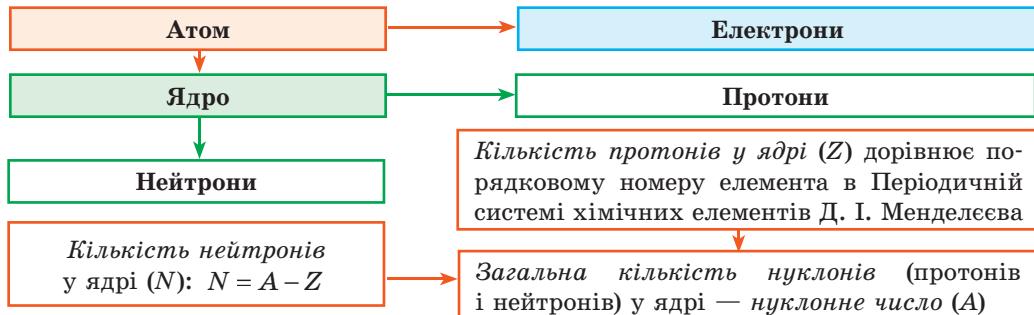
### + Творче завдання

Проведіть додаткові вимірювання та визначте, у скільки разів зменшилася кінетична енергія протона за час пробігу в камері Вільсона.

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ IV

### «АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА»

- 1.** Ви згадали будову атома і протонно-нейтронну модель атомного ядра.



- 2.** Ви ознайомилися з постулатами Бора та з'ясували, що в атомі існують особливі стаціонарні стани, в яких він не випромінює енергію, а будь-яке випромінювання атомом кванта енергії пов'язане з його переходом з вищого енергетичного стану в нижчий:  $h\nu = E_1 - E_2$ .

- 3.** Ви згадали, що нуклони в ядрі утримуються ядерними силами, і дізналися, що для повного розщеплення ядра на окремі нуклони необхідно витратити енергію, яку називають *енергією зв'язку атомного ядра* ( $E_{\text{зв}}$ ):

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2, \text{ або } E_{\text{зв}} = \Delta mk \left( k = 931,5 \frac{\text{MeB}}{\text{а.о.м.}} \right)$$

Тут  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{яд}} = Zm(^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - m_{\text{ат}}$  — дефект мас.

- 4.** Ви довідалися, що *пітома енергія зв'язку атомного ядра*:  $f = \frac{E_{\text{зв}}}{A}$  — залежить від кількості нуклонів у ядрі, тому під час об'єднання надлегких ядер (реакція синтезу) і поділу важких ядер виділяється енергія.

- 5.** Ви з'ясували, що деякі ізотопи хімічних елементів здатні спонтанно перетворюватися на ядра інших елементів із випромінюванням мікрочастинок, ознайомились з основним законом радіоактивного розпаду:  $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$ .

- 6.** Ви згадали про різні види радіоактивного випромінювання, з'ясували їх природу та поглибили свої знання про правила зміщення.

Радіоактивне випромінювання				
Вид	Природа	Заряд	Швидкість	Правило зміщення
$\alpha$ -випромінювання	Ядра атомів Гелію	$+2e$	Близько 10 000 км/с	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$
$\beta^-$ -випромінювання	Електрони	$-e$	Близько 300 000 км/с	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^A_{Z+1}\text{Y}$
$\beta^+$ -випромінювання	Позитрони	$+e$	Близько 300 000 км/с	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^0_{+1}\text{e} + {}^A_{Z-1}\text{Y}$
$\gamma$ -випромінювання	Електромагнітні хвилі	Відсутній	300 000 км/с (швидкість світла)	—

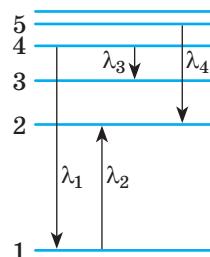


## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ IV

### «АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА»

**Завдання 1.** Атом Гідрогену під час переходу з одного енергетичного стану в інший випроменив фотон.

1. (1 бал) Який із переходів, поданих на рисунку, відповідає випроміненню фотона?
  - а)  $\lambda_1$ ; б)  $\lambda_2$ ; в)  $\lambda_3$ ; г)  $\lambda_4$ .
2. (2 бали) У якому з поданих на рисунку переходів атом випромінює або поглинає фотон більшої частоти?
  - а)  $\lambda_1$ ; б)  $\lambda_2$ ; в)  $\lambda_3$ ; г)  $\lambda_4$ .
3. (2 бали) Визначте довжину хвилі фотона з енергією 2,8 еВ.
4. (3 бали) Визначте, скориставшись планетарною моделлю атома, якими будуть кулонівська і гравітаційна сили притягання, що діють між електроном і ядром атома Гідрогену  ${}_1^1\text{H}$ . Вважайте, що радіус атома —  $5 \cdot 10^{-11}$  м.



**Завдання 2.**  $\alpha$ -частинка вилітає з радіоактивного зразка, що містить  $10^{-12}$  моль Радону-220.

1. (1 бал) На підставі дослідів із  $\alpha$ -частинками Е. Резерфорд:
  - а) запропонував нейтронно-протонну модель атомного ядра;
  - б) пояснив явище радіоактивності;
  - в) пояснив механізм ланцюгової ядерної реакції;
  - г) запропонував ядерну модель будови атома.
2. (2 бали) Яке ядро утворюється в результаті  $\alpha$ -розділу ядра Радону  ${}_{86}^{220}\text{Rn}$ ?
  - а)  ${}_{82}^{222}\text{Pb}$ ; б)  ${}_{84}^{216}\text{Po}$ ; в)  ${}_{85}^{222}\text{At}$ ; г)  ${}_{87}^{222}\text{Fr}$ .
3. (3 бали) Скільки ядер Радону залишиться у зразку через 280 с? Вважайте, що період піврозпаду Радону-220 дорівнює 56 с.

**Завдання 3.** Фосфор  ${}_{15}^{30}\text{P}$  уперше був отриманий подружжям Жоліо-Кюрі шляхом опромінення алюмінію ( ${}_{13}^{27}\text{Al}$ ).

1. (1 бал) Скільки нейtronів містить ядро атома Алюмінію  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ ?
  - а) 13; б) 14; в) 27; г) 40.
2. (2 бали) Фосфор  ${}_{15}^{30}\text{P}$  є  $\beta^+$ -радіоактивним. Яка частина утворюється під час розпаду його ядра?
  - а) електрон; б) нейtron; в) протон; г) позитрон.
3. (3 бали) Якою є енергія зв'язку ядра Фосфору  ${}_{15}^{30}\text{P}$ ?

**Завдання 4.** У результаті поділу одного ядра Урану  ${}_{92}^{235}\text{U}$  на два осколки виділяється близько 200 МeВ енергії.

1. (1 бал) Які частинки вилітають із ядра Урану під час зазначеного поділу?
  - а) електрони; б) нейtronи; в) протони; г)  $\alpha$ -частинки.
2. (2 бали) Скільки маси перетворюється на енергію під час одного поділу?
  - а)  $\approx 0,2$  а. о. м.; б)  $\approx 4,1$  а. о. м.; в)  $\approx 19$  а. о. м.; г)  $\approx 38$  а. о. м.
3. (2 бали) Скільки енергії виділиться під час «згоряння» в ядерному реакторі 19 г даного ізотопу?

*Звірте ваші відповіді на завдання з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Поділіть суму на два. Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.*

## **ОРИЄНТОВНІ ТЕМИ ПРОЕКТІВ, РЕФЕРАТІВ І ПОВІДОМЛЕНЬ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **Розділ I. Електродинаміка**

#### **Теми проектів**

1. Вплив електричного струму на швидкість фотосинтезу.
2. Особливості електричних кіл із напівпровідниковим діодом.
3. Електропровідність різних речовин і матеріалів.
4. Майстер-клас для молодших школярів «Джерела електричного живлення із підручних засобів. Характеристики цих джерел».
5. Аргументи і факти, які свідчать про необхідність знати базові поняття й закони електродинаміки для медиків, ІТ-фахівців, юристів, економістів.
6. Дивовижна електродинаміка: просто про складне.

#### **Теми рефератів і повідомлень**

1. Дія електричного струму на організм людини.
2. Засоби захисту від ураження електричним струмом.
3. Причини ураження електричним струмом.
4. Сучасні джерела електричного струму та їхні характеристики.
5. Четвертий агрегатний стан речовини та його особливості.
6. Переваги і недоліки застосування електролізу в промисловості.
7. Електрика у світі тварин.
8. Історія відкриттів, які зумовили розвиток електродинаміки.
9. Цікаві факти з життя науковців — дослідників електрики.
10. Практичне застосування закону електромагнітної індукції.
11. Врахування самоіндукції в електричних колах.
12. Використання магнітних полів у медицині.
13. Гіпотези про природу кульової блискавки.
14. Вплив магнітного поля Землі на здоров'я людини. Геопатогенні зони.
15. Міжнародний день жінок і дівчат у науці: історія виникнення.

#### **Теми експериментальних досліджень**

1. Розрахунок шунтів і додаткових опорів для вирішення певних завдань електродинаміки.
2. Дослідження специфічних властивостей  $p$ - $n$ -переходу.
3. Визначення електрохімічного еквівалента речовини.
4. Дослідження явища електромагнітної індукції.

### **Розділ II. Електромагнітні коливання і хвилі**

#### **Теми проектів**

1. Трансформатори і передача енергії.
2. Побудова моделі енергосистеми України.
3. Особливості випромінювання і приймання електромагнітних хвиль.

4. Роль електромагнітних хвиль у повсякденному житті людини.
5. Тренінг для молодших школярів «Правила безпеки, які має знати і виконувати кожен».

#### **Теми рефератів і повідомлень**

1. Використання електромагнітних хвиль у техніці.
2. Переваги і недоліки використання відновлюваних джерел енергії.
3. Енергоресурси України. Перспективи розвитку альтернативної енергетики в Україні.
4. Використання електромагнітних хвиль у медицині.
5. Процеси, що відбуваються в тканинах організму людини під впливом електромагнітних хвиль.
6. Вплив електромагнітних полів побутових пристрій на організм людини.
7. Історія створення НВЧ-печі.
8. Сучасний супутниковий зв'язок. Супутниківі системи.
9. Чи обійшлося б людство без наукових відкриттів, які зробили жінки?

#### **Теми експериментальних досліджень**

1. Дослідження процесів, які відбуваються під час обертання металевого витка в магнітному полі.
2. Отримання вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі та визначення параметрів, від яких залежить їхня частота.
3. Дослідження властивостей електромагнітних хвиль.

### **Розділ III. Оптика**

#### **Теми проектів**

1. Майстер-клас для молодших школярів «Оптичні явища в природі».
2. Оптичний телеграф Клода Шаппа.
3. Застосування інтерференції в техніці.
4. Практичне застосування дифракції.
5. Фотовиставка «Інтерференція і дифракція навколо нас».
6. 10 дослідів з оптики для вебінару «Ненудна наука».

#### **Теми рефератів і повідомлень**

1. Недоліки оптичної системи ока.
2. Механізми сприйняття кольорів.
3. Механізми захисту фоторецепторів і явище адаптації.
4. Дифракційні методи дослідження структури речовини.
5. Оптоволоконні лінії зв'язку. Приклади функціонування оптоволоконних мереж.
6. Навігатор: принцип роботи й основні функції.
7. 10 цікавих фактів про оптичні явища.
8. Жінки в науці.

**Теми експериментальних досліджень**

1. Визначення роздільної здатності людського ока.
2. Експериментальна перевірка законів відбиття світла за допомогою підручників засобів.
3. Визначення оптичної сили лінзи в окулярах.
4. Вплив світлофільтрів на дифракційну картину.

**Розділ IV. Атомна та ядерна фізика**

**Теми проектів**

1. Фізичні основи роботи лазерного принтера.
2. Перспективи використання надпровідності.
3. Складання радіаційної карти регіону.
4. Радіологічний аналіз місцевих харчових продуктів.
5. Святкування Дня науки у школі.

**Теми рефератів і повідомлень**

1. Біофізичні механізми дії йонізуючого випромінювання на клітину.
2. Екологічні наслідки безвідповідального використання атомної енергії.
3. Вплив людського фактора в аваріях на атомних станціях.
4. Застосування радіонуклідів у медицині.
5. Рентгенівська комп'ютерна томографія та її види.
6. Віддалені наслідки радіаційного опромінення.
7. Вплив лазерного випромінювання на організми та його застосування в медицині.
8. Жінки — лауреатки Нобелівської премії з фізики.
9. Повчальні історії з життя фізиків.
10. Основні напрями науково-технічного прогресу.
11. Атомна енергетика України.
12. Цікаві факти з життя першої жінки, удостоеної Нобелівської премії.

**Теми експериментальних досліджень**

Спостереження неперервного і лінійчастого спектрів речовини.

## ДОДАТОК 1

Таблиця 1

### Деякі фундаментальні фізичні сталі

Гравітаційна стала	$G = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Електрична стала (електрична проникність вільного простору)	$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн}/\text{м} = 12,5664 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}/\text{м}$
Стала Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ еВ} \cdot \text{с}$
Стала Авогадро	$N_A = 6,0221 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$
Стала Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$
Універсальна газова стала	$R = 8,3145 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Стала Фарадея	$F = 9,6485 \cdot 10^4 \text{ Кл}/\text{моль}$
Швидкість поширення світла у вакуумі	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с}$
Елементарний заряд	$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса електрона	$m_e = 9,1094 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а. о. м.}$
Маса нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а. о. м.}$
Маса протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а. о. м.}$
Атомна одиниця маси	$1 \text{ а. о. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Таблиця 2

### Префікси для утворення назв кратних і частинних одиниць

Префікс	Символ	Множник	Префікс	Символ	Множник
тера-	Т	$10^{12}$	санти-	с	$10^{-2}$
гіга-	Г	$10^9$	мілі-	м	$10^{-3}$
мега-	М	$10^6$	мікро-	мк	$10^{-6}$
кіло-	к	$10^3$	нано-	н	$10^{-9}$
гекто-	г	$10^2$	піко-	п	$10^{-12}$
деци-	д	$10^{-1}$	фемто-	ф	$10^{-15}$

Таблиця 3

**Питомий опір  $\rho$  [ $\times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  або  $\times 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ] за  $20^\circ\text{C}$  і температурні коефіцієнти опору  $\alpha$  деяких металів і сплавів**

Речовина	$\rho$	$\alpha, \text{ К}^{-1}$	Речовина	$\rho$	$\alpha, \text{ К}^{-1}$
Алюміній	2,8	0,004	Ніхром	110	0,0001
Вольфрам	5,5	0,005	Свинець	21	0,004
Латунь	7,1	0,001	Срібло	1,6	0,004
Мідь	1,7	0,004	Сталь	12	0,006
Нікелін	42	0,0001			

Таблиця 4

**Електрохімічні еквіваленти  $k$ ,  $\frac{\text{мг}}{\text{Кл}}$**

Алюміній ( $\text{Al}^{3+}$ )	0,09	Мідь ( $\text{Cu}^+$ )	0,66	Срібло ( $\text{Ag}^+$ )	1,12
Водень ( $\text{H}^+$ )	0,01	Мідь ( $\text{Cu}^{2+}$ )	0,33	Хлор ( $\text{Cl}^-$ )	0,37
Залізо ( $\text{Fe}^{3+}$ )	0,19	Натрій ( $\text{Na}^+$ )	0,24	Хром ( $\text{Cr}^{3+}$ )	0,18
Кисень ( $\text{O}^{2-}$ )	0,08	Нікель ( $\text{Ni}^{2+}$ )	0,30	Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )	0,34

Таблиця 5  
Робота виходу електронів, еВ

Вольфрам	4,5	Платина	5,3
Калій	2,2	Срібло	4,3
Літій	2,4	Цинк	4,2
Барій оксид	1,0		

Таблиця 6  
Маса деяких нуклідів, а. о. м.

Ізотоп	Маса нейтраль- ного атома	Ізотоп	Маса нейтраль- ного атома
${}_1^1\text{H}$ Водень	1,007 83	${}_5^{10}\text{B}$ Бор	10,012 94
${}_1^2\text{H}$ Дейтерій	2,014 10	${}_6^{12}\text{C}$ Вуглець	12,000 00
${}_1^3\text{H}$ Тритій	3,016 05	${}_7^{14}\text{N}$ Азот	14,003 07
${}_2^3\text{He}$ Гелій	3,016 02	${}_8^{16}\text{O}$ Кисень	15,994 91
${}_2^4\text{He}$ Гелій	4,002 60	${}_8^{17}\text{O}$ Кисень	16,999 13
${}_3^6\text{Li}$ Літій	6,015 13	${}_{13}^{27}\text{Al}$ Алюміній	26,981 46
${}_3^7\text{Li}$ Літій	7,016 01	${}_{15}^{30}\text{P}$ Фосфор	29,978 31
${}_4^8\text{Be}$ Берилій	8,005 31	${}_{92}^{238}\text{U}$ Уран	238,050 79

Таблиця 7  
Питомий заряд деяких частинок

Частинка	Питомий заряд $\frac{q}{m}$ , $\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$
Електрон	$1,759 \cdot 10^{11}$
Протон	$9,578 \cdot 10^7$
$\alpha$ -частинка	$4,822 \cdot 10^7$

## ДОДАТОК 2

### ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

#### 1. Випадкові і систематичні похибки

Різницю між вимірюваним та істинним значеннями вимірюваної величини називають **похибкою вимірювання**.

Похибки при вимірюваннях фізичних величин поділяють на два види: *випадкові і систематичні*.

Випадкові похибки пов'язані з *процесом вимірювання*.

Найбільш імовірне значення вимірюваної величини ( $x_{\text{вимір}}$ ) дорівнює середньому арифметичному значень, отриманих у результаті вимірювань:

$$x_{\text{вимір}} = x_{\text{сер}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N},$$

де  $N$  — кількість вимірювань величини  $x$ ;  $x_1, x_2, \dots, x_N$  — результати 1-го, 2-го, ...,  $N$ -го вимірювань.

Випадкову абсолютну похибку ( $\Delta x_{\text{вип}}$ ) обчислюють за формулою:

$$\Delta x_{\text{вип}} = \frac{|x_1 - x_{\text{сер}}| + |x_2 - x_{\text{сер}}| + \dots + |x_N - x_{\text{сер}}|}{N}.$$

Якщо вимірювання проводять тільки один раз, то зазвичай вважають, що випадкова абсолютна похибка дорівнює половині ціни поділки шкали приладу.

Систематичні похибки визначаються якістю приладу — його класом, тому їх часто називають *похибками приладу* або *інструментальними похибками*.

Абсолютні інструментальні похибки деяких приладів наведено в таблиці.

№	Засіб вимірювання	Ціна поділки шкали	Абсолютна інструментальна похибка
1	Лінійка учнівська (демонстраційна)	1 мм (1 см)	$\pm 1$ мм ( $\pm 0,5$ см)
2	Стрічка вимірювальна	0,5 см	$\pm 0,5$ см
3	Штангенциркуль	0,1 мм	$\pm 0,05$ мм
4	Мікрометр	0,01 мм	$\pm 0,005$ мм
5	Секундомір	0,2 с	$\pm 1$ с за 30 хв
6	Терези навчальні	—	$\pm 0,01$ г
7	Динамометр навчальний	0,1 Н	$\pm 0,05$ Н
8	Термометр лабораторний	1 °C	$\pm 1$ °C
9	Амперметр шкільний	0,1 А	$\pm 0,05$ А
10	Вольтметр шкільний	0,2 В	$\pm 0,15$ В

#### 2. Визначення абсолютної та відносної похибок прямих вимірювань

Щоб правильно оцінити точність експерименту, необхідно врахувати як систематичну похибку, зумовлену приладом ( $\Delta x_{\text{прил}}$ ), так і випадкову похибку ( $\Delta x_{\text{вип}}$ ), пов'язану з похибками вимірювань. Сумарну похибку називають **абсолютною похибкою вимірювання** ( $\Delta x$ ) і визначають за формулою:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{прил}} + \Delta x_{\text{вип}}.$$

**Відносна похибка**  $\varepsilon_x$  характеризує якість вимірювання і дорівнює відношенню абсолютної похибки ( $\Delta x$ ) до середнього (виміряного) значення вимірюваної величини ( $x_{\text{вимір}}$ ):

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вимір}}}, \text{ або у відсотках: } \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вимір}}} \cdot 100\%.$$

Іноді здійснюють експеримент із метою встановити правильність деякої рівності (наприклад,  $X = Y$ ). Якщо в такому експерименті важко визначити похибку, то відносну похибку експериментального підтвердження рівності  $X = Y$  обчислюють за формулою:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{X}{Y} \right| \cdot 100\%.$$

### 3. Як правильно записати результат вимірювання

Абсолютна похибка вимірювання визначає точність, з якою доцільно виконувати обчислення вимірюваної величини.

*Абсолютну похибку завжди округлюють до однієї значущої цифри із завищением, а результат вимірювання округлюють до величини розряду, що залишився в абсолютної похибці після округлення.*

Остаточний результат для значення величини  $x$  записують у вигляді:

$$x = x_{\text{вимір}} \pm \Delta x,$$

де  $x_{\text{вимір}}$  — середнє (виміряне) значення.

Ця формула означає, що істинне значення вимірюваної величини міститься в інтервалі між  $x = x_{\text{вимір}} - \Delta x$  і  $x = x_{\text{вимір}} + \Delta x$  (рис. 1). Абсолютну похибку  $\Delta x$  прийнято вважати додатною величиною, тому  $x = x_{\text{вимір}} + \Delta x$  — найбільше ймовірне значення вимірюваної величини, а  $x = x_{\text{вимір}} - \Delta x$  — найменше ймовірне значення вимірюваної величини.

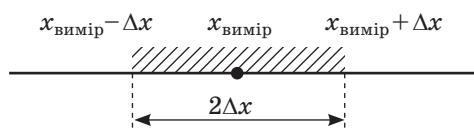


Рис. 1

Наведемо *приклад*. Було виміряно прискорення вільного падіння  $g$ . У результаті опрацювання отриманих експериментальних даних було знайдено середнє значення:  $g_{\text{вимір}} = 9,736 \text{ м/с}^2$ . Для абсолютної похибки було отримано:  $\Delta g = 0,123 \text{ м/с}^2$ . Абсолютну похибку потрібно округлити до однієї значущої цифри із завищением:  $\Delta g = 0,2 \text{ м/с}^2$ . Тоді результат вимірювання округлюється до того самого розряду, що й розряд похибки, тобто до десятих:  $g_{\text{вимір}} = 9,7 \text{ м/с}^2$ .

Відповідь за підсумками експерименту слід подати в такому вигляді:  $g = (9,7 \pm 0,2) \text{ м/с}^2$ , при цьому істинне значення прискорення вільного падіння міститься в інтервалі  $[9,5; 9,9] \text{ м/с}^2$  (рис. 2). Оскільки табличне значення прискорення вільного падіння ( $g_{\text{табл}} = 9,8 \text{ м/с}^2$ ) належить цьому інтервалу, то кажуть, що *отримані результати збіглися з табличними в межах похибки вимірювань*.

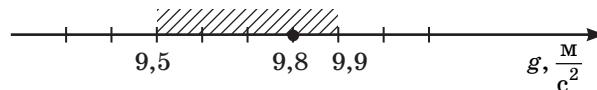


Рис. 2

#### 4. Графічний метод опрацювання результатів

Іноді опрацювання результатів експерименту можна значно полегшити, якщо подати їх у вигляді графіка. Припустимо, необхідно виміряти жорсткість пружини. Вирішили скористатися формулою  $k = \frac{F_{\text{пруж}}}{x}$ .

Для отримання найбільш точного результату виміряли видовження пружини за різних значень сили пружності й одержали такі результати:

$F_{\text{пруж}}$ , Н	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8
$x$ , м	0,0	0,022	0,040	0,068	0,090	0,101	0,123	0,150

Побудуємо графік, відкладавши по осі ординат значення сили пружності, а по осі абсцис — відповідні їм значення видовження пружини (рис. 3). Позначимо хрестиками наведені в таблиці експериментальні дані.

Оскільки коефіцієнт жорсткості не залежить від видовження пружини, графік залежності  $F_{\text{пруж}}$  від  $x$  повинен мати вигляд прямої лінії, що проходить через початок координат. Проведемо цю пряму так, щоб з обох боків від неї була приблизно однакова кількість хрестиків. Вираввши на графіку довільну точку й знайшовши для неї відповідні значення  $F_{\text{пруж}}$  і  $x$ , визначимо середнє значення жорсткості:

$$k_{\text{sep}} = \frac{F_{\text{пруж}}}{x} = \frac{1,8 \text{ Н}}{0,095 \text{ м}} = 18,9 \text{ Н/м.}$$

Таким чином, побудова графіка дозволила, використавши всі наявні експериментальні дані, знайти середнє значення жорсткості пружини без складних обчислень.

За графіком, побудованим за результатами вимірювань, можна оцінити випадкову похибку цих вимірювань. Наприклад, якщо отримана за результатами експерименту пряма проходить через початок координат (як графік  $F_{\text{пруж}}(x)$ ), необхідно виконати такі дії.

1. Провести допоміжні лінії-графіки так, щоб вони пройшли через ті експериментальні точки, які задають максимальний і мінімальний кути нахилу графіка (на рис. 3 ці лінії-графіки подано синім).

2. За кожним із отриманих допоміжних графіків знайти значення величини, яку визначають в експерименті,— в нашому випадку  $k'$  і  $k''$ :

$$k' = \frac{2,2 \text{ Н}}{0,11 \text{ м}} = 20 \text{ Н/м};$$

$$k'' = \frac{1,4 \text{ Н}}{0,08 \text{ м}} = 17,5 \text{ Н/м};$$

3. Порівняти отримані значення із середнім значенням вимірюної величини (знайти модулі різниць):

$$|k_{\text{sep}} - k'| = |18,9 - 20| = 1,1 \text{ (Н/м)};$$

$$|k_{\text{sep}} - k''| = |18,9 - 17,5| = 1,4 \text{ (Н/м)}.$$

Більшу із різниць і приймають за абсолютну випадкову похибку ( $\Delta k = 1,4 \text{ Н/м}$ ).

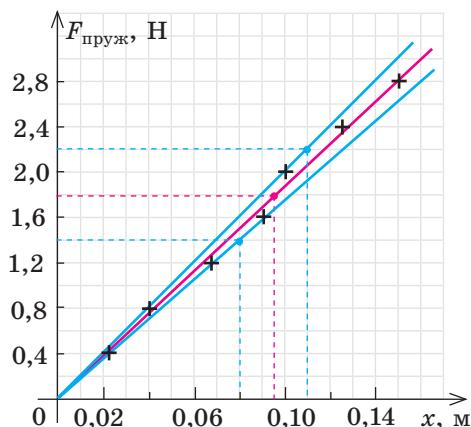


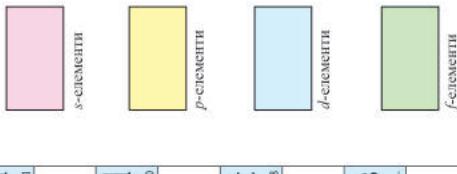
Рис. 3

## Періодична система хімічних елементів Д. І. Менделєєва

	Група	Індекс	АІБ	АІІБ	АІІІБ	АІVБ	АІVБ	АVБ	АVБ	АVIБ	АVIБ	АVІІІБ	АVІІІБ	He	He	VIII	В			
1	H	1 13 <sup>1</sup>	1 Гідроген Водень	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2 400% $\frac{1}{1^3}$	2 400% $\frac{1}{1^3}$	—	—			
2	Li	3 13	Be	4 90.1 $\frac{1}{2^3}$	B	5 10.81 $\frac{1}{2^2}$	C	6 14.06 $\frac{1}{2^2}$	N	7 15.99 $\frac{1}{2^2}$	O	8 16.99 $\frac{1}{2^2}$	F	9 17.93 $\frac{1}{2^2}$	Ne	10 20.03 $\frac{1}{2^2}$	—			
3	Na	11 31 <sup>1</sup>	Mg	12 24.96 $\frac{1}{3^2}$	Al	13 26.982 $\frac{1}{3^2}$	Si	14 30.974 $\frac{1}{3^2}$	P	15 38.985 $\frac{1}{3^2}$	S	16 35.453 $\frac{1}{3^2}$	Cl	17 35.453 $\frac{1}{3^2}$	Ar	18 39.988 $\frac{1}{3^2}$	—	—		
4	K	19 39.96 $\frac{1}{4^2}$	Ca	20 40.07 $\frac{1}{4^2}$	Sc	21 41.983 $\frac{1}{4^2}$	Ti	22 50.942 $\frac{1}{4^2}$	V	24 51.96 $\frac{1}{4^2}$	Cr	25 53.98 $\frac{1}{4^2}$	Mn	26 55.86 $\frac{1}{4^2}$	Fe	27 55.93 $\frac{1}{4^2}$	Co	28 56.93 $\frac{1}{4^2}$		
5	Rb	37 85.46 $\frac{1}{5^2}$	Sr	38 87.62 $\frac{1}{5^2}$	Zn	39 91.23 $\frac{1}{5^2}$	Ga	40 95.96 $\frac{1}{5^2}$	Ge	41 97.956 $\frac{1}{5^2}$	Zr	42 104.92 $\frac{1}{5^2}$	Nb	43 107.91 $\frac{1}{5^2}$	Mo	44 107.91 $\frac{1}{5^2}$	Ru	45 109.95 $\frac{1}{5^2}$	Rh	46 110.96 $\frac{1}{5^2}$
6	Cs	55 129.905 $\frac{1}{6^2}$	Ba	56 134.91 $\frac{1}{6^2}$	*La	57 138.905 $\frac{1}{6^2}$	Hf	58 141.948 $\frac{1}{6^2}$	Ta	74 143.94 $\frac{1}{6^2}$	W	75 146.97 $\frac{1}{6^2}$	Re	76 149.98 $\frac{1}{6^2}$	Os	77 151.98 $\frac{1}{6^2}$	Ir	78 153.98 $\frac{1}{6^2}$		
7	Fr	87 223.021 $\frac{1}{7^2}$	Ra	88 226.031 $\frac{1}{7^2}$	**Ac	89 227.031 $\frac{1}{7^2}$	Rf	105 260.13 $\frac{1}{7^2}$	Pb	92 204.13 $\frac{1}{7^2}$	Bi	93 205.13 $\frac{1}{7^2}$	Po	94 208.98 $\frac{1}{7^2}$	At	95 209.98 $\frac{1}{7^2}$	Rn	96 212.98 $\frac{1}{7^2}$	Pt	97 215.98 $\frac{1}{7^2}$
8	Rg	111 $\frac{1}{8^2}$	Cn	112 $\frac{1}{8^2}$	Nh	113 $\frac{1}{8^2}$	Fl	114 $\frac{1}{8^2}$	Mc	115 $\frac{1}{8^2}$	Lv	116 $\frac{1}{8^2}$	Ts	117 $\frac{1}{8^2}$	Og	118 $\frac{1}{8^2}$	—	—		
9	Ro	102 Ваші Берні Іонічні з підсил. з подрібн.	RO	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RO <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	RH <sub>3</sub>	RH <sub>4</sub>	RO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	RO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	HR	—	—	RO <sub>4</sub>	—	—		

**\*Лантаноїди**

**\*\*Актиноїди**



## ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ І ЗАВДАНЬ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

### Розділ I. Електродинаміка

#### Частина 1. Електричний струм

**№ 1.** 2. 10 А; 22 Ом. 3. 1,8 м.

**№ 2.** 1. 50 мА; 40 В. 2. Послідовне; паралельне. 4. а)  $I_1 = I_2 = I = 2,4$  А; б)  $I_1 = 6$  А;  $I_2 = 4$  А;  $I = 10$  А. 5.  $R = 18$  Ом;  $I_1 = I_6 = 2$  А;  $I_3 = 1,2$  А;  $I_2 = I_4 = I_5 = 0,8$  А. 6. 10 і 30 Ом. 7. 0,1 Ом. 8. 0,4 А.

**№ 3.** 1. а) 8,1 кОм; 4,84 кОм; б) 0,027 А; 0,045 А; в) 115,2 кДж. 2. Збільшиться. 3. а) 32,3 Ом; б) 6,8 А; в) 26 хв. 4. 10 А. 5.  $P_2 = 4P_1$ .

**№ 4.** 2. 2 Ом. 3. 18 В; 2 Ом. 4. 1,125 Вт; 0,9 Вт; 0,6 Вт; 87,5 %.

**№ 5.** 3. 0,007 К<sup>-1</sup>; 0,125 А. 4. 64 Ом. 5. 24 см.

**№ 6.** 2. 5 · 10<sup>4</sup> с; 648 мг; 0,09 мг/Кл. 3. а) Однаково; б) у ванні 1. 4. в) ≈ 50 хв; 2,84 кДж.

**№ 7.** 1. Коронний. 2. Дуговий. 3. 2,2 · 10<sup>6</sup> м/с. 4. 10,5 · 10<sup>4</sup> К.

**№ 8.** 1. 1–А, 2–Г, 3–В. 2. 6 · 10<sup>5</sup> м/с. 3. 6 · 10<sup>7</sup> м/с. 4.  $\vec{B}$  угору вправо, по передній стінці.

**№ 9.** 1. А, Б, В. 2. А «», В «». 3. 5 Ом; 2/3.

#### Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 1

Завдання № 1. 1. а. 2. К<sub>3</sub>. 3. К<sub>1</sub> і К<sub>2</sub>. Завдання № 2. 1. 792 Дж. 2. 1,8 л. Завдання № 3. 1. а. 2.  $\leq 0,3$  Ом. Завдання № 4. 1. г. 2. 1,2 г;  $\approx 26$  хв. Завдання № 5. 1. б. 2. 2550 °C.

### Частина 2. Електромагнетизм

**№ 10.** 4. 7,1 А; 5 мН; 30 мТл.

**№ 11.** 1. 10,8 мН; 0 Н. 3. 375 мН·м. 5. а) 18 м/с<sup>2</sup>; б) 2 м/с<sup>2</sup>; в) 8,4 м/с<sup>2</sup>; г) 11,6 м/с<sup>2</sup>.

**№ 12.** 4. 2,7 · 10<sup>-15</sup> Г; 5,6 м. 5. 7,5 мм. 6. 6 · 10<sup>3</sup> м/с; 0,6 мкТл; 18 см.

**№ 13.** 1. 0,01 В. 2. а) 0,2 мВб; б) 2 мВ; в) 8,3 мА. 4. По передній стінці вправо; по передній стінці вниз. 5. По передній стінці: а) вправо; б) вліво; в) вліво; г) вліво. 6. Магніт. 7. 31 А.

**№ 14.** 1. Лампа 2 пізніше в обох випадках. 2. 0,13 Гн. 5. 0,4 Гн. 6. 33 мкГн.

**№ 15.** 1. 1–Б, 2–Г, 3–В. 2. У випадку з алюмінієвим циліндром.

**№ 16.** 1. Так. 2. а) Тільки магнітне поле; б) і електричне, і магнітне поля. 3. 80 фН, 500 км/с<sup>2</sup>. 4. Відносно спостерігача рухаються іони кристалічної ґратки.

#### Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 2

Завдання № 1. 1. Справа наліво. Завдання № 2. 1. в. 2. 3 · 10<sup>6</sup> м/с. 3. 0,07 мкс.

Завдання № 3. 1. а. 2,1,5 м/с. 3. 16 мкКл. Завдання № 4. 1. г. 2. в. 3. 0,1 с.

### Розділ II. Електромагнітні коливання і хвилі

**№ 17.** 1. 1) 0,3 с;  $6\pi$  с<sup>-1</sup>; 2)  $x = 0,8 \sin 6\pi t$  (см). 2.  $i = 0,5 \cos 100\pi t$  (А). 3. а) 0,02 м; 24 с; 0,04 Гц; б)  $\frac{\pi}{3}$  рад; 10 см; 5 мм/с. 4. Рис. 1. а) 0,2 м; 2 с; 0,5 Гц; б)  $x = 0,2 \cos \pi t$  (м). Рис. 2. а) 308 В; 20 мс; 50 Гц; б)  $u = 308 \sin 100\pi t$  (В).

**№ 18.** 1. а) Не зміниться; б)  $T \downarrow$  у 2 рази,  $v \uparrow$  у 2 рази; в)  $T \uparrow$  у 3 рази;  $v \downarrow$  у 3 рази. 2. Б.

**№ 19.** 1. 36. 2.  $e = 31,4 \sin 314t$  (В);  $i = 2,6 \sin 314t$  (А). а) 31,4 В; б) 2,6 А; в) 0,8 А. 4. 0,54 А.

**№ 20.** 1. 220 В; 308 В. 2. 6,28 Ом. 3. а) 0,35 А; 318 В; б) 111 Вт; в) 450 В;  $u = 450 \sin 100\pi t$  (В). 4. 3,8 мА. 5. 4,8 хв.

**№ 21.** 1. Знижувальний. 2. 30 В; 0,29. 3. 5,6 А. 4. 0,5 Ом.

**№ 22.** 1. б, в, г. 2.  $6 \cdot 10^6$  м;  $1,58 \cdot 10^{11}$  Гц;  $1,14 \cdot 10^{15}$  Гц. 3.  $\downarrow$  в 3 рази. 5. 4,5 км. 6. 150 млн.

**№ 23.** 2. 67 м. 3. 6,4 пФ. 4. 37,7 м.

**Завдання для самоперевірки до розділу II «Електромагнітні коливання і хвилі»**

**Завдання № 1.** 1. б. 2. г. 3. 49 мкДж. 4. 77 мкДж; 260 пФ. **Завдання № 2.** 1. б. 2. б. 3. 70. 4. Зменшиться. **Завдання № 3.** 1. в. 2. 0,17 мкс. 3. 350 пФ. **Завдання № 4.** 1. 10 В. 2. 0,5 мФ.

### Розділ III. Оптика

**№ 24.** 1. Ні. 2. 529 об/с.

**№ 25.** 1. Сніг відбиває світло дифузно. 2.  $40^\circ$ . 3. Якнайближче до щілини. 4.  $76,5^\circ$ .

**№ 26.** 1. У повітрі. 2.  $1,24 \cdot 10^8$  м/с;  $2,26 \cdot 10^8$  м/с;  $2 \cdot 10^8$  м/с. 3.  $49^\circ$ ;  $33^\circ$ ;  $61^\circ$ . 4. 5,5 м. 5. 12 мм. 6. 6,6 с.

**№ 27.** 1. 8 дптр, збиральна. 2. –3 дптр, розсіювальна. 4. 1 м; 0,6 м; 0,12 м. 5. 12 см; 20 см.

**№ 28.** 1. Далекозорість. 2. Із розсіювальними лінзами. 3. Ні. 4. 0,016 см; 0,009 рад. 5. Далекозорість; 0,5 м.

**№ 29.** 1. Червоним; так. 3. 1,6;  $1,9 \cdot 10^8$  м/с. 4. Довжину — так, частоту — ні. 5. Червоний.

**№ 30.** 1. Ні; ні. 2. Унаслідок інтерференції світла. 3. Максимум; мінімум; максимум. 4. Посилення; посилення; послаблення; посилення. 5. а) Мінімум; б) максимум.

**№ 31.** 2. 20 мкм. 3. 0,14 рад; 7. 4. 240 нм. 5. 11,6 см.

**№ 32.** 1. б, в. 3.  $\approx 1,7$ ; повністю поляризоване. 4.  $\approx 37^\circ$ .

**№ 33.** 2.  $3,3 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $1,1 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с; 600 нм. 3.  $3,3 \cdot 10^{-26}$  кг·м/с;  $10^{-17}$  Дж. 4.  $1,4 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с;  $0,9 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с; у 1,5 разу. 5. 5,7 кВт. 6. 10.

**№ 34.** 2. 1,6 еВ. 3. 2. 4. 1,8 еВ; так. 6.  $1,2 \cdot 10^{-19}$  Дж. 7.  $2 \cdot 10^{15}$  Гц. 8.  $10,8 \cdot 10^{14}$  Гц. 9.  $6,4 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

**№ 35.** 4.  $1,06 \cdot 10^8$  м/с.

**Завдання для самоперевірки до розділу III «Оптика»**

**Завдання № 1.** 1. б. 2. б. 3. 500 нм;  $4 \cdot 10^{14}$  Гц. 4. 2 см. **Завдання № 2.** 1. г. 2. в. 3. 2/3 м. **Завдання № 3.** 1. а, в. 2.  $1,6 \cdot 10^{-5}$  м. 3. 760 нм; 400 нм. **Завдання № 4.** 1. г. 2.  $5,8 \cdot 10^5$  м/с.

### Розділ IV. Атомна та ядерна фізика

**№ 36.** 1. Випромінює 1, 2, 3; поглинає 4, 5. 2.  $v_{\max}$  — перехід 4;  $\lambda_{\max}$  — перехід 5. 3. 276 нм. 4.  $2 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $4,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. 5.  $1,3 \cdot 10^{-15}$  м.

**№ 37.** 1. Лінійчастий; смугастий; неперервний. 2. В обох. 3. Так. 4. Характеристичне випромінювання відповідає переходу атома з одного стаціонарного стану в інший.

**№ 38.** 3.  $7 \cdot 10^{-20}$  Дж. 4.  $10,35 \cdot 10^{15}$ ; зелений.

**№ 39.** 1. Флуор — 9; 10; Телур — 52; 75; Меркурій — 80; 121. 2. Для Протію  ${}_1^1H$ . 4. 0,11236 а. о. м.; 104,7 МеВ; 7,48 МеВ/нуклон. 5. 7,75 МеВ/нуклон. 6. 184,36 МеВ.

**№ 40.** 1.  ${}_{90}^{234}Th$ . 2.  $\beta$ -розпад,  ${}_{12}^{24}Mg$ . 3.  $8,75 \cdot 10^8$ . 4. 93,75 %. 5. 6 тис.

**№ 41.** 1. Трековим. 3. 1)  ${}_{2}^4He$ ; 2)  ${}_{14}^{30}Si$ ; 3)  ${}_{1}^1H$ . 5. 17 тис. років.

**№ 42.** 1. в. 2. 4,2 млн т. 3. 340 МВт·год. 4. 17 %. 5.  $845 \cdot 10^9$  Дж.

**Завдання для самоперевірки до розділу IV «Атомна та ядерна фізика»**

**Завдання № 1.** 1. а, в, г. 2. а. 3. 440 нм. 4.  $9,2 \cdot 10^{-8}$  Н;  $4,1 \cdot 10^{-47}$  Н. **Завдання № 2.** 1. г. 2. б. 3.  $1,9 \cdot 10^{10}$ . **Завдання № 3.** 1. б. 2. г. 3. 250,6 МеВ. **Завдання № 4.** 1. б. 2. а. 3. 1,6 МДж.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

- A** Абсолютно чорне тіло 187  
Автоколивання 95  
Адаптація 162  
Адрон 248  
Акомодація 162  
Активність 234  
Ампер 6  
Ампер А. 56  
Амперметр 6  
Аналіз спектральний 216  
Анігіляція 247  
Антена 129  
Антинейтрino 232  
**Б** Бекерель 234  
Боголюбов М. М. 26  
**В** Вакуум 37  
Ввімкнення зворотне 47  
— пряме 47  
Вебер 73  
Взаємодія електромагнітна 89  
— сильна 226  
Випромінювання  
— індуковане (вимушене) 219  
— інфрачервоне 199  
— люмінесцентне 273  
— радіоактивне 231  
— — альфа ( $\alpha$ ) 231  
— — бета мінус ( $\beta^-$ ) 231  
— — бета плюс ( $\beta^+$ ) 231  
— — гамма ( $\gamma$ ) 200, 231  
— рентгенівське 200  
— спонтанне 219  
— ультрафioletове 199  
Відбивання світла 145  
— дзеркальне 145  
— дифузне 145  
— повне внутрішнє 152  
Відносна магнітна проникність 84  
Відстань фокусна 156  
Вольт 6  
Вольтметр 6  
**Г** Газовий розряд несамостійний 33  
— самостійний 33  
— — дуговий 35  
— — іскровий 35  
— — коронний 35  
— — тліючий 35  
Гальванопластика 30  
Гальваностегія 30  
Генератор змінного струму 109  
— квантovий 220  
— незгасаючих електромагнітних коливань 128  
Генрі 81  
Герц Г. 122  
Гіпотеза Планка 188  
Гучномовець 64  
**Г** Гратка дифракційна 180  
**Д** Далекозорість 163  
Двигун електричний 64  
Демодулятор (детектор) 131  
Дефект мас 227  
Джерело струму 5  
Дисперсія світла 167  
Дифракція 179  
Діамагнетики 85  
Діелектрична проникність середовища 84  
Діод ламповий 39  
— напівпровідниковий 46  
Дозиметр 239  
Домен 87  
Домішки акцепторні 45  
— донорні 45  
Дослід Ампера 56  
— Ерстеда 56  
— Резерфорда 210  
— Стюарта — Толмена 23  
— Юнга 173  
Досліди Герца 125  
— Ньютона 167  
— Фарадея 71  
**Е** Еквівалент електрохімічний 29  
Електричний опір активний 22  
— ємнісний 24  
— індуктивний 24  
Електричний струм 4  
— в електролітах 28  
— у вакуумі 39  
— у газах 33  
— у металах 23  
— у напівпровідниках 47  
Електроємність 100  
Електроліз 29  
Електроліти 28  
Електронний пучок 43  
Електронно-променева трубка 41  
Електрорушійна сила 19  
— індукції 73  
— самоіндукції 80  
Елемент нагрівальний 16  
Емісія автоелектронна 38  
— вторинна 38  
— електронна 38  
— термоелектронна 38  
— фотоелектронна 38

- Енергія**  
   — зв'язку атомного ядра 227  
   — питома 227  
   — коливального контуру 101  
   — магнітного поля 82
- З** Закон Брюстера 185  
   — Джоуля — Ленца 15  
   — електромагнітної індукції 74  
   — Ома для ділянки кола 6  
   — для повного кола 20  
   — прямолінійного поширення світла 144  
   — радіоактивного розпаду (основний) 234  
   — самоіндукції 81
- Закони відбивання світла 145  
   — електролізу 29  
   — заломлення світла 151  
   — фотоефекту 234
- Замикання коротке 20
- З'єднання провідників паралельне 10  
   — послідовне 9
- І** Ізотоп 226, 237
- Індуктивність 81
- Інтерференція світла 171
- Й** Йонізація 33  
   — випромінюванням 33  
   — електронним ударом 34  
   — термічна 33
- К** Камера бульбашкова 239  
   — Вільсона 239  
   — йонізаційна 239
- Кварк 249
- Кіловат-година 14
- Коефіцієнт корисної дії трансформатора 119  
   — температурний електричного опору 24  
   — трансформації 117
- Коливання 95  
   — вимушені 95  
   — електромагнітні 107  
   — вільні 95, 101  
   — гармонічні 96
- Коло електричне 5
- Конденсатор 100
- Контур коливальний 100
- Коротковідрізь 163
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм 141, 213
- Кут відбивання 145  
   — зору 163  
   — падіння 145
- Л** Кюрі 234  
   Кюрі П. 230
- Лазер 221
- Лінза 155
- Лінії магнітної індукції 59
- Лічильник газорозрядний 239  
   — електричної енергії 14  
   — сцинтиляційний 239
- М** Магнітна індукція 58  
   Максвелл Дж. 122  
   Мас-спектрометр 69  
   Модель атома 210, 211  
   Модуляція 130  
   Момент магнітний 84  
   — сили 63  
   — сили Ампера 63
- Н** Надпровідність 25
- Напівпровідник 43  
   — *n*-типу 45  
   — *p*-типу 45
- Напруга електрична 6  
   — затримуюча (запірна) 192
- Напруженість електричного поля 4
- Нейтрин 233, 247
- Нейtron 225
- Нуклід 225
- Нуклон 225
- О** Оборотність світлових променів 145
- Око 162
- Ом 6
- Опір електричний 6  
   — активний 112  
   — внутрішній 20  
   — додатковий 11  
   — ємнісний 114  
   — індуктивний 114  
   — питомий 6  
   — реактивний 114
- Оптика 140  
   — геометрична 144
- Оптична система 162
- П** Парамагнетики 86
- Перехід електронно-дірковий (*p*-*n*-перехід) 46
- Період коливань 97  
   — піврозпаду 233
- Період (стало) грратки 180
- Плазма 32
- Планк М. 188
- Позитрон 247
- Показник заломлення світла  
   абсолютний 151  
   — відносний 150

- Поле електричне 4, 90  
   — електромагнітне 89  
   — магнітне 57, 59, 90  
 Поляризація світла 183  
 Поляроїди 183  
 Постулати Бора 212  
 Потік магнітної індукції 73  
 Потужність струму 14  
 Правила зміщення 232  
   — Ленца 74  
   — лівої руки 62, 67  
   — свердлика (правої руки) 58  
 Принцип Гюйгенса — Френеля 179  
   — Ферма 144  
 Провідність власна 44  
   — діркова 44  
   — домішкова 45  
   — електронна 44  
 Промінь світловий 144  
 Протон 225  
 Пучок електронний 40  
   — світловий 144
- P** Радіо 128  
 Радіоактивність 232  
 Радіонуклід 231  
 Радіовилі 198  
 Рафінування 30  
 Реакція термоядерна 244  
   — ядерна 236  
   — ядерна ланцюгова 242  
 Рівняння Ейнштейна для фото-  
 ефекту 193  
 Робота виходу 33, 193  
   — струму 14
- C** Світло 140  
   — видиме 199  
   — монохроматичне 171  
 Сила Ампера 57, 61  
   — Лоренца 67  
   — оптична лінзи 157  
   — стороння 18  
   — струму 6  
   — — діюча 113  
   — — короткого замикання 21  
   — ядерна 226  
 Складовська-Кюрі М. 230  
 Спектр випромінювання  
   лінійчастий 215  
   — неперервний 215  
   — смугастий 216  
   — дисперсійний 167  
   — дифракційний 181  
   — поглинання лінійчастий 215
- Спектральний аналіз 168, 216  
 Спектроскоп 168  
 Стала Планка 186  
   — радіоактивного розпаду 234  
   — Фарадея 29  
 Стан атома збуджений 212  
   — метастабільний 220  
   — основний 212  
 Струм електричний змінний 107  
   — — постійний 4  
   — насиження 34, 192  
 Струми Фуко 76  
 Схема електрична 5
- T** Теорія світла корпускулярна  
   І. Ньютона 141  
   — хвильова К. Гюйгенса 141  
 Термістор 44  
 Тесла 58  
 Трансформатор 116
- У** Умова інтерференційного  
   максимуму 172  
   — мінімуму 172
- Ф** Фарад 100  
 Феромагнетики 87  
 Фокус лінзи головний 156  
 Формула дифракційної ґратки 181  
   — Планка 186  
   — Томсона 104  
   — тонкої лінзи 159  
 Фотоелементи 194  
 Фотоефект 191  
 Фотон 188, 309  
 Фоторезистор 44  
 Фотострум 191
- X** Хвилі когерентні 171  
 Хвиля де Броїля 213  
   — електромагнітна 122
- Ц** Циклотрон 69
- Ч** Частинки елементарні 248  
 Частота коливань 97  
   — циклічна 97  
   — власна переходу 220  
 Червоне зміщення 218  
 Число зарядове (протонне) 225  
   — масове (нуклонне) 225
- Ш** Шкала електромагнітних хвиль 197  
 Шунт 11
- Я** Явище електромагнітної індукції 75  
   — відбивання світла 145  
   — заломлення світла 149  
   — розсіювання світла 169  
   — самоіндукції 80  
 Ядерний реактор 243

## ЗМІСТ

Передмова . . . . .	3
---------------------	---

### Розділ I. Електродинаміка

#### Частина 1. Постійний електричний струм

§ 1. Електричний струм . . . . .	4
§ 2. Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Шунти і додаткові опори . . . . .	9
§ 3. Робота і потужність електричного струму.	
Закон Джоуля — Ленца . . . . .	14
§ 4. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола . . . . .	18
§ 5. Електричний струм у металах . . . . .	23
§ 6. Електричний струм в електролітах. Електроліз . . . . .	28
§ 7. Електричний струм у газах. . . . .	32
§ 8. Електричний струм у вакуумі. Електровакуумні прилади . . . . .	37
§ 9. Електричний струм у напівпровідниках . . . . .	43
<i>Експериментальна робота № 1 . . . . .</i>	49
<i>Експериментальна робота № 2 . . . . .</i>	50
<i>Експериментальна робота № 3 . . . . .</i>	52
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 1 . . . . .	54
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 1 . . . . .	55

#### Частина 2. Електромагнетизм

§ 10. Магнітне поле . . . . .	56
§ 11. Сила Ампера . . . . .	61
§ 12. Сила Лоренца . . . . .	67
§ 13. Досліди М. Фарадея. Закон електромагнітної індукції . . . . .	71
§ 14. Самоіндукція. Індуктивність. Енергія магнітного поля . . . . .	79
§ 15. Магнітні властивості речовини. Dia-, пара- і феромагнетики . . . . .	84
§ 16. Електромагнітне поле . . . . .	89
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 2 . . . . .	93
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 2 . . . . .	94

### Розділ II. Електромагнітні коливання і хвилі

§ 17. Коливання. Види коливань. Фізичні величини, які характеризують коливання . . . . .	95
§ 18. Вільні електромагнітні коливання в ідеальному коливальному контурі.	
Формула В. Томсона . . . . .	100
§ 19. Змінний струм. Генератори змінного струму . . . . .	107
§ 20. Активний, ємнісний та індуктивний опори в колі змінного струму . . . . .	112
§ 21. Передача та використання енергії змінного струму. Трансформатор . . . . .	116
§ 22. Електромагнітні хвилі. Властивості електромагнітних хвиль.	
Досліди Г. Герца . . . . .	122
§ 23. Принципи радіотелефонного зв'язку. Радіомовлення і телебачення . . . . .	128
<i>Експериментальна робота № 4 . . . . .</i>	134
Підбиваємо підсумки розділу II . . . . .	136
Завдання для самоперевірки до розділу II . . . . .	137
Енциклопедична сторінка . . . . .	138

### Розділ III. Оптика

§ 24. Розвиток уявлень про природу світла .....	140
§ 25. Відбивання світла. Закони відбивання світла .....	144
§ 26. Заломлення світла. Закони заломлення світла. Повне відбивання світла .....	149
§ 27. Лінзи. Побудова зображень у лінзах. Формула тонкої лінзи .....	155
§ 28. Оптичні системи. Кут зору .....	162
§ 29. Дисперсія світла. Спектроскоп .....	167
§ 30. Інтерференція світла .....	171
§ 31. Дифракція світла .....	178
§ 32. Поляризація світла. Поляроїди .....	183
§ 33. Формула Планка. Світлові кванти .....	187
§ 34. Фотоефект. Закони фотоефекту .....	190
§ 35. Шкала електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі в природі і техніці .....	197
<i>Експериментальна робота № 5</i> .....	203
<i>Експериментальна робота № 6</i> .....	204
<i>Експериментальна робота № 7</i> .....	206
Підбиваємо підсумки розділу III .....	208
Завдання для самоперевірки до розділу III .....	209

### Розділ IV. Атомна та ядерна фізика

§ 36. Дослід Е. Резерфорда. Постулати Н. Бора. Енергетичні рівні атома .....	210
§ 37. Види спектрів. Основи спектрального аналізу .....	215
§ 38. Квантово-оптичні генератори (лазери) .....	219
§ 39. Протонно-нейtronна модель атомного ядра. Ядерні сили. Енергія зв'язку .....	224
§ 40. Радіоактивність. Основний закон радіоактивного розпаду .....	230
§ 41. Отримання та застосування радіонуклідів. Методи реєстрації іонізуючого випромінювання .....	236
§ 42. Ланцюгова реакція поділу ядер Урану. Термоядерні реакції .....	241
§ 43. Елементарні частинки .....	247
<i>Експериментальна робота № 8</i> .....	250
<i>Експериментальна робота № 9</i> .....	252
Підбиваємо підсумки розділу IV .....	254
Завдання для самоперевірки до розділу IV .....	255

Орієнтовні теми проектів, рефератів і повідомлень, експериментальних досліджень .....	256
<i>Додаток 1</i> .....	259
<i>Додаток 2</i> .....	261
Періодична система хімічних елементів Д. І. Менделєєва .....	264
Відповіді до вправ і завдань для самоперевірки .....	265
Алфавітний покажчик .....	267

*Рубрика «Фізика і техніка в Україні»:*

Б. Є. Патон (8), В. Є. Лашкарьов (42), Л. Д. Ландау (89), І. М. Ліфшиц (89), А. Ф. Пріхильський (106), О. Т. Смакула (177), І. П. Пулуй (202).

## Відомості про користування підручником

№ з/п	Прізвище та ім'я учня / учениці	Навчаль- ний рік	Стан підручника на початку року	в кінці року
1				
2				
3				
4				
5				

**Навчальне видання**  
**БАР'ЯХТАР Віктор Григорович**  
**ДОВГИЙ Станіслав Олексійович**  
**БОЖИНОВА Файна Яківна**  
**КІРЮХІНА Олена Олександрівна**

**«ФІЗИКА**  
(рівень стандарту, за навчальною програмою  
авторського колективу  
під керівництвом Локтєва В. М.)»  
підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти  
За редакцією Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О.

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Провідний редактор І. Л. Морєва. Редактор О. В. Костіна.  
Художнє оформлення В. І. Труфена. Технічний редактор А. В. Пліско.  
Комп'ютерна верстка С. В. Яшиша. Коректор Н. В. Красна

Окремі зображення, що використані в оформленні підручника,  
розміщені в мережі Інтернет для вільного використання

Підписано до друку 30.05. 2019. Формат 70×100/16.

Папір офсетний. Гарнітура Шкільна. Друк офсетний.

Ум. друк. арк. 22,10. Обл.-вид. арк. 24,20.

Тираж 287 515 прим. (1-й запуск 1–60 000). Зам. № 0606-2019/1.

ТОВ Видавництво «Ранок»,

вул. Кібал'чича, 27, к. 135, Харків 61071.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5215 від 22.09.2016.

Адреса редакції: вул. Космічна, 21а, Харків 61145.

E-mail: office@ranok.com.ua Тел. (057) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.

Підручник надруковано на папері українського виробництва

Надруковано у друкарні ТОВ «ТРИАДА-ПАК»,

prov. Сімферопольський, 6, Харків, 61052.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5340 від 15.05.2017.

Тел. +38 (057) 712-20-00. E-mail: sale@triada.kharkov.ua