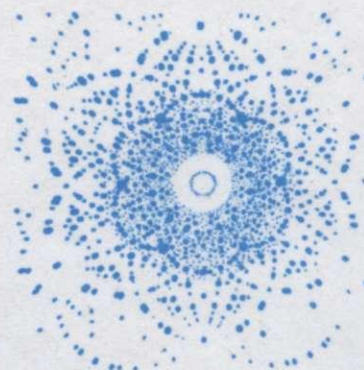
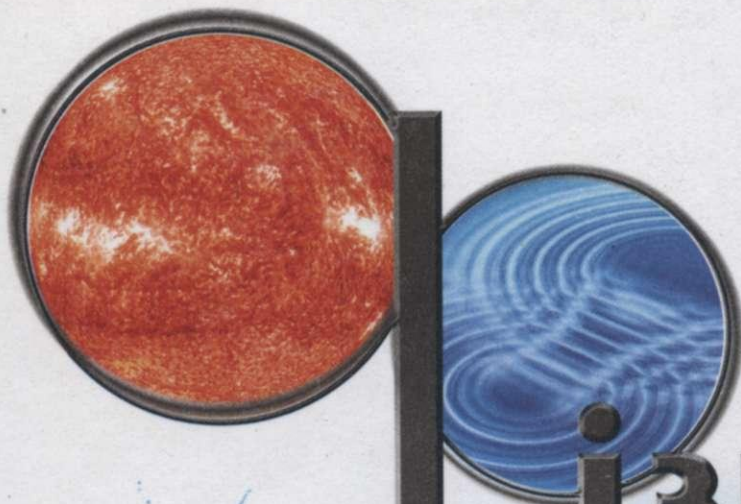


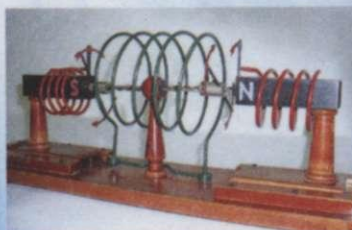
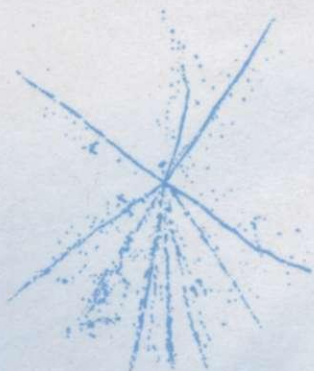
Володимир Сиротюк, Володимир Баштовий



# Фізика

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

# 11



**Володимир Сиротюк**  
**Володимир Баштовий**

# ФІЗИКА

Підручник для **11** класу  
загальноосвітніх навчальних закладів

**Рівень стандарту**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*

Харків «Синія» 2011

ББК 22.3я721  
С 40

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*  
(Наказ від 16.03.2011 р. №235)

**Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено**

Наукову експертизу підручника проводив  
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова  
Національної академії наук України

Психолого-педагогічну експертизу підручника проводив  
Інститут педагогіки  
Національної академії педагогічних наук України

Сиротюк, В. Д.  
С 40 Фізика: підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (рівень стандарту) / В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий. - Харків: Сиція, 2011. - 304 с.  
ISBN 978-966-2542-02-8

ББК 22.3я721

ISBN 978-966-2542-02-8

© В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий, 2011  
© Видавництво «Сиція», 2011  
© Художньоформлення, Т.М. Канарська,  
2011

## ЗМІСТ

## ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

## Розділ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ І СТРУМ

§ 1.	Електричне поле	9
§ 2.	Напруженість електричного поля	11
	<i>Це цікаво знати.</i>	13
§ 3.	Потенціал електричного поля. Різниця потенціалів	13
	<i>Це цікаво знати.</i>	15
§ 4.	Електроємність. Конденсатор. Енергія електричного поля	16
	<i>Задачі та вправи.</i>	22
§ 5.	Електричний струм. Електричне коло. З'єднання провідників	24
§ 6.	Робота та потужність електричного струму	28
§ 7.	Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола	30
	<i>Це цікаво знати.</i>	33
	Лабораторна робота № 1. Вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму.	35
	<i>Задачі та вправи.</i>	36
§ 8.	Електричний струм у різних середовищах	40
§ 9.	Електричний струм у напівпровідниках	42
§ 10.	Донорні та акцепторні домішки. Електричний струм через р-п-перехід	44
§ 11.	Напівпровідниковий діод. Застосування напівпровідників	47
	<i>Це цікаво знати.</i>	49
	Лабораторна робота № 2. Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом	51
	<i>Задачі та вправи.</i>	52
	<i>Перевірте свої знання.</i>	53
	<i>Контрольні запитання.</i>	53
	<i>Що я знаю і вмію робити.</i>	54
	<i>Тестові завдання.</i>	55

## Розділ 2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ

§ 12.	Взаємодія струмів. Магнітне поле. Дія магнітного поля на провідник зі струмом	62
§ 13.	Індукція магнітного поля. Потік магнітної індукції	64
§ 14.	Сила Ампера. Сила Лоренца	67
	<i>Це цікаво знати.</i>	69
	<i>Задачі та вправи.</i>	71
§ 15.	Магнітні властивості речовини. Магнітний запис інформації	74
	<i>Це цікаво знати.</i>	76
§ 16.	Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції	77
	Лабораторна робота № 3. Дослідження явища електромагнітної індукції	80
§ 17.	Індуктивність. Енергія магнітного поля котушки зі струмом	81
	<i>Задачі та вправи.</i>	84
§ 18.	Змінний струм. Генератор змінного струму	88
	<i>Це цікаво знати.</i>	90
§ 19.	Трансформатор. Виробництво, передача та використання енергії електричного струму	92
	<i>Задачі та вправи.</i>	95
	<i>Перевірте свої знання.</i>	97

Контрольні запитання . . . . .	97
Що я знаю і вмію робити . . . . .	98
Тестові завдання . . . . .	99

## МЕХАНІЧНІ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

### Розділ 3. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

§ 20. Коливальний рух. Період і частота коливань . . . . .	109
§ 21. Гармонічні коливання . . . . .	110
§ 22. Математичний маятник. Період коливань математичного маятника . . . . .	114
Лабораторна робота № 4. Виготовлення маятника і визначення періоду його коливань . . . . .	115
§ 23. Вільні коливання. Вимушені коливання. Резонанс . . . . .	116
§ 24. Поширення механічних коливань у пружному середовищі. Поперечні та поздовжні хвилі. Довжина хвилі. . . . .	119
<i>Задачі та вправи.</i> . . . . .	121
§ 25. Коливальний контур. Виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі . . . . .	125
§ 26. Гармонічні електромагнітні коливання. Частота власних коливань контуру. . . . .	126
§ 27. Затухаючі та вимушені електромагнітні коливання. Резонанс . . . . .	130
§ 28. Електромагнітне поле. Електромагнітні хвилі . . . . .	132
<i>Це цікаво знати.</i> . . . . .	135
§ 29. Швидкість поширення, довжина, частота електромагнітної хвилі. Шкала електромагнітних хвиль. . . . .	138
§ 30. Властивості електромагнітних хвиль та їх застосування . . . . .	140
<i>Задачі та вправи.</i> . . . . .	143
<i>Перевірте свої знання.</i> . . . . .	146
Контрольні запитання. . . . .	146
Що я знаю і вмію робити. . . . .	146
Тестові завдання. . . . .	147

## ОПТИКА І КВАНТОВА ФІЗИКА

### Розділ 4. ХВИЛЬОВА І КВАНТОВА ОПТИКА

§ 31. Розвиток поглядів на природу світла . . . . .	155
§ 32. Поширення світла в різних середовищах. Явища на межі двох середовищ . . . . .	156
<i>Це цікаво знати.</i> . . . . .	160
<i>Задачі та вправи.</i> . . . . .	161
§ 33. Інтерференція світла . . . . .	163
§ 34. Дифракція світла . . . . .	168
Лабораторна робота № 5. Спостереження інтерференції та дифракції світла . . . . .	172
§ 35. Поляризація світла. Поперечність світлових хвиль і електромагнітна теорія світла . . . . .	173
<i>Це цікаво знати.</i> . . . . .	175
§ 36. Дисперсія світла . . . . .	177
<i>Задачі та вправи.</i> . . . . .	180
§ 37. Розвиток квантової фізики. Гіпотеза Планка . . . . .	182
§ 38. Фотон. Енергія, маса, імпульс фотона. Фотоелектричний ефект. . . . .	184
§ 39. Застосування фотоефекту. . . . .	187
§ 40. Люмінесценція. . . . .	188
§ 41. Квантові генератори та їх застосування. . . . .	191
§ 42. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла . . . . .	194

<i>Задачі та вправи</i> . . . . .	195
<i>Перевірте свої знання</i> . . . . .	197
<i>Контрольні запитання</i> . . . . .	197
<i>Що я знаю і вмію робити</i> . . . . .	198
<i>Тестові завдання</i> . . . . .	199

## АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА

### Розділ 5. АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА

§ 43. Історія вивчення атома . . . . .	205
§ 44. Квантові постулати Бора . . . . .	207
§ 45. Модель атома Гідрогену за Бором. Труднощі теорії Бора . . . . .	210
§ 46. Спектроскоп. Спектральний аналіз . . . . .	212
<i>Це цікаво знати</i> . . . . .	216
Лабораторна робота № 6. Спостереження неперервного і лінійчастого спектрів речовини . . . . .	217
§ 47. Рентгенівське випромінювання . . . . .	218
<i>Задачі та вправи</i> . . . . .	222
§ 48. Атомне ядро. Ядерні сили. Енергія зв'язку атомних ядер . . . . .	224
§ 49. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду . . . . .	228
§ 50. Ядерні реакції . . . . .	231
§ 51. Ланцюгова реакція поділу ядер Урану . . . . .	233
§ 52. Фізичні основи ядерної енергетики . . . . .	234
§ 53. Дія радіоактивного випромінювання на живий організм . . . . .	239
§ 54. Елементарні частинки, їх класифікація та характеристика . . . . .	241
<i>Задачі та вправи</i> . . . . .	245
<i>Перевірте свої знання</i> . . . . .	249
<i>Контрольні запитання</i> . . . . .	249
<i>Що я знаю і вмію робити</i> . . . . .	249
<i>Тестові завдання</i> . . . . .	250

## ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Робота № 1. Вивчення конденсаторів . . . . .	255
Робота № 2. Дослідження електричних кіл . . . . .	256
Робота № 3. Визначення довжини світлової хвилі . . . . .	257
Робота № 4. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою маятника . . . . .	258
Робота № 5. Вивчення будови дозиметра і складання радіологічної карти місцевості . . . . .	259
Робота № 6. Вивчення треків заряджених частинок за готовими фотографіями . . . . .	260

## УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ

§ 55. Сучасна фізична картина світу . . . . .	262
§ 56. Науково-технічний прогрес і проблеми екології . . . . .	264
§ 57. Фізика і загальнолюдські цінності . . . . .	268
Узагальнююче повторення курсу фізики . . . . .	271

## ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ

Фізичні задачі навколо нас . . . . .	287
Відповіді до рубрики «Задачі та вправи» . . . . .	291
Відповіді до рубрики «Фізичні задачі навколо нас» . . . . .	294
Словник фізичних термінів . . . . .	296
Предметно-іменний покажчик . . . . .	302

### *Юні друзі!*

Ви відкрили підручник, з яким працюватимете у навчальному році, що є завершальним у школі. Сподіваємося, він буде добрим помічником у вашій подорожі до країни знань та допоможе вам докладніше ознайомитися з явищами навколишнього світу і вибрати майбутню професію.

В 11 класі ви будете вивчати електродинаміку, коливання і хвилі, хвильову та квантову оптику, атомну і ядерну фізику. Теоретичний матеріал у пропонованому підручнику допоможе вам зрозуміти та пояснити відповідні процеси і явища, закони і теорії. Звертайте увагу на текст, виділений жирним шрифтом та кольором. Це фізичні терміни, визначення, важливі правила і закони. Їх треба пам'ятати і вміти застосовувати.

Підручник містить багато ілюстрацій; у ньому розглядаються досліди, які ви можете виконати самостійно або за порадами вчителя. Вони допоможуть глибше зрозуміти фізичний зміст явищ, що вивчаються. Рубрика «Це цікаво знати!» наприкінці деяких параграфів, без сумніву, розширить ваш кругозір.

Після кожного параграфа є запитання і завдання, відповіді на які допоможуть вам краще засвоїти викладений матеріал, закріпити формулювання означень, законів. Частина з них має творчий характер, потребує вміння аналізувати умови завдання, а також простежувати логічну послідовність і зв'язки у перебігу фізичних явищ.

У рубриці «Розв'язуємо разом» наведено зразки розв'язання найважливіших типів задач. Підручник містить задачі, вправи і запитання різних рівнів складності: А — на закріплення, В — творчого характеру.

Виконані вами лабораторні роботи і роботи фізичного практикуму збагатять вас поглибленим розумінням закономірностей фізичних явищ та вмінням ставити досліди і користуватися вимірювальними приладами.

Якщо вам знадобиться дізнатися про якийсь фізичний термін або правило, то скористайтеся «Словником фізичних термінів» і предметно-іменним покажчиком, що містяться наприкінці підручника.

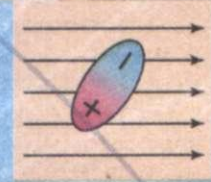
Виконуючи спостереження і досліди з фізики, будьте уважними, дотримуйтеся правил безпеки.

Намагайтеся бути максимально активними у засвоєнні матеріалу. Частіше обмінюйтеся думками щодо прочитаного зі своїми товаришами. Для з'ясування важких і спірних питань звертайтеся, у першу чергу, до вчителя, довідників та енциклопедій. Для перевірки правильності розуміння вивченого матеріалу корисно обговорювати повідомлення, доповіді учнів, розв'язки задач.

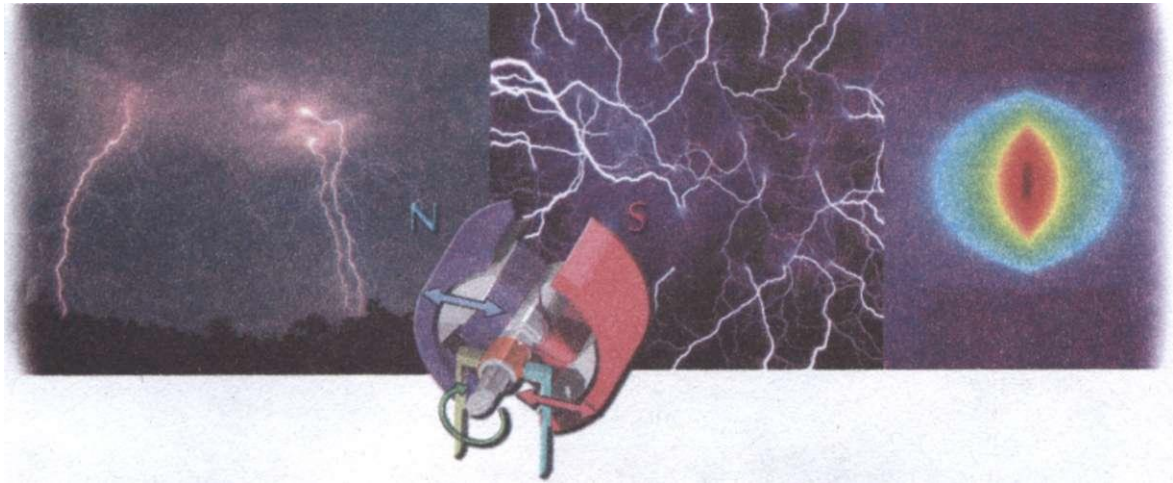
Із самого початку налаштуйтеся на те, що вивчення фізики — це не легка праця. Радість пізнання дається тільки як нагорода за перемогу над труднощами; її можна порівняти з радістю альпініста, який підкорив вершину. Виявіть працездатність, волю, і робота з підручником надасть вам немало радісних хвилин.

*Щасливої вам дороги до знань!*

# ЕЛЕКТРОДИНАМІКА







## Розділ 1 Електричне поле і струм

- Електричне поле
- Напруженість електричного поля
- Потенціал електричного поля.  
Різниця потенціалів
- Електроємність. Конденсатор.  
Енергія електричного поля
- Електричний струм. Електричне коло.  
З'єднання провідників
- Робота та потужність електричного струму
- Електрорушійна сила.  
Закон Ома для повного кола
- Електричний струм у різних середовищах
- Електричний струм у напівпровідниках
- Донорні та акцепторні домішки.  
Електричний струм через р-п-перехід.  
Напівпровідниковий діод.  
Застосування напівпровідників

## § 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Перед тим, як почати розгляд електричного поля та його властивостей, пригадаємо, що ви вивчали раніше. З курсу фізики 7 та 9 класів ви дізналися, що всі тіла, які нас оточують; складаються з атомів, а атоми можуть об'єднуватися в молекули. До складу всіх без винятку атомів (і молекул) входять так звані елементарні частинки — найменші частинки речовини, що мають електричні заряди, *електрони* і *протони*: електрони мають *негативний* заряд, а протони — такий самий за значенням, але *позитивний*.

Електрон (з грец. — *янтар*, *буристин*) — стабільна елементарна частинка з негативним електричним зарядом  $e = -1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$  Кл і масою  $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31}$  кг.

Тепер пригадаємо властивості заряджених тіл. Зарядимо натиранням об хутро ебонітову паличку і підвісимо її на нитці. Якщо піднести до неї так само заряджену іншу ебонітову паличку (мал. 1), то вони будуть відштовхуватися одна від одної. Якщо ж до зарядженої ебонітової палички піднести заряджену тертям об шовк чи сухий папір скляну паличку, то палички будуть притягуватися одна до одної (мал. 2).

Отже, однойменно заряджені тіла відштовхуються, а різнойменно заряджені тіла притягуються.

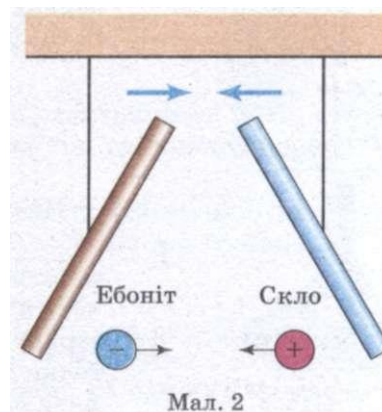
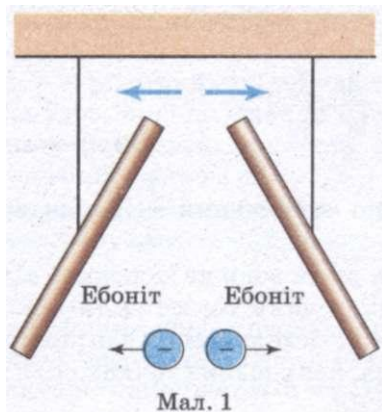
Якщо заряджені тіла *відштовхуються* або *притягуються*, то говорять, що вони взаємодіють між собою. Пригадаємо закон взаємодії, експериментально відкритий у XVIII столітті французьким вченим Ш. Кулоном.

**Сила взаємодії двох заряджених нерухомих тіл, розмірами яких можна знехтувати порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними, та напрямлена вздовж лінії, що сполучає ці тіла.**

Математично закон Кулона (взаємодії) можна записати так:

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

де  $q_1, q_2$  — взаємодіючі точкові заряди;  $r$  — відстань між ними;  $k$  — коефіцієнт, який залежить від вибору одиниць величин, що входять до закону,  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ .



Розглянемо детальніше саме явище електричної взаємодії. Закріпимо металеву кулю на стержні електromетра (мал. 3) і зарядимо її від ебонітової палички, потертої хутром. Стрілка відхилиться від положення рівноваги, це засвідчить, що куля має електричний заряд. Підвісимо на тонкій нитці легку, виготовлену з фольги, гільзу і почнемо підносити її до кулі. На певній відстані помітимо, що гільза притягується до кулі, внаслідок чого нитка відхилиться від вертикального положення.

Наша уява звикла до того, що дія одного тіла на інше відбувається внаслідок безпосереднього контакту між ними. Так, вагон почне рухатися лише тоді, коли локомотив буде тягти чи штовхати його. М'яч змінить напрям руху в той момент, коли доторкнеться до ноги футболіста чи стійки воріт.

*Який же механізм взаємодії заряджених тіл?* Відповідь на це запитання дав англійський фізик **М. Фарадей**, осмисливши всі відомі на той час знання з електрики і дійшовши висновку про існування електричного поля як виду матерії.

Електричне поле є особлива форма матерії, нерозривно зв'язана з усяким електричним зарядом. Через електричне поле відбуваються всі електричні взаємодії.

**Сили, з якими електричне поле діє на заряджені тіла, називаються електричними силами.**

Дослідження електричного поля можна проводити, поміщаючи в поле невеликі заряджені тіла. Ними можуть бути легкі заряджені кульки чи гільзи.

Такі тіла ми далі називатимемо пробними зарядами. За їх допомогою виявляють наявність електричного поля в даній точці простору. Про наявність поля свідчить дія на заряджене тіло певної сили.

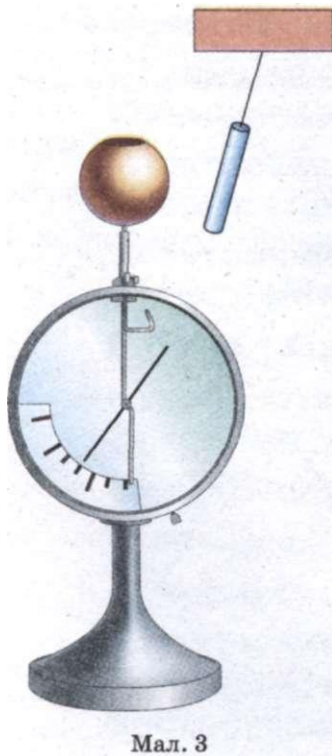
**Дія електричного поля на заряджені тіла є основною характеристикою електромагнітного поля.**

Якщо в конкретну точку електричного поля послідовно поміщати пробні заряди  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , які мають різні значення, то на них з боку поля будуть діяти різні сили  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ . Якщо знайти відношення кожної з цих сил до значення пробного заряду, на який діє ця сила, то отримаємо одне й те саме значення:

$$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \dots = \frac{\vec{F}_n}{q_n}.$$

Це означає, що відношення  $\frac{\vec{F}}{q}$  характеризує

електричне поле, адже воно не залежить від значення вмішеного у дану точку поля пробного заряду і має одне й те саме значення для конкретної точки даного поля, але у різних точках поля може мати різні значення.



Мал. 3

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як проявляється взаємодія заряджених тіл?
2. Сформулюйте закон Кулона.
3. Що таке електричне поле?
4. Що є основною характеристикою електромагнітного поля?

## § 2. НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Фізичну величину, яка визначається відношенням сили, що діє на заряд, вміщений у дану точку поля, до значення цього заряду, називають *напруженістю електричного поля*. Позначається напруженість літерою  $E$  і визначається за формулою

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

**Напруженість електричного поля** — векторна фізична величина, яка є основною кількісною характеристикою електричного поля. Її називають **силовою характеристикою поля**.

Одиницею напруженості електричного поля в СІ є **1 вольт на 1 метр**  $\left(\frac{1\text{В}}{1\text{м}}\right)$

$$\frac{1\text{Н}}{1\text{Кл}} = \frac{1\text{В}}{1\text{м}}$$

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд, розміщений у даній точці поля.

Якщо поле створене нерухомим точковим зарядом  $q_0$ , то на пробний заряд  $q$  буде діяти сила  $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$ . Тому значення напруженості електростатичного поля, створеного нерухомим точковим зарядом, розраховується за формулою

$$E = k \frac{q_0}{r^2}$$

де  $E$  — напруженість електричного поля,  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ ,  $q_0$  — точковий заряд,  $r$  — відстань між зарядами.

Для того, щоб визначити напруженість електричного поля, створеного системою нерухомих точкових заряджених тіл, слід виходити з *принципу суперпозиції*, згідно з яким:

**повна напруженість поля в точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених у даній точці окремими точковими зарядженими тілами:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

Електричне поле можна зображати, проводячи вектори напруженості в кожній його точці. Проте таке графічне зображення є незручним, тому що вектори напруженості накладаються один на одного і спостерігається заплутана картина.

М. Фарадей запропонував більш наочний метод зображення електричних полів за допомогою *силових ліній* (*ліній напруженості*).

Силкові лінії точкових зарядів являють собою прямі лінії, що проходять через ці заряди.

**Силковими лініями** поля взаємодіючих тіл називаються криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора напруженості.

Вважається, що силкові лінії починаються на позитивно заряджених тілах і закінчуються на негативно заряджених (мал. 4).

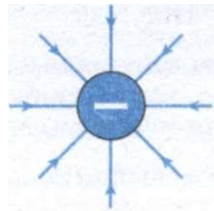
Лінії напруженості не перетинаються, адже в кожній точці поля вектор  $\vec{E}$  має лише один напрям. З того, як густо розміщені силкові лінії в полі, можна судити про напруженість поля.

Отже, силкові лінії дають наочну картину розподілу електричного поля у просторі: густина силових ліній і їх напрям характеризують значення і напрям вектора напруженості електричного поля в кожній його точці. Силкові лінії електричного поля ніде не перетинаються, вони можуть тільки сходитись до заряду або розходитись від нього.

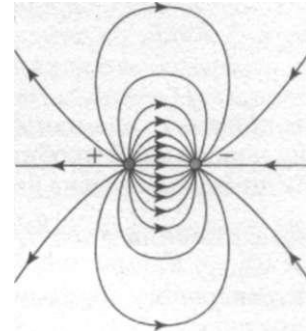
На мал. 4 подано приклади ліній напруженості позитивно і негативно заряджених кульок (мал. 4, а, б), двох різнойменно заряджених кульок (мал. 4, в), двох однойменно заряджених кульок (мал. 4, г), двох пластин, заряди яких однакові за модулем і протилежні за знаком (мал. 4, д).



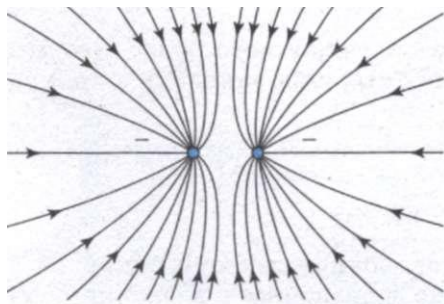
а



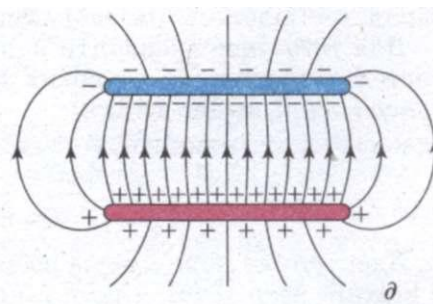
б



в



г



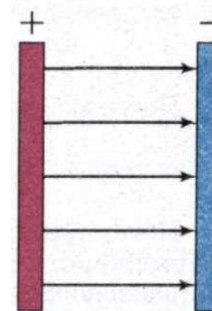
д

Мал. 4

Електричне поле, в якому напрям і значення напруженості в усіх точках однакові, називається однорідним. В однорідному полі силові лінії паралельні одна одній, мають однаковий напрям, однакову густоту. Прикладом однорідного поля може слугувати поле між двома паралельними металевими пластинами з рівними за значенням і протилежними за знаком зарядами (мал. 5).

Електричне поле не має меж, воно існує в усіх точках простору. Якщо й кажуть про певну межу, то мають на увазі певну точку поля, в якій прилади вже не можуть виявити це поле.

На основі закону Кулона і принципу суперпозиції полів можна визначити напруженість поля практично будь-якої сукупності заряджених тіл.



Мал. 5

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають пробним зарядом?
2. Що таке напруженість електричного поля? Що вона характеризує?
3. Як визначається напруженість електричного поля?
4. У чому полягає принцип суперпозиції?
5. Які лінії називаються силовими?
6. Яке електричне поле називається однорідним?



### Це цікаво знати

Велике значення напруженості поблизу вістря на зарядженому провіднику приводить до явища, відомого під назвою «електричний вітер».

В атмосферному повітрі завжди є невелика кількість позитивних йонів і вільних електронів, які виникають під впливом космічних променів, випромінювання радіоактивних речовин тощо. У сильному електричному полі біля вістря позитивні йони рухаються і захоплюють за собою молекули повітря, утворюючи «електричний вітер». Якщо біля вістря розмістити полум'я свічки, то воно під дією «вітру» буде відхилятися.

### § 3.

## ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ. РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ

На кожен заряд, розміщений в електричному полі, діє сила, під дією якої він переміщується. При русі заряду електричне поле виконує певну роботу.

Роботу сил електричного поля можна розглядати як зміну потенціальної енергії, яку має кожне заряджене тіло, що перебуває в цьому електричному полі. Якщо позначити потенціальну енергію зарядженого тіла, що переміщується під дією електричних сил, у початковій і кінцевій точках траєкторії відповідно  $W_1$  і  $W_2$ , то робота сил електричного поля визначатиметься за формулою

$$A = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1).$$

Різні пробні заряди у даній точці поля матимуть різні потенціальні енергії. Водночас відношення потенціальної енергії пробних зарядів до їх значень для даної точки поля є величиною сталою.

Фізична величина, яка визначається відношенням потенціальної енергії пробного заряду, що знаходиться у даній точці електричного поля, до значення заряду, називається **потенціалом**.

Потенціал позначається літерою  $\phi$  і записується у вигляді

$$\phi = \frac{W}{q}.$$

Потенціал є скалярною величиною. Потенціали точок поля позитивно зарядженого тіла мають додатне значення, потенціали ж негативно зарядженого тіла мають від'ємне значення.

Одиницею потенціалу в СІ є 1 вольт (1 В):  $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$ .

Потенціал характеризує електричне поле у даній його точці та є його енергетичною характеристикою.

Якщо позначити потенціали точок, в яких перебував пробний заряд до і після виконання роботи силами електричного поля з його переміщення, відповідно  $\phi_1$  і  $\phi_2$  і врахувати, що  $W = \phi q$ , то можна записати

$$A = W_1 - W_2 = q(\phi_1 - \phi_2).$$

Значення цієї роботи пропорційне значенню переміщеного заряду і залежить від того, з якої в яку точку переміщується заряд.

Фізична величина  $(\phi_1 - \phi_2)$  називається різницею потенціалів і визначається відношенням роботи з переміщення пробного заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду:

$$(\phi_1 - \phi_2) = \frac{A}{q}.$$

Значення потенціальної енергії залежить від вибору початку її відліку (вибору нульового рівня потенціальної енергії). Отже, значення потенціалу залежить від вибору точки, в якій потенціал дорівнює нулю. Такою точкою у фізиці вважають точку, що знаходиться у нескінченності.

Тому **потенціал** даної точки електричного поля можна визначити як фізичну величину, що показує, яка робота виконується електричними силами під час переміщення одиничного позитивного пробного заряду із даної точки у нескінченність.

Слід зазначити, що поняття «нескінченність», де прийнято вважати  $\phi = 0$ , фізично не визначено. Тому під час знаходження потенціалу в довільній точці поля завжди допускають неточність на значення потенціалу в точці, яку вважають розміщеною у нескінченності. Іншими словами, потенціал довільної точки поля визначають завжди з точністю до адитивної сталої. Тому поняття «потенціал» у цьому розумінні дещо фізично не визначено. Більш точним й однозначним поняттям є «різниця потенціалів» як фізична величина, що визначається роботою під час переміщення пробного заряду  $q = 1 \text{ Кл}$  між точками поля з потенціалами  $\phi_1$  і  $\phi_2$ .

На практиці часто буває зручнішим вважати рівним нулю потенціал Землі. Це допустимо, оскільки при будь-яких розрахунках важливо знати різницю потенціалів між деякими точками електричного поля, а не абсолютне значення потенціалів у цих точках. Вимірюють різницю

потенціалів заземленим електрометром, порівнюючи потенціал зарядженого електрометра з потенціалом Землі.

Різницю потенціалів в електричному полі називають **напругою**.

Позначають напругу літерою  $U$ . Одиницею напруги в СІ є 1 вольт (1 В).

Враховуючи, що  $U = \frac{A}{q}$  і  $A = qEd$ , знаходимо зв'язок між напругою і напруженістю електричного поля:

$$E = \frac{U}{d}$$

Вчені домовилися проводити поверхні так, щоб різниця потенціалів для двох сусідніх поверхонь була всюди одна й та сама. Тоді за густотою еквіпотенціальних поверхонь можна зробити висновок про значення напруженості поля: чим густіше розміщені ці поверхні, тим швидше змінюється потенціал під час переміщення вздовж нормалі до поверхонь і тим більша у цьому місці напруженість  $\vec{E}$ .

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як визначити роботу сил електричного поля?
2. Дайте визначення потенціалу.
3. Яких значень може набувати потенціал?
4. Що таке різниця потенціалів в електричному полі?
5. Які одиниці напруги в системі СІ?



### Це цікаво знати

Усе життя людину оточують природні атмосферні електричні поля. Найяскравіше проявляє себе електричне поле під час грози. Тоді його напруженість біля Землі досягає 10 кіловольт на метр (кВ/м). Але і в безхмарну погоду напруженість атмосферного поля в середньому становить 130 В/м. Ми говоримо про середнє значення тому, що, як і, допустимо, сонячна активність, атмосферне електричне поле коливається циклічно, досягаючи максимуму в певні періоди. Найбільші значення припадають на 22-річний (два одинадцятирічних), річний, 27-добовий і добовий періоди. Залежить це значення і від географічного положення: максимальна сила електричного поля в помірних широтах, мінімальна — на полюсах і біля екватора. Але всі ці зміни сприймаються організмом як належне.

Внаслідок активної науково-технічної діяльності, особливо в останні десятиліття, людина привнесла свої корективи в атмосферу, що оточує нас. Рівень напруженості електричного поля зріс, і в деяких місцях став вже небезпечний для живого організму.

Особливо негативно електричне поле впливає на здоров'я людини там, де є високовольтні лінії електропередач (ЛЕП). Напруженість електричного поля безпосередньо під ЛЕП залежно, звичайно, від її конструкції, досягає іноді десятків кіловольт на метр.

На думку вчених, основний механізм біологічної дії електричного поля — поява в організмі «струмів зсуву». Так називається рух електрично заряджених частинок.

Дослідження показали, що ступінь функціональних розладів залежить від тривалості перебування людини в електричному полі. Найбільш чутлива до цього нервова систе-



ма, опосередковано можуть виникати розлади діяльності і серцево-судинної системи, зміни у складі крові.

Тому люди, які знаходяться в зоні високовольтних споруд, мають дотримуватися всіх необхідних норм безпеки.

Вченими встановлена потенційна небезпека перебування людини в електричному полі, напруженість якого перевищує 25 кВ/м. Тут можна працювати тільки із застосуванням засобів індивідуального захисту.

Безпечним є рівень напруженості електричного поля в житлових будівлях, де людина перебуває за часом необмежено багато, — 0,5 кВ/м. Для порівняння можна навести приклад: такий електро побутовий прилад, як електроковдра, створює рівень напруженості до 0,2 кВ/м. Допустимий рівень напруженості в районах житлової забудови становить 1 кВ. А ось у місцях, маповідвідуваних людьми (незабудовані території, сільськогосподарські угіддя), безпечний рівень встановлений до 15 кВ/м, у важкодоступних, практично непрохідних місцях — 20 кВ/м.

Не знаючи про те, як впливає на організм електричне поле високої напруги, деякі люди в зоні ЛЕП розбивають городи, довго і часто працюють там. Це неприпустимо! Навіть професіоналам, що за службовим обов'язком здійснюють контроль і ремонт ЛЕП, дозволяється працювати не більше, ніж півтори години в день, якщо напруженість там досягає 15 кВ/м, і не більше, ніж 10 хвилин при напруженості до 20 кВ/м.

У зоні електричного поля ЛЕП небажано гуляти, кататися на лижах, особливо дітям та людям з ослабленою серцево-судинною системою. Це стосується і міських територій, через які проходять високовольтні лінії. Потрібно максимально обмежити своє перебування в подібних місцях. Ночівлі ж беззастережно виключаються.

Хотілося б застерегти аматорів-садівників, щоб вони не будували ніяких металевих будиночків, сарайчиків для зберігання інвентарю на території ЛЕП. Дотик до такої споруди, навіть якщо людина ізольована від Землі, наприклад гумовим взуттям, може завдати дуже сильне і далеко не завжди безпечне для життя ураження струмом.

#### § 4.

### ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОР. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.

Якщо ізольованому провіднику будь-якої форми, надавати послідовно заряди  $q, 2q, \dots, nq$ , збільшуючи загальний заряд, то його потенціал буде зростати.

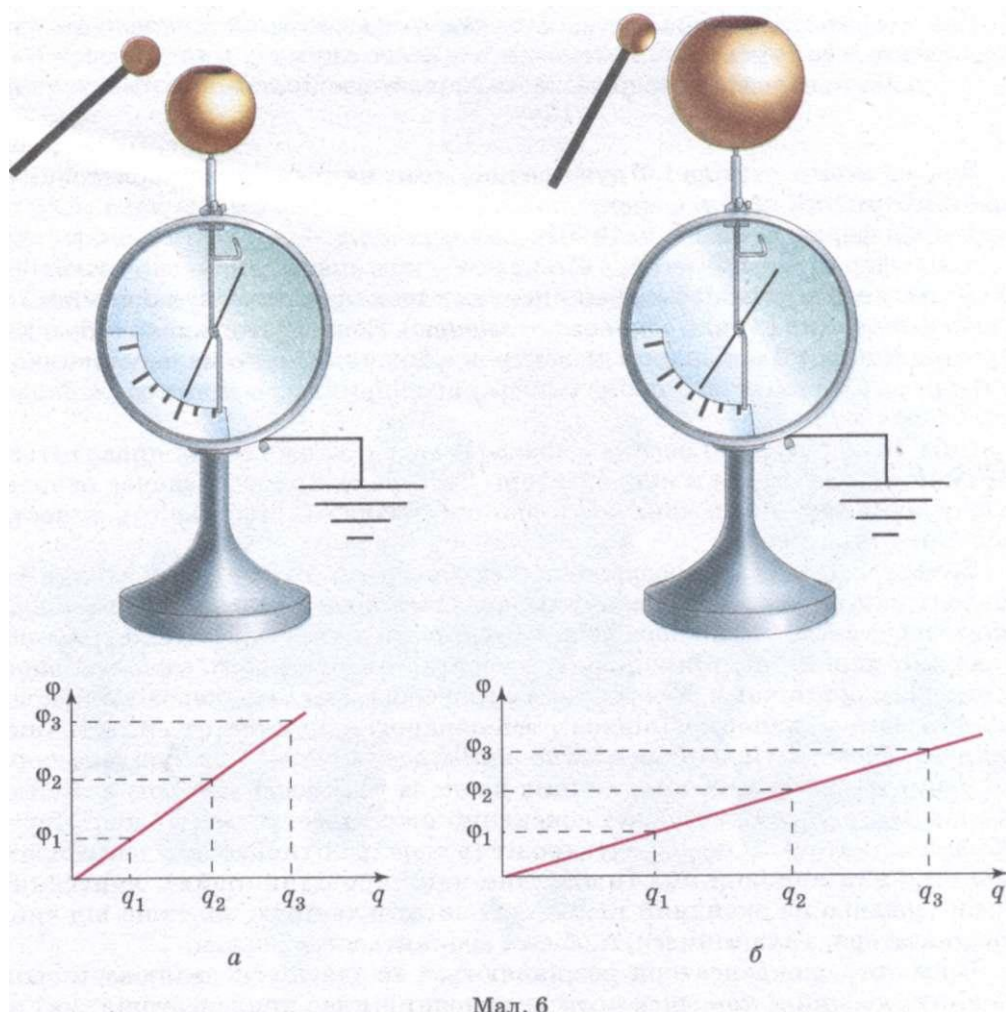
Дослідимо, від чого залежить потенціал зарядженого тіла. Для цього скористаємося двома електрометрами, корпуси яких заземлені. На стержнях електрометрів закріпимо металеві порожнисті кулі різного діаметра (мал. 6). Зарядимо металеву кульку на ізоляційній ручці від високовольтного перетворювача або електрофорної машини і почнемо вносити її у порожнину меншої за діаметром кулі (мал. 6, а), аж доки не торкнемося нею внутрішньої поверхні кулі. Весь заряд з кульки перейде на зовнішню поверхню кулі, електрометр покаже певне значення потенціалу. Проробивши аналогічний дослід з більшою кулею (мал. 6, б), ми побачимо, що стрілки обох електрометрів відхиляються, але кут відхилення у них буде різний. Знову зарядимо кульку і перенесемо порцію заряду на порожнисті кулі, їхні заряди збільшаться вдвічі, а електрометри покажуть збільшення потенціалу. Якщо будемо і далі повторювати

такі дії кілька разів, то спостерігатимемо відповідне зростання потенціалів куль. Потенціал куль буде пропорційний значенню їх заряду, що можна відобразити відповідними графіками. Але потенціал більшої кулі буде зростати повільніше, ніж меншої. Отже, графіки залежності потенціалу куль від заряду будуть різними. Проаналізувавши результати досліду та графіки (мал. 6, *a*, *б*), можна зробити висновки: потенціал кожної кулі прямо пропорційний її заряду; коефіцієнт пропорційності для різних куль має різні значення.

Отже, відношення заряду провідника до його потенціалу для різних куль буде різним. Це відношення називають *електроємністю* провідника.

**Електроємністю** провідника називають величину, яка визначається відношенням заряду провідника  $q$  до його потенціалу  $\varphi$ :

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$



Мал. 6

Проаналізувавши виконані досліди та отримане рівняння, можна сказати, що електроємність кулі більшого діаметра більша. У XVII—XVIII ст. електрику уявляли собі як аналог рідини, що може «вливатися» у провідник і «вилитися» із нього. З цих уявлень стає зрозумілим походження терміну «електроємність». Електроємність провідника залежить від його розмірів і форми, не залежить від матеріалу, агрегатного стану, форми і розмірів порожнин всередині провідника. Це пояснюється тим, що надлишок зарядів розподіляється лише на зовнішній поверхні провідника. Електроємність провідника не залежить також ні від заряду, розташованого на провіднику, ні від його потенціалу, але залежить від їх співвідношення. Сказане не суперечить формулі, оскільки вона лише показує, що потенціал провідника прямо пропорційний його заряду і обернено пропорційний до електроємності.

Одиницею електроємності є **1 фарад (1 Ф)**. Ця одиниця названа на честь англійського фізика М. Фарадея, який зробив значний внесок у вивчення електричних явищ.

**Тіло має ємність 1 фарад, якщо зі зміною його заряду на 1 кулон потенціал змінюється на 1 вольт:**

$$1\text{Ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$$

Значення ємності тіла 1 Ф дуже велике, тому на практиці використовують одиниці ємності, кратні фараду:

$$1 \text{ мікрофарад} = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф.}$$

$$1 \text{ пікофарад} = 1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Велику електроємність мають системи з двох провідників, які називають *конденсаторами* (з лат. *condense* — згущую). Конденсатор являє собою два провідники, розділені шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників. У цьому випадку провідники називають *обкладками конденсатора*.

Слід зазначити, що основна класифікація конденсаторів проводиться за типом діелектрика в конденсаторі. Тип діелектрика визначає основні електричні параметри конденсаторів: опір ізоляції, стабільність ємності, величину втрат тощо.

За видом діелектрика розрізняють: *вакуумні конденсатори* (обкладки без діелектрика знаходяться у вакуумі), *конденсатори з газоподібним і рідким діелектриком*, *конденсатори з твердим неорганічним діелектриком* (скляні, слюдяні, керамічні, тонкошарові з неорганічних плівок), *конденсатори з твердим органічним діелектриком* (паперові, металопаперові, плівкові, комбіновані — паперовоплівкові, тонкошарові з органічних синтетичних плівок), *електролітичні і оксидно-напівпровідникові*. Такі конденсатори відрізняються від усіх інших типів перш за все своєю великою ємністю. Як діелектрик використовують оксидний шар на металевому аноді. Друга обкладка (катод) — це або електроліт (в електролітичних конденсаторах) або шар напівпровідника (в оксидно-напівпровідникових), нанесений безпосередньо на оксидний шар. Анод виготовляється, залежно від типу конденсатора, з алюмінієвої, ніобієвої або танталової фольги.

Крім того, конденсатори розрізняються за здатністю змінювати свою ємність: *постійні конденсатори* — основний клас конденсаторів, які не

змінюють своєї ємності, *змінні конденсатори* — конденсатори, що можуть змінювати ємність у процесі функціонування апаратури (керування ємністю здійснюється механічно, електричною напругою (варіконди, варікапи) і температурою (термоконденсатори)), *підстроювальні конденсатори* — конденсатори, ємність яких змінюється під час разового або періодичного регулювання і не змінюється у процесі функціонування апаратури. На мал. 7 зображені конденсатори різного типу.

Найпростішим конденсатором — *плоским конденсатором* — є система із двох плоских провідних пластин, розміщених паралельно одна одній на малій порівняно з розмірами пластин відстані і розділених шаром діелектрика.

Електричне поле плоского конденсатора в основному зосереджене між пластинами (мал. 8), але біля країв пластин і у навколишньому середовищі також виникає порівняно слабе електричне поле, яке називають полем розсіювання. У багатьох задачах наближено можна нехтувати полем розсіювання і вважати, що електричне поле плоского конденсатора цілком зосереджене між його обкладками (мал. 9).

З урахуванням розмірів обкладок плоского конденсатора і відстані між ними, електроємність плоского конденсатора буде визначатися так:

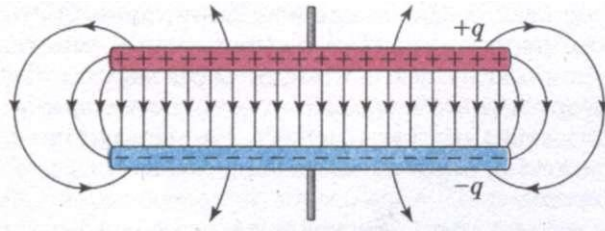
$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

де  $C$  — електроємність плоского конденсатора,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  (електрична стала),  $\epsilon$  — діелектрична проникність,  $S$  — площа обкладки конденсатора,  $d$  — відстань між обкладками конденсатора.

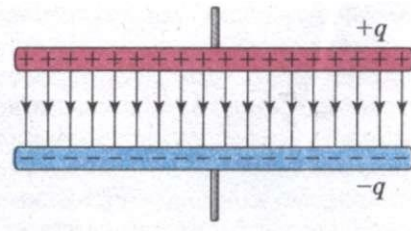
Щоб одержати потрібну електроємність, конденсатори з'єднують у батареї.



Мал. 7



Мал. 8



Мал. 9

Під час паралельного з'єднання конденсаторів (мал. 10) напруги на конденсаторах однакові:  $U_1 = U_2 = U$ , а заряди дорівнюють  $q_1 = C_1 U$  і  $q_2 = C_2 U$ . Таку систему можна розглядати як єдиний конденсатор електроємністю  $C$ , заряджений зарядом  $q = q_1 + q_2$  при напрузі між обкладками, що дорівнює  $U$ . Звідси випливає

$$C = \frac{q_1 + q_2}{U} \text{ або } C = C_1 + C_2.$$

Таким чином, під час паралельного з'єднання конденсаторів їх електроємності додаються.

Якщо конденсатори з'єднати послідовно (мал. 11), то однаковими виявляться заряди обох конденсаторів:  $q_1 = q_2 = q$ , а напруги на них дорівнюють  $U_1 = \frac{q_1}{C}$  і  $U_2 = \frac{q_2}{C}$ . Таку систему можна розглядати як єдиний конденсатор, заряджений зарядом  $q$  при напрузі між обкладками  $U_1 + U_2 = U$ . Отже,

$$C = \frac{q}{U_1 + U_2} \text{ або } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

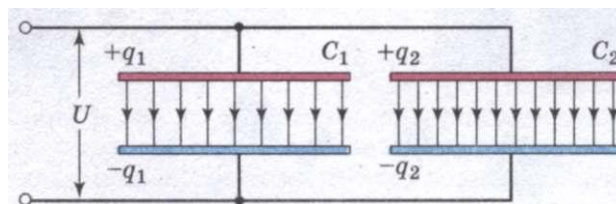
Під час послідовного з'єднання конденсаторів додаються їхні обернені електроємності.

Формули для паралельного і послідовного з'єднання залишаються справедливими для будь-якого числа конденсаторів, з'єднаних у батарею.

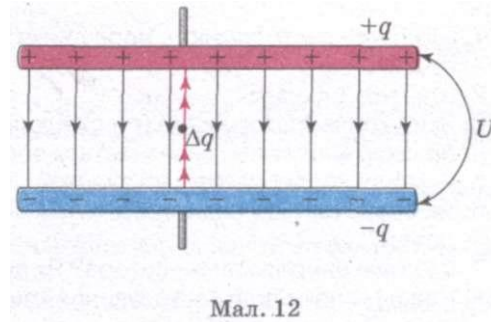
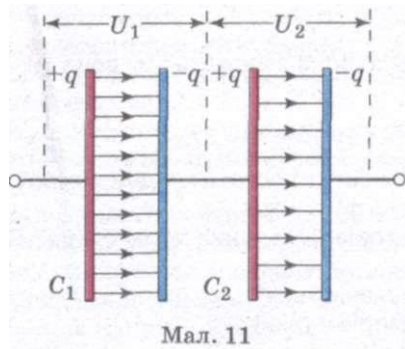
На практиці використовується також змішане з'єднання конденсаторів. Досліди показують, що заряджений конденсатор містить запас енергії.

**Енергія зарядженого конденсатора дорівнює роботі зовнішніх сил, яку необхідно затратити, щоб зарядити конденсатор.**

Процес зарядки конденсатора можна уявити як послідовне перенесення досить малих порцій заряду  $\Delta q > 0$  з однієї обкладки на іншу (мал. 12).



Мал. 10



У цей же час одна обкладка поступово заряджається позитивним зарядом, а інша — негативним. Оскільки кожна порція переноситься в умовах, коли на обкладках вже є деякий заряд  $q$  а між ними існує деяка різниця потенціалів  $U = \frac{q}{C}$ , то при перенесенні кожної порції  $\Delta q$  зовнішні сили повинні виконати роботу  $\Delta A = U \Delta q = \frac{q \Delta q}{C}$ .

Після закінчення процесу зарядки енергія  $W_e$  конденсатора ємністю  $C$ , зарядженого зарядом  $q$ , визначиться за формулою

$$W_e = A = \frac{q^2}{2C}.$$

Якщо врахувати співвідношення  $q = CU$ , то формулу, яка виражає енергію зарядженого конденсатора, можна записати в іншій еквівалентній формі:

$$W_e = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}.$$

Електричну енергію  $W_e$  слід розглядати як потенціальну енергію, що накопичилася в зарядженому конденсаторі.

Конденсатори знаходять своє застосування в усіх галузях електротехніки. Вони використовуються для побудови різних електричних кіл з частотно-залежними властивостями, зокрема, фільтрів, кіл зворотного зв'язку, коливальних контурів тощо.

Під час швидкого розрядження конденсатора можна отримати імпульс великої потужності, наприклад, у фотоспалахах, електромагнітних прискорювачах, імпульсних лазерах з оптичною накачкою.

Якщо конденсатор може довгий час зберігати заряд, то його можна використовувати як елемент пам'яті або пристрій зберігання електричної енергії.

Конденсатори використовуються як вимірювальні перетворювачі, а саме: у вимірювальному перетворювачі малих переміщень (мала зміна відстані між обкладками дуже помітно впливає на ємність конденсатора), у вимірювальному перетворювачі вологості повітря, деревини (зміна складу діелектрика приводить до зміни ємності).

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке електроємність провідника? Від чого вона залежить? Як вона визначається?
2. Що таке 1 фарад?
3. Який конденсатор називається плоским?
4. За якою формулою визначається електроємність плоского конденсатора?
5. Які види конденсаторів ви знаєте?
6. Як визначається електроємність конденсаторів, з'єднаних паралельно? Послідовно?
7. Що таке енергія конденсатора? Як вона визначається?
8. Наведіть приклади застосування конденсаторів у техніці.

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. В однорідному електростатичному полі на однаковій відстані від двох пластин розміщені електрон і протон. Чи з однаковою швидкістю вони досягнуть пластин?

Розв'язання

Більшу швидкість матиме електрон, тому що внаслідок меншої маси він набуває значно більшого прискорення.

2. Позитивну обкладку конденсатора електроємністю  $C_1 = 1$  мкФ з'єднали з позитивною обкладкою конденсатора, електроємність якого  $C_2 = 2$  мкФ, а негативну — з негативною. Визначте різницю потенціалів  $U$  на затискачах такої батареї конденсаторів, якщо до з'єднання напруга на першому конденсаторі була  $U_1 = 300$  В, а на другому  $U_2 = 150$  В.

Розв'язання

Заряд першого конденсатора дорівнював до з'єднання  $q_1 = C_1 U_1$ , а після з'єднання  $q_{1к} = C_1 U$ . Відповідно заряд другого конденсатора  $q_{2к}$  був до з'єднання  $q_2 = C_2 U_2$ , а після з'єднання  $q_{2к} = C_2 U$ . Оскільки з'єднано однойменно заряджені обкладки, то за законом збереження заряду  $q_{1к} + q_{2к} = q_1 + q_2$ .

$$\text{Звідси } U = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2}.$$

Підставивши значення фізичних величин, отримаємо  $U = 200$  В.

#### Рівень А

1. Чому лінії напруженості електричного поля не перетинаються?
2. Зобразіть картину ліній напруженості електричного поля між двома зарядами у випадках: а)  $q_1 - q$ ; б)  $q_1 q$ ; в)  $q_1 2q$ .
3. Заряд  $0,1$  мкКл перебуває в електричному полі у точці напруженістю  $5$  Н/Кл. Яка сила діє на цей заряд?
4. У деякій точці поля на заряд  $2$  нКл діє сила  $0,4$  мкН. Визначте напруженість поля у цій точці.
5. Яке значення точкового заряду, на який однорідне електричне поле напруженістю  $600$  кН/Кл діє із силою  $0,3$  мН?
6. Визначте напруженість поля заряду  $36$  нКл у точках, віддалених від нього на  $9$  і  $18$  см.
7. На якій відстані від заряду  $1 \cdot 10^{-8}$  Кл напруженість поля дорівнює  $300$  Н/Кл?

8. Визначте заряд, що створює електричне поле, якщо на відстані 5 см від заряду напруженість поля становить  $1,5 \cdot 10^5$  Н/Кл.
9. Ємність конденсатора дорівнює 40 пФ. Виразіть цю ємність у фарадах та мікрофарадах.
10. Відокремленому провіднику надали заряд  $1 \cdot 10^{-9}$  Кл, зарядивши його до потенціалу 100 В. Визначте електроємність провідника у фарадах, мікрофарадах і пікофарадах.
11. На конденсаторі написано: 100 пФ; 300 В. Чи можна використати цей конденсатор для накопичення заряду 50 нКл?
12. Яку ємність має конденсатор, якщо під час його заряджання до напруги 1,4 кВ він дістав заряд 28 нКл?
13. До якої напруги зарядили конденсатор ємністю 20 мкФ, якщо він дістав заряд 4 мКл?
14. Найбільша ємність шкільної демонстраційної батареї конденсаторів 58 мкФ. Який заряд вона накопичить, якщо її приєднати до полюсів джерела струму напругою 50 В?
15. Як зміниться електроємність шкільного розсувного конденсатора, якщо збільшити відстань між його пластинами?
16. Площа пластин слюдяного конденсатора  $15 \text{ см}^2$ , а відстань між пластинами 0,02 см. Яку ємність має конденсатор?
17. Пластини конденсатора мають площу по  $10 \text{ см}^2$ . Яка товщина діелектрика (слюди) між ними, коли ємність конденсатора становить 500 пФ?
18. Визначте енергію конденсатора, якщо його ємність 0,25 мкФ, а різниця потенціалів між пластинами 400 В. Який заряд має конденсатор?
19. Ємність конденсатора 6 мкФ, а заряд  $3 \cdot 10^{-4}$  Кл. Визначте енергію електричного поля конденсатора.
20. Заряд конденсатора  $3,2 \cdot 10^{-8}$  Кл, напруга на обкладках 500 В. Визначте енергію електричного поля конденсатора.

**Рівень В**

21. Визначте напруженість електричного поля в точці, віддаленій на відстань 10 см від точкового заряду, якщо в точці, віддаленій від нього на 5 см, напруженість дорівнює 40 В/м.
22. Відстань між двома точковими зарядами  $+1 \cdot 10^{-7}$  і  $-5 \cdot 10^{-8}$  Кл дорівнює 10 см. Яка напруженість поля, створеного цими зарядами, у точці, що знаходиться посередині між ними?
23. Негативний заряд -30 нКл і позитивний заряд 20 нКл знаходяться на відстані 1 м один від одного. В якій точці напруженість електричного поля дорівнює нулю?
24. Два однакові точкові заряди по 3 нКл кожний розміщені на відстані 6 см один від одного. Визначте напруженість поля у точці, що перебуває на відстані 5 см від кожного із зарядів.
25. Напруженість поля між двома горизонтально розміщеними пластинами дорівнює  $6 \cdot 10^3$  Н/Кл. У полі цих пластин зависла заряджена пилінка масою  $3 \cdot 10^{-8}$  г. Який заряд пилінки?
26. Наблизьте палець до кульки зарядженого електроскопа. Листочки зійдуться. Заберіть палець — і листочки знову розійдуться. Як пояснити це явище?
27. Конденсатор невідомої ємності  $C$  зарядили до напруги 100 В. Потім його з'єднали паралельно із незарядженим конденсатором ємністю 5 мкФ. При цьому напруга на першому конденсаторі зменшилась на 25 В. Визначте ємність  $C$ .
28. З якою силою взаємодіють пластини плоского конденсатора площею  $100 \text{ см}^2$ , якщо різниця потенціалів між ними 500 В, а відстань 3 мм?



29. Плоский конденсатор, відстань між пластинами якого 1 см, заряджено до напруги 200 В. Якою буде напруга на конденсаторі, якщо його пластини розсунути до 10 см?
30. Визначте заряд плоского конденсатора ємністю 0,04 мкФ, якщо напруженість поля в конденсаторі 320 В/см, а відстань між пластинами 2 мм.
31. У скільки разів зміниться енергія конденсатора, якщо напругу на ньому збільшити в 4 рази?
32. Площа кожної з пластин плоского конденсатора становить 200 см<sup>2</sup>, а відстань між ними дорівнює 1 см. Визначте енергію поля, якщо напруженість 500 кВ/м.
33. Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо між його пластинами розмістити провідну пластинку, товщиною якої можна знехтувати? Як буде впливати на ємність конденсатора місце розташування розміщеної пластинки? Чи буде впливати на зміну ємності товщина розміщеної пластинки?
34. Пластини плоского повітряного конденсатора площею 5 притягуються із силою  $P$ . Визначте заряд конденсатора.
35. Плоский повітряний конденсатор із площею пластин  $S$  і відстанню між пластинами  $d$  заряджено до напруги  $U$ , після чого від'єднано від джерела. Яку роботу треба виконати, щоб розсунути пластини до відстані  $c$ ?

## § 5.

### ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО. З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що електричним струмом називають упорядкований (напрявлений) рух заряджених частинок. Електричний струм виникає, коли впорядковано переміщуються вільні електрони у металі або йони в електролітах і т.д. Але, якщо переміщати нейтральне в цілому тіло, то, незважаючи на впорядкований рух величезної кількості електронів і атомних ядер, електричний струм не виникає. Повний заряд, який переноситься через будь-який переріз провідника, дорівнюватиме нулю, бо заряди різних знаків переміщуються з однаковою середньою швидкістю.

Електричний струм має певний напрям. *За напрям струму беруть напрям руху позитивно заряджених частинок.* Якщо струм утворився рухом негативно заряджених частинок, то напрям струму вважають протилежним напрямку руху частинок. Розрізняють постійний і змінний струми. При постійному струмі через провідник у будь-якій його ділянці з часом протікає однаковий за значенням заряд і в одному напрямі. Для існування електричного струму в певному середовищі повинні виконуватися такі умови: 1) наявність вільних носіїв заряду (електронів, йонів тощо); 2) наявність у середовищі причин, внаслідок яких вільні заряджені частинки переміщуються в певному напрямі, наприклад, наявність електричного поля; 3) наявність замкненого кола.

Струм, якщо він існує, обов'язково призводить або до виникнення магнітного поля, або до нагрівання провідника, або до зміни його структури.

Ви вже знаєте, що будь-який заряджений провідник має певний потенціал і в усіх точках його поверхні цей потенціал однаковий. *Коли ж у провіднику існує струм, то потенціал у його різних точках не буде однаковим — він зменшується (спадає) у напрямі струму.*

У провідниках майже завжди потрібно підтримувати струм протягом тривалого часу, тобто на їхніх кінцях різниця потенціалів не повинна зменшуватись. Пристрої, в яких відбувається розділення заряджених частинок, за рахунок чого і підтримується необхідна різниця потенціалів, називаються *джерелами струму*. Сили, які діють у джерелі струму, переносять заряд від точок з меншим потенціалом до точок з більшим потенціалом, виконуючи у цей час роботу. Отже, джерело струму є джерелом енергії. Напругу на кінцях джерела (різницю потенціалів) ще називають енергетичною характеристикою струму. У гальванічних елементах і акумуляторах в електричну енергію перетворюється енергія хімічних взаємодій, у термогенераторах — теплова енергія тощо.

Електричні кола, в яких підтримується струм і використовуються його властивості, складаються з джерела струму, споживачів (нагрівники, освітлювальні прилади, електродвигуни тощо), вимірювальних і регулювальних приладів, вимикачів та інших елементів, з'єднаних провідниками.

Кількісною характеристикою електричного струму є його сила / і густина  $j$ . **Силою струму називається величина, що характеризує швидкість перенесення заряду частинками, які створюють струм, через поперечний переріз провідника.**

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

де  $\Delta q$  — заряд, що переноситься вільними носіями заряду через поперечний переріз провідника,  $\Delta t$  — інтервал часу перенесення заряду. Вона вказує, скільки заряджених частинок пройшло через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

**Густина струму** — векторна фізична величина, її модуль визначається відношенням сили струму  $I$  до площі поперечного перерізу провідника  $S$ :

$$j = \frac{I}{S}$$

При рівномірному розподілі густини струму по поперечному перерізу провідника сила струму буде визначатися так:

$$I = jS = q_0 n v S,$$

де  $q_0$  — заряд частинки,  $n$  — кількість частинок в одиниці об'єму,  $v$  — середня швидкість напрямленого руху частинок,  $S$  — площа поперечного перерізу провідника.

Для створення й існування електричного струму необхідна наявність вільних заряджених частинок (носіїв струму) — позитивно або негативно заряджених частинок, не зв'язаних в єдину електрично нейтральну систему, і сили, що створює і підтримує їх упорядкований рух. Як правило, такою силою є сила з боку електричного поля всередині провідника, яке визначається електричною напругою на кінцях провідника.

Для того, щоб струм був тривалим, енергія електричного поля повинна весь час поповнюватися, тобто, потрібен такий пристрій, в якому певний вид енергії безперервно перетворюється на енергію електричного поля. Такий пристрій називається джерелом електрорушійної сили або джерелом струму.

Для отримання електричного струму необхідно створити електричне коло, яке складається з джерела струму, споживачів електричної енергії,

вимірювальних і регульовальних приладів, вимикачів та інших елементів, з'єднаних провідниками. Коло повинно бути замкнене.

З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що сила струму на ділянці кола прямо пропорційна прикладеній напрузі і обернено пропорційна до опору цієї ділянки:  $I = \frac{U}{R}$ . Нагадаємо, що опір характеризує здатність провідника

протидіяти напрямленому руху заряджених частинок. Вперше цю залежність сили струму від напруги й опору у 1827 р. встановив німецький вчений Г. Ом. На його честь її називають законом Ома для ділянки кола. Іноді формулу для закону Ома записують так:

$$U = IR.$$

Добуток  $IV$  називають *спадом напруги* на даній ділянці кола. Якщо вона не містить джерела струму, то поняття напруги і спаду напруги збігаються.

Електрична енергія від джерела струму передається по проводах споживачам: електродвигунам, лампам, нагрівальним приладам, телевізорам, радіоприймачам тощо. За допомогою з'єднувальних провідників і вимикачів у електричне коло часто вмикають також вимірювальні прилади: амперметри, вольтметри, омметри, ватметри, лічильники електричної енергії тощо.

Найпоширенішими і найпростішими типами з'єднання провідників є *послідовне* і *паралельне* з'єднання.

При послідовному з'єднанні електричне коло не має розгалужень. Усі провідники ввімкнено в коло по черзі, один за одним. На мал. 13 показано послідовне з'єднання двох провідників, опори яких  $R_1$  і  $R_2$  (наприклад, з двома лампочками, двома обмотками електродвигуна тощо).

Сила струму в обох провідниках однакова:

$$I_1 = I_2 = I,$$

оскільки в провідниках під час проходження постійного струму електричний заряд не накопичується, і через будь-який переріз провідника за певний інтервал часу проходить один і той самий заряд.

Напруга (або різниця потенціалів) на кінцях розглядуваної ділянки кола складається з напруг на першому і другому провідниках:

$$U = U_1 + U_2.$$

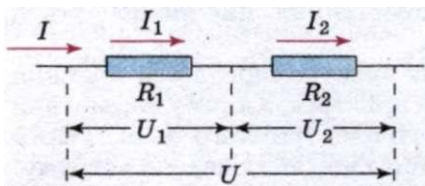
Застосувавши закон Ома для всієї ділянки в цілому і для ділянок з опором  $R_1$  і  $R_2$ , можна довести, що повний опір послідовному з'єднанні такий:

$$R = R_1 + R_2.$$

Аналогічна формула застосовна для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників.

Напруги на провідниках і їхні опори в разі послідовного з'єднання зв'язані співвідношенням:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$



Мал. 13

На мал. 14 показано паралельне з'єднання двох провідників, опори яких  $R_1$  і  $R_2$ . У цьому випадку електричний струм  $I$  розгалужується на дві частини. Силу струму в першому і другому провідниках

позначимо  $I_1$  і  $I_2$ . Оскільки в точці  $A$  — розгалуженні провідників (таку точку називають вузлом) — електричний заряд не накопичується, то заряд, що надходить за одиницю часу у вузол, дорівнює заряду, що виходить з вузла за той самий час. Отже,

$$I = I_1 + I_2.$$

Напруга  $U$  на провідниках, з'єднаних паралельно, одна і та сама.

В освітлювальній мережі підтримується напруга 220 В. На цю напругу розраховані прилади, що використовують електричну енергію. Тому паралельне з'єднання — найпоширеніший спосіб з'єднання різних споживачів. У цьому випадку вихід з ладу одного приладу не впливає на роботу інших, тоді як при послідовному з'єднанні вихід з ладу одного приладу розмикає все коло.

Застосовуючи закон Ома для ділянок з опорами  $R_1$  і  $R_2$ , можна довести, що величина, обернена до повного опору ділянки  $AB$ , дорівнює сумі величин, обернених до опорів окремих провідників:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Звідси

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

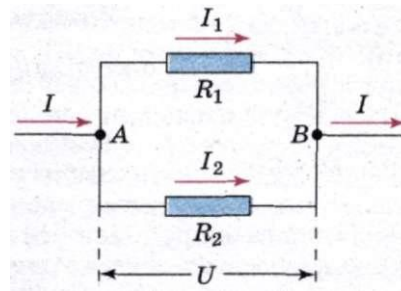
Вказані формули можна застосувати до паралельного з'єднання будь-якої кількості провідників.

Сили струму в провідниках і їхні опори у випадку паралельного з'єднання зв'язані співвідношенням:

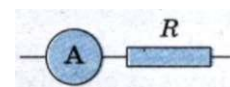
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

На практиці, щоб виміряти силу струму в провіднику, амперметр вмикають послідовно цьому провіднику (мал. 15). Але треба мати на увазі, що сам амперметр має деякий опір  $R_a$ . Тому опір ділянки кола з увімкнутим амперметром збільшується, і при незмінній напрузі сила струму зменшується згідно із законом Ома. Щоб амперметр якомога менше впливав на силу струму, який вимірюють, його опір роблять дуже малим. Це слід пам'ятати і ніколи не намагатися «виміряти силу струму» в освітлювальній мережі, вмикаючи амперметр у розетку. Станеться коротке замикання. Сила струму при малому опорі приладу досягне такого великого значення, що обмотка амперметра згорить.

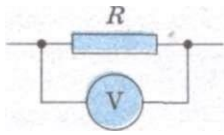
Щоб виміряти напругу на ділянці кола з опором  $i$ ?, до нього паралельно вмикають вольтметр. Напруга на вольтметрі збігатиметься з напругою на ділянці кола (мал. 16).



Мал. 14



Мал. 15



Мал. 16

Якщо опір вольтметра  $R_v$ , то після його вмикання в коло опір ділянки вже буде не  $R$ , а  $R = \frac{RR_v}{R+R_v} < R$ .

Тому напруга, яку вимірюють на ділянці кола, зменшиться. Щоб вольтметр помітно не спотворював вимірюваної напруги, його опір має бути набагато більшим порівняно з опором ділянки кола, на якій вимірюється напруга. Вольтметр можна вмикати в коло, не ризикуючи, що він згорить, якщо він розрахований на напругу, яка перевищує напругу в мережі.

### 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке електричний струм? Який його напрям?
2. Які є види електричного струму?
3. По чому можна судити про наявність струму в провіднику?
4. Як визначається сила струму, що тече через поперечний переріз провідника?
5. Назвіть умови створення й існування електричного струму в колі.
6. Запишіть закони послідовного і паралельного з'єднання провідників.
7. Чому опір амперметра має бути малим, а опір вольтметра — великим?

## §6. РОБОТА ТА ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

При впорядкованому русі заряджених частинок у провіднику електричне поле виконує роботу. Цю роботу прийнято називати **роботою струму**.

Якщо розглядати довільну ділянку електричного кола — однорідний провідник: нитку лампи розжарення, резистор, обмотку електродвигуна тощо, то можна з'ясувати, що за інтервал часу  $\Delta t$  через поперечний переріз провідника  $S$  проходить заряд  $\Delta q$ . Тоді електричне поле виконує роботу  $A = \Delta q U$ . Оскільки сила струму  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ , то ця робота визначається за формулою:

$$A = IU\Delta t,$$

де  $I$  — сила струму в колі;  $U$  — напруга на ділянці кола;  $\Delta t$  — інтервал часу, протягом якого виконувалася робота.

**Робота електричного струму на ділянці кола визначається добутком сили струму, напруги та інтервалу часу, протягом якого ця робота виконувалася.**

Згідно із законом збереження енергії ця робота має дорівнювати зміні енергії розглядуваної ділянки кола. Тому енергія, яка виділяється на даній ділянці кола за інтервал часу  $\Delta t$ , дорівнює роботі електричного струму:  $A = IU\Delta t$ .

Якщо на ділянці кола не виконується механічна робота і струм не чинить хімічних дій, відбувається тільки нагрівання провідника, який віддає теплоту навколишньому середовищу.

Як же це відбувається? Відомо, якщо електрон потрапляє в електричне поле, то він починає рухатися з прискоренням. Після зіткнення з йонами кристалічної ґратки електрони передають йонам свою енергію, і внаслідок цього енергія хаотичного руху йонів біля положень рівноваги зростає. Це свідчить про збільшення внутрішньої енергії провідника, температура якого підвищується, і він починає передавати теплоту навколишнім тілам. Через невеликий інтервал часу після замикання кола процес установлюється і температура з часом перестає змінюватися. До провідника за рахунок роботи електричного поля безперервно надходить енергія, його внутрішня енергія залишається незмінною, оскільки провідник передає навколишнім тілам кількість теплоти, яка дорівнює роботі електричного струму. Отже, співвідношення  $A = IU\Delta t$  для роботи струму у випадку однорідного провідника визначає кількість теплоти, що передається провідником іншим тілам.

Якщо у формулі  $A = IU\Delta t$  напругу записати через силу струму або силу струму через напругу, скориставшись законом Ома для ділянки кола, то отримаємо три еквівалентні формули для роботи електричного струму:

$$A = IU\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = Q.$$

Формулу  $A = I^2 R \Delta t$  зручно використовувати для кола з послідовним з'єднанням провідників, тому що сила струму в усіх провідниках однакова.

При паралельному з'єднанні краще використовувати формулу  $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$ , тому що напруга на всіх провідниках однакова.

Закон, що визначає кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом у навколишнє середовище, вперше експериментально встановили англійський учений Дж. Джоуль і російський учений Е. Х. Ленц, тому він і отримав назву — закон Джоуля—Ленца:

кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом, визначається добутком квадрата сили струму, опору провідника та інтервалу часу проходження струму по провіднику:

$$Q = I^2 R \Delta t,$$

де  $Q$  — кількість теплоти, що виділилася у провіднику;  $I$  — сила струму в провіднику;  $R$  — електричний опір провідника;  $\Delta t$  — інтервал часу проходження струму по провіднику.

Закон Джоуля—Ленца виведено із закону збереження енергії. Формула  $A = I^2 R \Delta t$  дає змогу визначити кількість теплоти, що виділяється на будь-якій ділянці електричного кола, яке складається з будь-яких провідників.

Будь-який споживач електричного струму (лампочка, електродвигун, електродзвінок тощо) розрахований на використання певної енергії за одиницю часу. Тому разом з роботою струму важливе значення має поняття *потужності електричного струму*.

Потужність електричного струму визначається відношенням роботи струму за інтервал часу  $\Delta t$  до цього інтервалу часу:

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

Цей вираз для потужності можна подати в кількох еквівалентних формах, використовуючи закон Ома для ділянки кола:

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

Для більшості електроприладів зазначено потужність, яку вони споживають, на корпусі або в технічних паспортах.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають роботою електричного струму? За якими формулами вона визначається?
2. Як зв'язана робота електричного струму з потужністю споживача струму?
3. Як можна визначити потужність струму?

## § 7.

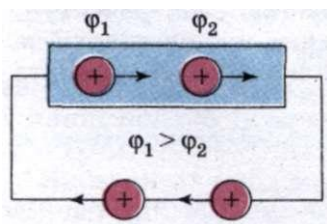
### ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА

Якщо у провіднику існує електричне поле, але не створені умови для його підтримки, то переміщення носіїв струму (електронів, йонів) за короткий час призведе до того, що поле всередині провідника зникне і струм припиниться.

Як вам уже відомо, за напрям струму взято напрям руху позитивно заряджених носіїв. Вони рухаються в напрямі напруженості поля в провіднику, тобто в бік зменшення потенціалу.

Переміщення носіїв струму в провіднику без підтримки електричного поля приводить до вирівнювання потенціалів уздовж провідників. Тому для того, щоб підтримувати струм тривалий час, треба від кінця провідника з меншим потенціалом (носії струму вважаються позитивно зарядженими) безперервно відводити заряди, які приносяться до цього кінця провідника струмом, а до кінця з більшим потенціалом безперервно їх підводити. Іншими словами, необхідно здійснити кругообіг зарядів, щоб вони рухалися замкненим контуром (мал. 17).

Здійснити такий рух носіїв струму тільки за наявності електростатичного поля не можна. Адже рух позитивно заряджених носіїв струму від кінця провідника з меншим потенціалом до кінця провідника з більшим потенціалом відбувається проти дії кулонівських сил — сил електростатичного поля. Отже, у замкненому колі повинні бути ділянки, де перенесення позитивних зарядів відбувається



Мал. 17

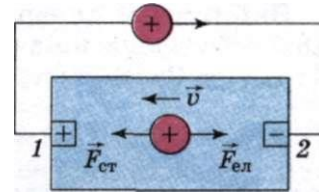
проти сил електростатичного поля. Переміщення носіїв заряду на цих ділянках можливе лише за допомогою сил неелектростатичного походження, які мають назву — *сторонні сили*.

Таким чином, для підтримки струму потрібні сторонні сили, що діють або в усьому колі, або на окремих його ділянках. Ці сили можуть бути обумовлені хімічними процесами, дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі або через межу між двома різнорідними речовинами, електричними

або неелектростатичними полями, які породжуються змінними у часі магнітними полями.

Сторонні сили можна охарактеризувати роботою, яку вони виконують над зарядами, що переміщуються по колу.

Величина, яка визначається роботою сторонніх сил над одиничним позитивним зарядом, називається **електрорушійною силою (ЕРС)**, що діє в колі або на його ділянці.



Мал. 18

Позначається ЕРС літерою  $\mathcal{E}$ . Тоді  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$ . Одиницею ЕРС у СІ є 1 вольт

$$(1 \text{ В}): 1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$$

У визначенні ЕРС можна говорити про ту ділянку кола, де діють сторонні сили, а також можна говорити про все замкнене коло. Ці визначення еквівалентні.

Дійсно, під час руху зарядів між полюсами джерела у зовнішньому колі роботу виконують тільки електростатичні сили  $\vec{F}_{\text{ел}}$ . У внутрішній частині кола роботу виконують як електростатичні, так і сторонні сили  $\vec{F}_{\text{ст}}$  (мал. 18). При цьому робота електростатичних сил  $A^{1/2}$  у зовнішньому колі дорівнює роботі електростатичних сил  $A_{2,1}$  між тими самими полюсами всередині джерела, взятої з протилежним знаком:  $A_{1,2} = -A_{2,1}$ . Повна робота у всьому колі складається із суми робіт електростатичних сил у зовнішній ділянці кола і сил у внутрішній ділянці. Остання складається з роботи електростатичних сил  $A_{2,1}$  і роботи сторонніх сил  $A_{\text{ст}}$ :  $A = A_{1,2} + A_{2,1} + A_{\text{ст}} = A_{\text{ст}}$ .

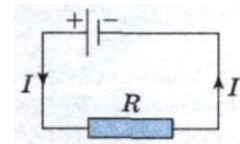
Повна робота всіх сил у повному колі дорівнює роботі тільки сторонніх сил, де вони діють.

Сила струму, напруга і ЕРС — величини скалярні. Вони можуть бути як позитивними, так і негативними, залежно від вибору напрямку обходу контуру зі струмом. У випадку збігу напрямку струму з вибраним позитивним напрямком обходу кола сила струму є позитивною (мал. 19). ЕРС джерела позитивна, якщо з вибраним напрямком обходу контуру збігається напрям сторонніх сил у джерелі.

ЕРС зосереджена тільки всередині джерела, а її значення не залежить від сили струму в колі.

Розглянемо найпростіше повне або замкнене коло, яке складається з джерела струму (гальванічного елемента або акумулятора, або генератора струму), споживача струму — резистора опором  $r$  (мал. 19). Будь-яке джерело струму має ЕРС  $\mathcal{E}$  і опір, який називають *внутрішнім опором* на відміну від зовнішнього опору  $R$  кола. У гальванічних елементах  $r$  — це опір розчинів електродів і електродів, у генераторах струму — опір обмоток.

Покажемо зв'язок сили струму в колі  $I$ , ЕРС  $\mathcal{E}$  і повного опору  $R + r$  кола. Для цього скористаємося законом збереження енергії і законом Джоуля—Ленца:  $Q = I^2 R \Delta t$ .





Нехай за час  $\Delta t$  через поперечний переріз провідника пройде заряд  $\Delta q$ . Тоді роботу сторонніх сил з переміщення заряду  $\Delta q$  можна визначити так:  $A_{\text{ст}} = \mathcal{E} \Delta q$ . Скориставшись визначенням сили струму  $\Delta q = I \Delta t$ , отримаємо

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t.$$

За рахунок цієї роботи у внутрішній і зовнішній ділянках кола, опори яких  $r$  і  $R$ , виділяється кількість теплоти, яка за законом Джоуля—Ленца дорівнює

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t.$$

Згідно із законом збереження енергії  $A = Q$ . Прирівнявши рівняння  $A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t$  і  $Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t$ , отримаємо

$$\mathcal{E} = IR + Ir.$$

Добуток сили струму і опору ділянки кола  $IR$  називають *спадом напруги на цій ділянці*. Таким чином, ЕРС  $\mathcal{E}$  дорівнює сумі спадів напруг у внутрішній і зовнішній ділянках повного кола.

У замкненому колі постійного струму сума спадів напруг у зовнішній і внутрішній ділянці кола є величиною сталою і дорівнює ЕРС джерела струму.

Перепишемо вираз  $\mathcal{E} = IR + Ir$  в іншому вигляді:

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

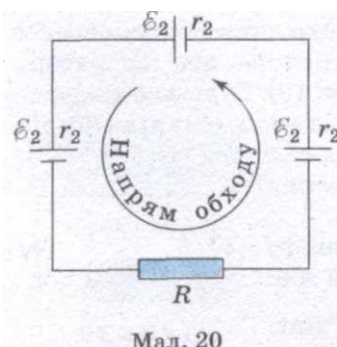
**Сила струму в повному колі визначається відношенням ЕРС кола до його повного опору.**

Цей закон отримав назву — закон Ома для повного кола.

Таким чином, сила струму в повному колі залежить від трьох величин: ЕРС  $\mathcal{E}$ , опору її зовнішньої і опору  $r$  внутрішньої ділянок кола. Внутрішній опір джерела струму не впливає помітно на силу струму, якщо він дуже малий порівняно з опором зовнішньої частини кола ( $R \gg r$ ). При цьому напруга на затискачах джерела приблизно дорівнює ЕРС  $\mathcal{E}$ :  $U = IR \approx \mathcal{E}$ .

Проте під час короткого замикання ( $R \rightarrow 0$ ) сила струму в колі визначається саме внутрішнім опором джерела і може досягти при ЕРС  $\mathcal{E}$  у кілька вольтів великого значення, якщо опір малий (наприклад,  $r \approx 0,1 - 0,001$  Ом). Провідники при цьому плавляться, а джерело виходить з ладу.

Якщо коло містить кілька послідовно з'єднаних елементів, ЕРС яких  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \dots, \mathcal{E}_n$ , то повна ЕРС  $\mathcal{E}$  кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС окремих елементів. Для визначення знака ЕРС  $\mathcal{E}$  будь-якого джерела струму треба спочатку вибрати додатний напрям обходу контуру. На мал. 20 додатним вважається напрям обходу проти руху стрілки годинника.



Мал. 20

Якщо при обході кола переходять від негативного полюса джерела до позитивного, то ЕРС  $\mathcal{E} > 0$ . Сторонні сили всередині джерела виконують при цьому додатну роботу. Якщо ж при обході кола переходять від позитивного полюса джерела до негативного, то ЕРС  $\mathcal{E} < 0$ . Сторонні сили всередині джерела виконують від'ємну роботу. Для кола, зображеного на мал. 20, при обході контуру проти

руху стрілки годинника:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| + |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

Якщо  $\mathcal{E} > 0$ , то згідно з  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$  сила струму  $I > 0$ , тобто напрям струму

збігається з напрямом обходу контура. При  $\mathcal{E} < 0$ , навпаки, напрям струму протилежний напрямку обходу контура. Повний опір кола  $R_{\text{п}}$  дорівнює сумі всіх опорів:

$$R_{\text{п}} = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що прийнято за напрям руху струму?
2. Які сили називаються сторонніми?
3. Чим можуть бути обумовлені сторонні сили?
4. Що таке електрорушійна сила?
5. Чому дорівнює повна робота всіх сил у повному колі?
6. Від чого не залежить ЕРС і де вона зосереджена?
7. Що називають спадом напруги у ділянці кола?
8. Сформулюйте закон Ома для повного кола.
9. Від чого залежить знак ЕРС  $\mathcal{E}$  у законі Ома для повного кола?
10. Чому дорівнює повний опір замкненого кола?



### Це цікаво знати

До сорока років свого життя **Георг Ом** (він народився 16 березня 1789 року) встиг об'їхати багато міст Німеччини. Весь південний захід — від Мюнхена до Кельна — йому був уже добре відомий.

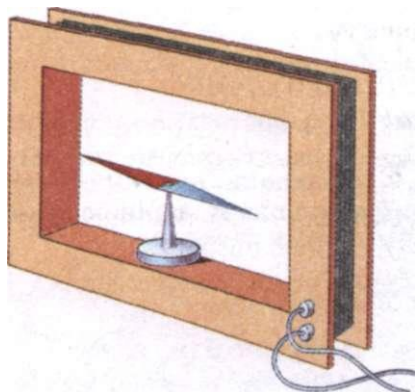
Але Георг Ом не був багатим туристом. Він подорожував з нужди, шукаючи роботу. Будучи сином слюсаря, через нестатки він залишив навчання у вищій школі і взявся за викладацьку роботу. Георг Ом любив фізику і математику, а повинен був викладати в гімназіях грецьку і латинську мови. Лише на дозвіллі він міг цілком віддати себе улюбленим заняттям з фізики.

Ом знав про найновіші відкриття Ерстеда і Ампера. «Як уявити собі електричний струм?» — це було перше питання, на яке протягом кількох років намагався дати ясну відповідь уже немолодий фізик-аматор.

Учителюючи в Кельні, він любив відігнати втому прогулянкою вздовж Рейна. І, хто знає, може, тут, на берегах цієї ріки, Георг Ом знайшов те, що допомогло йому відкрити великий закон.

«Що рухає води Рейна вперед, на північ — в Ессен, Голландію і Північне море? Очевидно, різниця у висоті положення початку і кінця ріки. Що ж примушує проходити по колу електричний струм? Як собі це уявити? Очевидно, один з полюсів гальванічної батареї являє собою ніби вищий рівень електричних зарядів, ніж їх рівень біля другого полюса. І тому електричний струм тече по колу, як вода в річці, від вищих місць до нижчих», — так, мабуть, міркував Ом.

Він знав, що силу водяного потоку легко виміряти. Для цього треба знати кількість води, яка протікає за секунду через поперечний переріз потоку. «А як визначити потік електрики?» — думав Ом. І він знову порівнював електричний струм із водяним потоком, користуючись законами стародавньої науки гідравліки, науки про закони руху рідин. Очевидно, виміряти кількість електрики, яка проходить за одиницю часу, тоб-



Мал. 2і

то за одну секунду, через переріз провідника, це і є визначення сили електричного струму.

Як збільшити силу електричного струму? Для цього, мабуть, треба пропустити через той самий переріз за той самий час — за секунду — більшу кількість електрики. Якби русло Рейна було крутіше, то його води неслися б значно швидше. Те саме, мабуть, відбувається і в гальванічному полі. Різниця електричних рівнів на полюсах батареї — це той напір, який є причиною руху електричного струму, і від величини цього напору залежить сила електричного струму. Назвемо цю різницю висот електричних рівнів, або цей напір, електрорушійною силою батареї.

Завдяки низці міркувань Ом установив три поняття: 1) силу струму — кількість електрики, що проходить через переріз провідника за одну секунду, 2) електрорушійну силу — напір, під яким тече електрика, 3) опір — протидію проходженню струму, що залежить від речовини, довжини, площі поперечного перерізу і фізичного стану речовини провідника.

У той час Ом жив у Берліні, обіймаючи посаду викладача математики Берлінського політехнічного інституту. Він встиг ґрунтовно ознайомитися з працями видатного фізика Фур'є, який встановив закони теплопровідності і помітив значну подібність явищ теплопровідності та електропровідності. Це прискорило відкриття Омом основного закону, названого його ім'ям.

Свої дослідження Ом проводив у лабораторії інституту, вони давалися нелегко. Справа в тому, що сила струму гальванічної батареї із незрозумілих Ому причин не лишалась постійною. Тому він з радістю прийняв пропозицію фізика **Поггендорфа** використати для дослідів нове джерело електрики — термоелемент, який був відкритий незадовго до того. Це джерело давало струм постійної сили. Термоелемент мав досить просту будову, яка базувалася на відкритті **Зеебека**. Між двома мідними дротинами був припаяний стержень із вісмуту. Щоб одержати найбільшу електрорушійну силу термоелемента, Ом опускав один із сплавів у лід, а другий тримав у киплячій воді.

Щоб виміряти силу струму, Ом користувався мультиплікатором — це простий і важливий прилад, який винайшов фізик **Швейгер** (мал. 21), земляк і друг Ома. Мультиплікатор являв собою магнітну стрілку, розміщену всередині кількох витків дроту. Ом спостерігав величину відхилення стрілки мультиплікатора, ввімкненого у гальванічне коло.

Спроби наочно показали, що стрілка мультиплікатора завжди відхиляється тим більше, чим коротший і товщий провідник, що замикає коло.

Стрілка мультиплікатора відхиляється менше, коли цей провідник довший і тонший. Мідний дріт у п'ять разів більшої довжини при одному і тому самому перерізі дає у п'ять разів менше відхилення стрілки мультиплікатора. Якщо ж, наприклад, вставити мідну дrottину площею перерізу в десять разів більшою, але тієї самої довжини, тоді сила струму зростає в десять раз. Однакові розміром дrottини з різних речовин (міді, заліза і ін.) дали різне відхилення стрілки мультиплікатора.

У 1827 р. було надруковано дослідження під назвою: «Гальванічне коло, математично опрацьоване Г.-С. Омом». У ньому було викладено винайдений Омом закон: «У всякому нерозгалуженому замкненому електричному колі сила струму пропорційна електрорушійній силі і обернено пропорційна до опору всього кола».



3. Перевірити роботу кола, коли ключ розімкнено і замкнено.
4. Виміряти ЕРС джерела струму.
5. Зняти покази амперметра і вольтметра, коли ключ замкнено, і обчислити  $\rho$ . Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму, використовуючи дані про клас точності приладів.

### Для допитливих

1. Чому покази вольтметра при розімкнутому і замкнутому ключі різні?
2. Як підвищити точність вимірювання ЕРС джерела струму?
3. Чи ви можете запропонувати інші способи вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму?

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. Внаслідок ввімкнення чергового споживача на ділянці, де вольтметром вимірювали напругу, покази його зменшилися. Чому?

#### Розв'язання

Споживач ввімкнули паралельно ділянці, що зменшило її опір. При постійній силі струму на ділянці зменшення опору призвело до зменшення показів вольтметра.

2. Акумулятор, ЕРС якого 6 В і внутрішній опір 0,1 Ом, живить зовнішнє коло опором 12,4 Ом. Яка кількість теплоти виділиться за 10 хв у всьому колі?

#### Розв'язання

Згідно із законом Ома для повного кола сила струму в ньому  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ . Кількість теплоти, що виділилася на зовнішній ділянці, визначається за формулою  $Q_1 = I^2 R t$ , на внутрішній —  $Q_2 = I^2 r t$ .

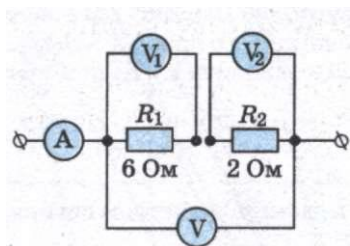
Отже, повна кількість теплоти така:

$$Q = Q_1 + Q_2 = I^2 (R+r) t = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R+r}.$$

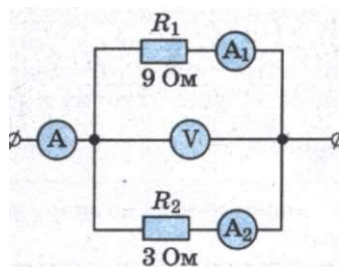
Підставивши значення фізичних величин, отримаємо  $Q = 1728$  Дж.

#### Рівень А

36. Вольтметр  $V_1$  показує напругу 6 В. Які покази амперметра А і вольтметрів  $V_2$  і  $V$  (мал. 23)?
37. Вольтметр показує 0,9 В. Які покази амперметрів  $A^1$  і  $A^2$  (мал. 24)?
38. За графіком залежності сили струму в реостаті від його опору визначте напругу на реостаті (мал. 25).
39. За графіком залежності сили струму в провіднику від напруги обчисліть опір провідника (мал. 26).
40. На електричній плитці з відкритою спіраллю нагрівається чайник. Під час кипіння частину спіралі залило водою. Як змінилося розжарення незалитої частини спіралі?
41. Чому нитка електролампочки сильно розжарюється, а дроти, що підводять струм, залишаються холодними, хоча через лампу і дроти проходить струм однакової сили?
42. В обмотці електродвигуна, опір якої 0,75 Ом, сила струму 20 А. Яка кількість теплоти виділяється цією обмоткою за 1 хв роботи двигуна?

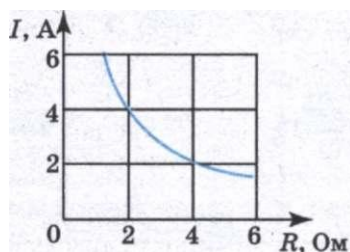


Мал. 23

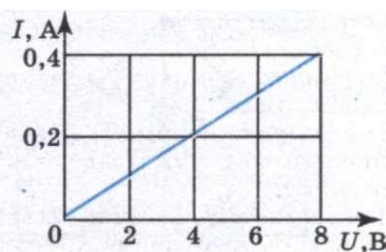


Мал. 24

43. Під час переміщення 20 Кл електрики по провіднику опором 0,5 Ом було виконано роботу в 100 Дж. Визначте час, протягом якого проходив струм.
44. Яку потужність споживає електрична лампочка, увімкнена в мережу з напругою 220 В, якщо опір її нитки в розжареному стані 484 Ом?
45. Електродвигун швейної машини розвиває потужність 40 Вт. Який струм проходить через двигун, якщо він працює при напрузі 127 В? Скільки енергії використовує двигун протягом 1,5 год?
46. Чому при малій швидкості впорядкованого руху електронів у металевому провіднику прилади починають діяти одночасно?
47. Коли через електричну лампочку розжарення проходить струм більшої сили: чи відразу після вмикання її в мережу, чи через кілька хвилин? Чому?
48. Сила струму в металевому провіднику дорівнює 0,8 А, переріз провідника  $4 \text{ мм}^2$ . Вважаючи, що в кожному кубічному сантиметрі знаходиться  $2,5 \cdot 10^{22}$  вільних електронів, визначте середню швидкість їх упорядкованого руху.
49. Визначте силу струму в мідному провіднику перерізом  $10 \text{ мм}^2$ , якщо середня швидкість упорядкованого руху вільних електронів дорівнює  $4,2 \text{ мм/с}$ , а їх кількість становить  $5 \cdot 10^{24}$ .
50. Якщо лампочку живити від елемента, що має ЕРС 1,5 В, то робота сторонніх сил в елементі дорівнюватиме 18 Дж. Визначте заряд, що проходить за цей час через лампочку.
51. Гальванічний елемент з ЕРС 5 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнуто на провідник опором 14 Ом. Яка напруга на кінцях провідника?
52. Яке значення зовнішнього опору, якщо генератор, ЕРС якого 230 В і внутрішній опір 0,1 Ом, подає в зовнішню частину кола напругу 220 В?
53. ЕРС джерела 100 В. При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі дорівнює 2 А. Визначте внутрішній опір джерела і спад напруги на ньому.



Мал. 25

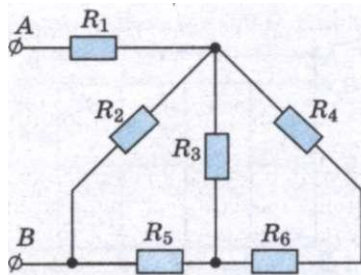


Мал. 26

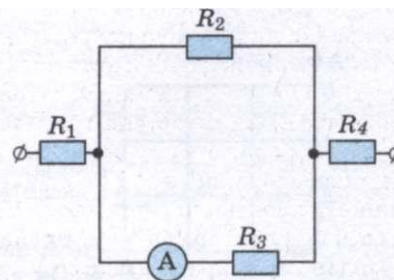
54. Визначте напругу на затискачах джерела струму, що має ЕРС 2 В і внутрішній опір 0,5 Ом, до і після під'єднання до нього зовнішнього опору 4,5 Ом.
55. Який внутрішній опір елемента, якщо його ЕРС становить 1,2 В і при зовнішньому опорі 5 Ом сила струму дорівнює 0,2 А?

## Рівень В

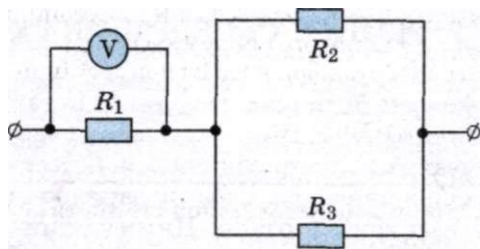
56. Яка основна вимога до опору вольтметра? Чи можна вольтметром виміряти силу струму?
57. Мідний та залізний провідники однакової довжини і перерізу з'єднані і ввімкнені у коло. Чи різняться напруги на провідниках у разі їх послідовного і паралельного увімкнення?
58. Унаслідок обробки провідника методом волочіння його довжина збільшилась у 5 разів, а площа поперечного перерізу в стільки ж разів зменшилась. У скільки разів змінився опір провідника?
59. До мережі з напругою 24 В під'єднали два послідовно з'єднаних резистори. При цьому сила струму стала дорівнювати 0,6 А. Коли резистори з'єднали паралельно, сумарна сила струму стала 3,2 А. Визначте опір резисторів.
60. Два провідники під'єднують до джерела постійної напруги спочатку послідовно, а потім паралельно. Опір одного з провідників в  $n$  разів більший від іншого. Як змінюється сила струму в колі?
61. Загальний опір двох послідовно з'єднаних провідників 5 Ом, а паралельно з'єднаних — 1,2 Ом. Визначте опір провідників.
62. Еквівалентний опір трьох паралельно з'єднаних споживачів 300 Ом, а їхні опори відносяться як 1 : 3 : 5. Визначте опір кожного із споживачів.
63. Амперметр із внутрішнім опором 0,72 Ом розраховано на силу струму 0,5 А. Яку максимальну силу струму можна буде виміряти амперметром, якщо паралельно йому під'єднати шунт опором 0,08 Ом?
64. Визначте силу струму в кожному з резисторів (мал. 27), якщо напруга між точками А і В дорівнює 12 В;  $R_1 = R_2 = 8$  Ом;  $R_3 = 10$  Ом;  $R_4 = 6$  Ом;  $R_5 = 3$  Ом;  $R_6 = 6$  Ом.
65. Визначте розподіл струмів і напруг між опорами (мал. 28), якщо амперметр показує 2 А,  $R_1 = 20$  Ом;  $R_2 = 10$  Ом;  $R_3 = 15$  Ом;  $R_4 = 4$  Ом.
66. В и з н а ч і д і л струмів і напруг між опорами (мал. 29), якщо  $R_1 = 5$  Ом;  $R_2 = 12$  Ом;  $R_3 = 3$  Ом; а вольтметр показує 20 В.
67. Визначте розподіл струмів і напруг між опорами (мал. 30), якщо амперметр показує 5 А;  $R_1 = 2$  Ом;  $R_2 = 10$  Ом;  $R_3 = 15$  Ом;  $R_4 = 4$  Ом.
68. Спираль електричної плитки перегоріла і після з'єднання кінців дроту стала дещо коротшою. Як змінилася кількість теплоти, що виділяється плитою за певний час? Відповідь обґрунтуйте.



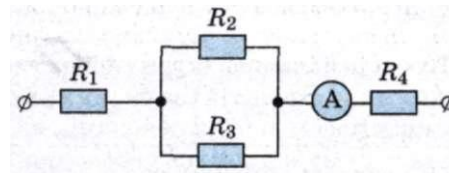
Мал. 27



Мал. 28



Мал. 29



Мал. 30

69. Електричний нагрівник має дві однакові обмотки, які можна вмикати в коло окремо і разом. Як слід з'єднати обмотки, щоб нагрівання відбувалося швидше?
70. Як зміниться кількість теплоти, що виділяється в електрочайнику, якщо опір його спіралі зменшити вдвічі, а силу струму вдвічі збільшити?
71. Дві лампи опороми 180 і 360 Ом під'єднали паралельно у коло напругою 120 В. Яку потужність буде мати кожна із ламп? Яка буде потужність, якщо лампи з'єднати послідовно?
72. Трамвайний двигун споживає силу струму 110 А при напрузі 600 В і розвиває силу тяги 3 кН. Визначте швидкість руху трамвая на горизонтальній ділянці, якщо ККД = 60 %.
73. Ліфт масою 1,5 т піднімається на висоту 20 м за 0,5 хв. Напруга на затискачах двигуна становить 220 В, а його ККД — 90%. Визначте силу струму в двигуні.
74. На скільки градусів нагріється алюмінієвий провідник із площею поперечного перерізу  $4,5 \text{ мм}^2$  після пропускання по ньому струму силою 0,75 А протягом 20 с? Вважати, що від усієї енергії, що виділяється в провіднику під час проходження струму, навколишньому повітрю передається 0,5 частина енергії.
75. Ампер вважав, що електрика, зокрема електричний струм, позбавлені інертності. Чи мав рацію Ампер? Чому?
76. По срібному дроту, що має переріз  $1 \text{ мм}^2$ , проходить струм силою 1 А. Обчисліть середню швидкість дрейфу вільних електронів у цьому дроті, припустивши, що кожен атом срібла дає один вільний електрон.
77. У 70-х роках ХХ ст. існували електронні обчислювальні машини, в яких імпульс струму від одного пристрою до іншого мав передаватися за 10 с. Чи можна було ці пристрої з'єднати дротиною завдовжки 40 см?
78. Значення ЕРС джерела струму часто визначають за показами вольтметра, під'єданого до затискачів джерела. Чи точно значення ЕРС дає цей найпростіший метод її оцінки? Що показує вольтметр, під'єднаний до затискачів джерела?
79. На батарейці кишенькового ліхтаря є напис: ЕРС 4,5 В, а на лампі вказано напругу 3,5 В. Чим пояснити таку різницю?
80. Батарейка для кишенькового ліхтарика замкнута на реостат. При опорі реостата 1,65 Ом напруга на ньому дорівнює 3,3 В, а при опорі 3,5 Ом — 3,5 В. Визначте ЕРС і внутрішній опір батарейки.
81. Визначте ЕРС і внутрішній опір гальванічного елемента, якщо при зовнішньому опорі 2 Ом сила струму в колі 0,6 А, а при опорі 1 Ом — 1 А.
82. Від генератора, що має ЕРС 40 В і внутрішній опір 0,04 Ом, струм надходить по мідному кабелю, переріз якого  $170 \text{ мм}^2$ , до місця електрозварювання, віддаленого від генератора на 50 м. Визначте напругу на затискачах генератора і на зварювальному апараті, якщо сила струму в колі становить 200 А.
83. Яка напруга на полюсах джерела струму з ЕРС, що дорівнює 1 В, якщо опір зовнішньої частини електричного кола дорівнює внутрішньому опору джерела?



## § 8. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Провідниками електричного струму можуть бути різні речовини: метали, розчини електролітів і за певних умов газу та вакуум. Широкого застосування останнім часом набули речовини, які називають напівпровідниками. Для створення струму в якомусь середовищі потрібна наявність у ньому заряджених частинок, здатних переміщатися під дією електричного поля. Цими частинками можуть бути і електрони, і йони. З'ясувати природу струму — означає встановити, які саме заряджені частинки переносять заряд у даному середовищі.

Розглянемо металеві **провідники**. Носіями вільних зарядів у металах є електрони, концентрація яких велика — порядку  $10^{28}$  у кубічному метрі. Ці електрони беруть участь у хаотичному тепловому русі. Під впливом же електричного поля вони починають переміщатися впорядковано із середньою швидкістю приблизно 0,5 мм/с. А швидкість поширення електричного поля всередині металевого провідника наближається до 300 000 км/с. Саме цю швидкість і пов'язують з поширенням електричного струму в металах. Провідність металів зумовлена рухом вільних електронів. Це експериментально довели Л. І. **Мандельштам** і М. Д. **Папалексі** в 1913 р., потім **Б. Стюарт** і **Р. Толмен** у 1916 р.

Під час руху в провіднику електрони провідності зазнають зіткнень з йонами кристалічної ґратки і при цьому втрачають частину енергії, набутої в електричному полі. Такі зіткнення і зумовлюють опір провідника. З підвищенням температури провідника зростає середня швидкість теплового руху електронів і збільшується амплітуда коливань йонів у вузлах ґратки. Це приводить до збільшення кількості зіткнень електронів з йонами. Таким чином, опір металів залежить від температури.

У 1911 р. голландський фізик **Г. Камерлінг-Оннес** відкрив надзвичайне явище — **надпровідність**. Він виявив, що під час охолодження ртуті в рідкому гелії її опір спочатку змінюється поступово, а потім, з досягненням температури 4,1 К, різко спадає до нуля. Явище зменшення опору до нуля при температурі, відмінній від абсолютного нуля, назвали надпровідністю. Згодом надпровідність було виявлено у багатьох інших металах. Метали, які мають властивість надпровідності, практично не нагріваються при проходженні через них струму, а це дає можливість передавати енергію без втрат.

**Рідини**, як і тверді тіла, можуть бути як діелектриками, так і провідниками. До діелектриків належить, наприклад, дистильована вода, до провідників — розчини електролітів: кислот, лугів і солей.

У курсі неорганічної хімії пояснюється, чому водні розчини електролітів проводять електричний струм. При розчиненні електролітів під впливом електричного поля полярних молекул води відбувається розпад молекул електролітів на йони. Цей процес називається **електролітичною дисоціацією**.

Ступінь дисоціації характеризується часткою молекул розчиненої речовини, що розпадаються на йони, і залежить від температури, концентрації розчину й діелектричної проникності розчинника. З підвищенням температури ступінь дисоціації зростає і, отже, збільшується концентрація позитивно і негативно заряджених йонів. Носіями заряду у водних розчинах і розплавах електролітів є позитивно і негативно заряджені йони.

Якщо посудину з розчином електроліту ввімкнути в електричне коло, то негативно заряджені йони почнуть рухатися до додатного електрода — анода, а позитивно заряджені — до від'ємного — катода. Внаслідок цього з'явиться електричний струм. **Оскільки заряди у водних розчинах і розплавах електролітів переносяться йонами, то таку провідність називають йонною.**

При йонній провідності проходження струму зв'язане з перенесенням речовини. На електродах виділяються речовини, що входять до складу електролітів. На аноді негативно заряджені йони віддають свої зайві електрони (у хімії це називається окиснювальною реакцією), а на катоді позитивно заряджені йони одержують електрони, яких не вистачає (відновна реакція).

**Процес виділення на електродах речовин, пов'язаний з окиснювально-відновними реакціями, називають електролізом.**

Електроліз широко застосовують з різною метою у техніці. За допомогою електролітичного способу покривають поверхні одного металу тонким шаром іншого (нікелювання, хромування, оміднення і т. д.). Це надійне покриття захищає поверхню металів від корозії.

Рідини можуть мати й електронну провідність, наприклад, рідкі метали.

**Гази** за нормальних умов (коли немає йонізатора) є ізоляторами і стають провідниками електричного струму тільки внаслідок зовнішньої дії. Електропровідність газу можна змінити, опромінюючи його ультрафіолетовими, рентгенівськими або радіоактивними променями, нагріваючи його тощо.

За нормальних умов гази на відміну від металів і електролітів не містять вільних носіїв струму, ні електронів, ні йонів, оскільки вони складаються з електрично нейтральних атомів і молекул. Внаслідок зовнішніх дій **газ йонізується, тобто від атомів і молекул відриваються електрони.** Йонізація, у свою чергу, спричиняє виникнення позитивних йонів і електронів. Якщо ж який-небудь нейтральний атом газу зможе приєднати до себе електрон, то виникне негативний йон. Отже, під час йонізації атома газу має бути виконана робота з йонізації, яка визначається силою взаємодії між електроном, що відривається, та йоном, що при цьому утворюється. Значення цієї роботи залежить від хімічної природи газу. Якщо атом втрачає два електрони, то вони стають двократно йонізованими і перетворюються у двовалентний йон.

Разом з процесом йонізації в газі відбувається **процес рекомбінації — перетворення йонів у нейтральні атоми або молекули.** Якщо зовнішній йонізатор припиняє дію, то провідність газу зменшується і він уже не може бути провідником. Якщо потужність йонізатора з часом не змінюється, то між процесами йонізації і рекомбінації встановлюється динамічна рівновага, за якої кількість пар заряджених частинок, що утворюються, дорівнює в середньому кількості пар йонів, які зникають внаслідок рекомбінації.

Процес проходження струму через газ називають газовим розрядом. **Струм у газі, який виникає під дією зовнішнього йонізатора, називається самостійним газовим розрядом.**

За певних умов у газах можливе збудження великої провідності внаслідок дії електричного поля. У цьому випадку ми маємо явище самостійного розряду і самостійну провідність.

**Самостійним називають розряд у газах, який зберігається й після припинення дії зовнішнього йонізатора.**

Під час будь-якого самостійного розряду відбувається йонізація газу електронними ударами, однак наявність йонізації внаслідок електронного удару ще не веде до самостійного розряду. Дійсно, якщо усунути зовнішній йонізатор, то всі йони врешті-решт будуть нейтралізовані на електродах і розряд припиниться. Для самостійного розряду, треба, щоб і позитивні йони набували в електричному полі достатньої енергії для вибивання вільних електронів з молекул або з катода. Залежно від стану газу (температури і тиску), від напруги, форми й розмірів електродів самостійні газові розряди можуть відрізнятися один від одного як за зовнішнім виглядом, так і за характером фізичних процесів, які зумовлюють їх виникнення й проходження.

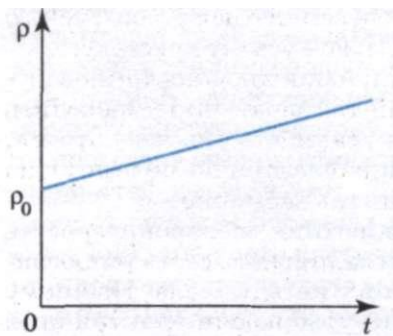
Серед самостійних розрядів виділяють такі: тліючий розряд, електрична дуга, коронний розряд та іскровий розряд.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

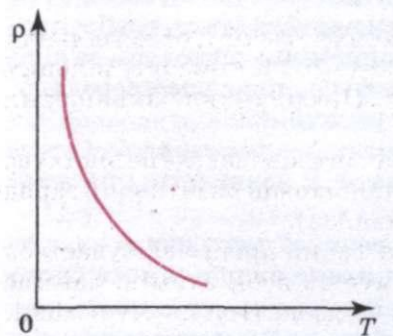
1. Які саме заряджені частинки переносять заряд у металах?
2. Чи проводить струм дистильована вода? Чому?
3. Яка природа струму в газах?

## § 9.

### ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ



Мал. 31



Мал. 32

У 9 класі ви вивчали матеріал, який стосується напівпровідників і електричного струму в них. Тому ми коротко розглянемо те, про що ви знаєте, і більш детально зупинимося на інших властивостях напівпровідників та їх застосуванні.

Отже, відрізнити напівпровідники від провідників можна за характером залежності електропровідності від температури. Вимірювання під час дослідів показують, що в таких елементах, як Силіцій (Si), Германій (Ge), Селен (Se) тощо і їхніх сполуках (РЬБ, Сов та ін.) питомий опір з підвищенням температури не зростає, як у металів (мал. 31), а, навпаки, різко зменшується (мал. 32). Такі речовини і називають напівпровідниками.

З графіка, поданого на мал. 32, видно, що при температурах, які наближаються до абсолютного нуля, питомий опір напівпровідників дуже великий. Це означає, що при низьких температурах напівпровідник є фактично діелектриком. З підвищенням температури питомий опір швидко зменшується. *Учому ж причина цього явища?*

Щоб зрозуміти механізм виникнення провідності в напівпровідниках, треба розглянути будову напівпровідникових кристалів і природу зв'язків, що утримують атоми

кристала один біля одного. Як приклад розглянемо кристал силіцію.

Силіцій — чотиривалентний елемент. Це означає, що в зовнішній оболонці атома є чотири електрони, які порівняно слабо зв'язані з ядром. Кожний атом Силіцію має чотири найближчих сусідів. Схему структури кристала силіцію зображено на мал. 33.

Між парою сусідніх атомів існує так званий парноелектронний, або ковалентний, зв'язок. В утворенні цього зв'язку бере участь один валентний електрон від кожного атома, що відірвався від нього (колективізувався кристалом) і рухається у просторі між сусідніми атомами. Негативний заряд цих електронів утримує позитивні йони Силіцію один біля одного.

Не слід вважати, що колективізована пара електронів належить двом атомам. Кожний атом утворює чотири зв'язки із сусідніми, і будь-який валентний електрон може рухатися по одному з атомів. Дійшовши до сусіднього атома, він може перейти до наступного і так переміщатися уздовж усього кристала. Колективізовані валентні електрони належать усьому кристалу.

Парноелектронні зв'язки силіцію досить міцні й при низьких температурах не розриваються. Тому силіцій при низькій температурі не проводить електричний струм. Валентні електрони, що беруть участь у зв'язку атомів, міцно прив'язані до кристалічної ґратки, і зовнішнє електричне поле помітно не впливає на їх рух. Аналогічну будову має кристал германію.

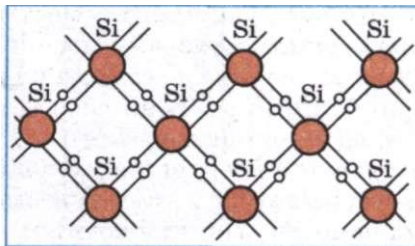
Від нагрівання силіцію кінетична енергія валентних електронів зростає і окремі зв'язки розриваються. Деякі електрони залишають свої «уторвані шляхи» і стають вільними, подібно до електронів у металі. В електричному полі вони переміщаються між вузлами ґратки, утворюючи електричний струм (мал. 34).

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

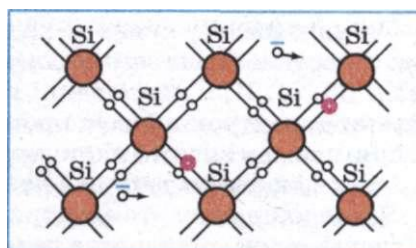
З підвищенням температури кількість розірваних зв'язків і, отже, вільних електронів збільшується. При нагріванні від 300 до 700 К кількість вільних носіїв заряду збільшується від  $10^{17}$  до  $10^{24}$  м<sup>-3</sup>. Це спричиняє зменшення опору.

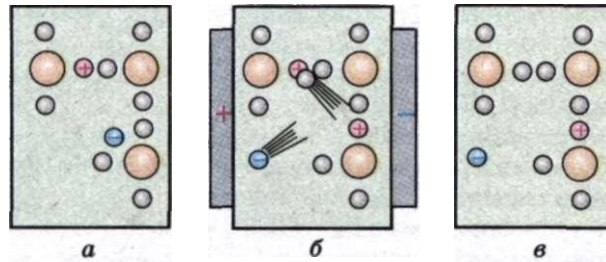
Якщо розривається зв'язок, то утворюється вакантне місце, де не вистачає електрона. Його називають діркою. У дірці є надлишковий позитивний заряд порівняно з іншими нормальними зв'язками (мал. 34).

Положення дірки в кристалі не є незмінним. Такий процес відбувається безперервно. Один з електронів, що забезпечує зв'язок атомів, займає місце дірки і відновлює тут парноелектронний зв'язок. При цьому в місці, звідки перескочив електрон, утворюється нова дірка. Отже, дірка може переміщатися в кристалі.



Мал. 33





Мал. 35

На мал. 35 зображено механізм електронної і діркової провідностей. За відсутності зовнішнього поля є один вільний електрон (-) і одна дірка (+) (мал. 35, а). При накладанні поля відбувається переміщення електронів. Вільний електрон прямує проти напрямку напруженості поля. У цьому ж напрямі переміщається також один із зв'язаних електронів (мал. 35, б). Це виглядає як перехід дірки в напрямі поля (мал. 35, в).

Якщо напруженість електричного поля в зразку дорівнює нулю, то переміщення дірок, рівноцінне переміщенню позитивних зарядів, відбувається хаотично і тому не створює електричний струм. При наявності електричного поля виникає упорядкований перехід дірок і, таким чином, до електричного струму вільних електронів додається електричний струм, обумовлений переходом дірок. Напрямок руху дірок протилежний напрямку руху електронів.

Отже, у напівпровідниках є носії зарядів двох типів: електрони й дірки.

**Напівпровідники мають не тільки електронну, а й діркову провідність.**

Ми розглянули механізм провідності ідеальних напівпровідників, що не мають ніяких домішок.

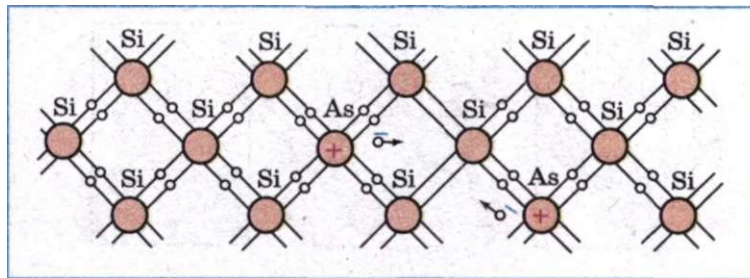
Провідність напівпровідників, які не мають домішок, називають власною провідністю напівпровідників.

## 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які речовини відносять до напівпровідників?
2. Опишіть будову напівпровідників. Назвіть їх основні властивості.
3. Що називається електронною провідністю? Дірковою провідністю?
4. Опишіть механізм електронної і діркової провідності.

## § 10. ДОНОРНІ ТА АКЦЕПТОРНІ ДОМІШКИ. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ ЧЕРЕЗ p-n-ПЕРЕХІД

Власна провідність напівпровідників звичайно невелика, оскільки в них мало вільних електронів (наприклад, у германію при кімнатній температурі  $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ). Водночас кількість атомів у  $1 \text{ см}^3$  германію — порядку  $10^{23}$ . Отже, кількість вільних електронів становить приблизно одну десяти-мільярдну частку загальної кількості атомів. Власна провідність напівпровідників багато в чому подібна до провідності водних розчинів і розплавів електролітів. У обох випадках кількість вільних носіїв заряду збільшується



Мал. 36

ся зі зростанням інтенсивності теплового руху. Тому і в напівпровідників, і у водних розчинів або розплавів електролітів провідність збільшується зі зростанням температури.

Істотна особливість напівпровідників полягає в тому, що в них при наявності домішок, крім власної провідності, виникає додаткова — домішкова провідність. Змінюючи концентрацію домішки, можна змінювати кількість носіїв заряду того чи іншого знака. Завдяки цьому створюються напівпровідники з переважною концентрацією — або негативно, або позитивно заряджених носіїв.

Виявляється, що коли є домішки, наприклад атомів Арсену, навіть якщо їх концентрація дуже мала, то кількість вільних електронів зростає в багато разів. Відбувається це з такої причини. Атоми Арсену мають п'ять валентних електронів. Чотири з них беруть участь у створенні хімічного (ковалентного) зв'язку даного атома з навколишніми атомами, наприклад з атомами Силіцію. П'ятий валентний електрон виявляється слабо зв'язаним з атомом. Він легко залишає атом Арсену і стає вільним (мал. 36).

При додаванні однієї десятимільйонної частки атомів Арсену концентрація вільних електронів дорівнюватиме  $10^{16} \text{см}^{-3}$ . Це в тисячу разів більше за концентрацію вільних електронів у чистому напівпровіднику.

**Домішки, які легко віддають електрони і, отже, збільшують кількість вільних електронів, називають донорними домішками.**

Оскільки у напівпровідників з донорною домішкою багато електронів (порівняно з кількістю дірок), їх називають напівпровідниками «типу (з лат. *negativ* — негативний).

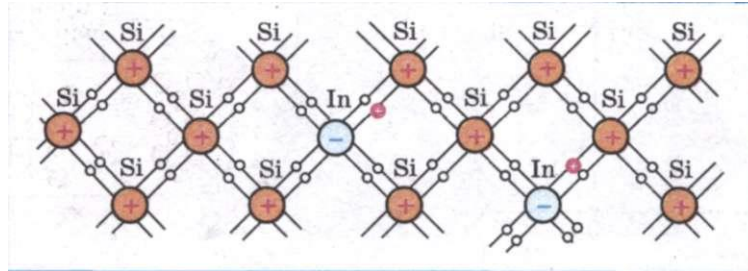
**У напівпровіднику *n*-типу електрони — основні носії заряду, а дірки — неосновні.**

Якщо як домішку використати індій, атоми якого тривалентні, то характер провідності напівпровідника зміниться. Тепер для встановлення нормальних парноелектронних зв'язків із сусідами атома Індію не вистачає електрона. Внаслідок цього утворюється дірка. Кількість дірок у кристалі дорівнюватиме кількості атомів домішки (мал. 37).

Такі домішки називають акцепторними.

Якщо існує електричне поле, то дірки переміщуються по полю і виникає діркова провідність.

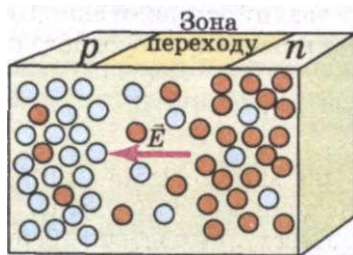
**Напівпровідники з переважанням діркової провідності над електронною називають напівпровідниками *p*-типу (з лат. *positiv* — позитивний).**



Мал. 37

Дірки — основні носії заряду в напівпровіднику *p*-типу, а електрони — неосновні.

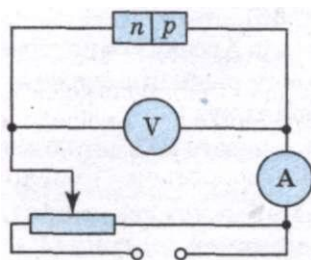
Будемо розглядати напівпровідник (мал. 38), права частина якого містить донорні домішки, в цьому випадку він є напівпровідником *n*-типу, а ліва — акцепторні, домішки, тоді він є напівпровідником *p*-типу.



Мал. 38

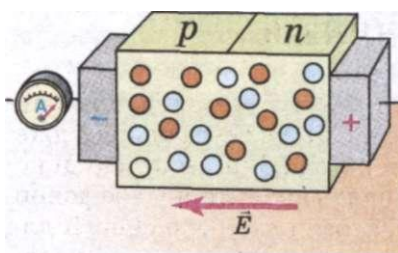
Контакт двох напівпровідників називають *p-n*-переходом.

При утворенні контакту електрони частково переходять з напівпровідника *n*-типу в провідник *p*-типу, а дірки — у зворотному напрямі. Відбувається процес дифузії, такий самий, як і під час зіткнення двох різних газів, молекули яких переміщуються внаслідок теплового руху. Таким чином, напівпровідник *n*-типу заряджається позитивно, а *p*-типу — негативно. Дифузія припиняється після того, як електричне поле, що виникає в зоні переходу, перешкоджає подальшому переміщенню електронів і дірок.



Мал. 39

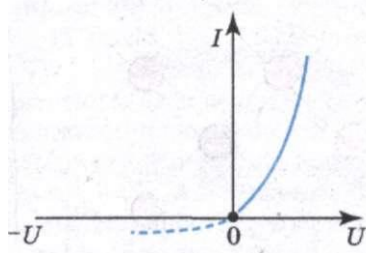
Увімкнемо напівпровідник з *p-n*-переходом в електричне коло (мал. 39). Спочатку приєднаємо батарею так, щоб потенціал напівпровідника *p*-типу був позитивним, а *n*-типу — негативним. При цьому струм через *p-n*-перехід передаватиметься основними носіями: з ділянки *n* у ділянку *p* електронами, а з ділянки *p* у ділянку *n* дірками (мал. 40). Внаслідок цього провідність усього зразка буде великою, а опір малим.



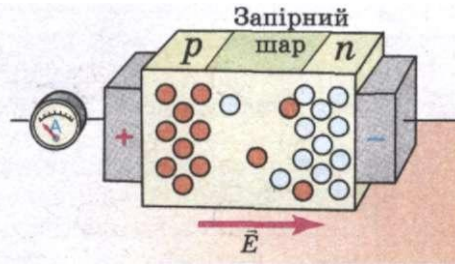
Мал. 40

Розглянутий перехід називають прямим. Залежність сили струму від різниці потенціалів — вольт-амперну характеристику прямого переходу — зображено на мал. 41 суцільною лінією.

Перемкнемо полюси батареї. В цьому разі при такій самій різниці потенціалів сила стру-



Мал. 41



Мал. 42

му в колі буде значно меншою, ніж при прямому переході. Це зумовлено тим, що електрони через контакт переходять з ділянки  $p$  у ділянку  $n$ , а дірки — з ділянки  $n$  у ділянку  $p$ . Проте у напівпровіднику  $r$ -типу мало вільних електронів, а в напівпровіднику  $p$ -типу мало дірок. Таким чином, через контакт переходять неосновні носії, а їх незначна кількість (мал. 42). Внаслідок цього провідність зразка буде малою, а опір великим. Утворюється так званий **запiрний шар**. Цей **перехід називають зворотним**. Вольт-амперну характеристику зворотного переходу зображено на мал. 41 штриховою лінією.

**Отже,  $p$ — $n$ -перехід щодо струму несиметричний: у прямому напрямі опір переходу значно менший, ніж у зворотному.**

Цю властивість  $p$ — $n$ -переходу використовують для випрямлення змінного струму. Протягом половини періоду, коли потенціал напівпровідника  $r$ -типу додатний, струм вільно проходить через  $p$ —«перехід». У наступну половину періоду струм практично дорівнює нулю.

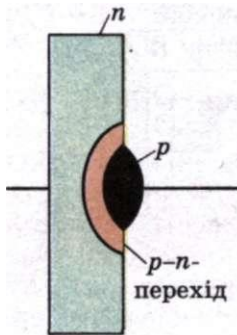
### 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які рухомі носії зарядів є в чистому напівпровіднику?
2. Що відбувається при зустрічі електрона з діркою?
3. Чому опір напівпровідника великою мірою залежить від наявності домішок?
4. Яку домішку — донорну чи акцепторну — треба ввести, щоб дістати напівпровідник  $p$ -типу?
5. Які носії заряду є основними, а які — неосновними в напівпровіднику з акцепторною домішкою?
6. Що таке  $p$ — $n$ -перехід?

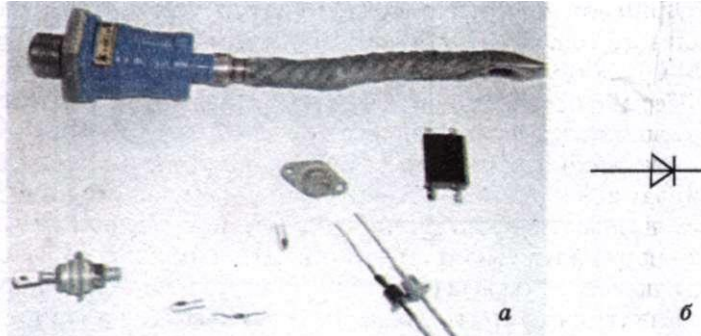
## § 11. НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДІОД. ЗАСТОСУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Вам вже відомо, що в електронній лампі носії заряду — електрони — виникають внаслідок термоелектронної емісії. Це потребує спеціального джерела електричної енергії для розжарення нитки катода. У  $p$ — $n$ -переході носії заряду утворюються тоді, коли у кристал вводять акцепторну або донорну домішку. Отже, відпадає потреба використовувати джерело енергії для одержання вільних носіїв заряду. У складних схемах зекономлена внаслідок цього енергія буває досить значною.





Мал. 43



Мал. 44

Напівпровідникові випрямлячі при таких самих значеннях випрямленого струму мініатюрніші, ніж електронні лампи, тому радіосхеми на напівпровідниках компактніші.

Зазначені переваги напівпровідникових приладів особливо істотні для використання їх на штучних супутниках Землі, космічних кораблях, в ЕОМ.

Напівпровідникові діоди виготовляють з германію, кремнію, селену та інших речовин.

Розглянемо утворення  $p-n$ -переходу при використанні в діоді германію, що має провідність  $n$ -типу за рахунок невеликої добавки донорної домішки. Цей перехід не вдається одержати за допомогою механічного з'єднання двох напівпровідників з різними провідностями, оскільки при цьому буває надто великий зазор між напівпровідниками. Товщина  $жр$ — $n$ -переходу має бути не більшою від міжатомних відстаней. Тому в одну з поверхонь зразка вплавають індій. Внаслідок дифузії атомів Індію в монокристал германію біля поверхні германію утворюється ділянка з провідністю  $p$ -типу. Решта зразка германію, куди атоми Індію не проникли, як і раніше, має провідність  $n$ -типу. Між двома ділянками з провідністю різних типів і виникає  $p-n$ -перехід (мал. 43). У напівпровідниковому діоді германій є катодом, а індій — анодом.

Щоб запобігти шкідливим впливам повітря і світла, кристал германію вміщують у герметичний металевий корпус (мал. 44, а). Схематичне зображення діода подано на мал. 44, б.

Напівпровідникові випрямлячі мають високу надійність і працюють тривалий час. Проте вони можуть працювати лише в обмеженому інтервалі температур (приблизно від  $-70$  до  $125$  °С).

З 9 класу ви знаєте, що у напівпровідниках електричний опір значною мірою залежить від температури. Цю властивість використовують для вимірювання температури за силою струму в колі з напівпровідником. Такі прилади називають термісторами або терморезисторами.

Термістори — одні з найпростіших напівпровідникових приладів. Для їх виготовлення використовують германій, селен та ін. Термістори випускають у вигляді стержнів, трубок, дисків, шайб і намистин розміром від кількох мікрометрів до кількох сантиметрів.

Діапазон вимірюваних температур більшості термісторів лежить в інтервалі від 170 до 570 К. Проте є термістори для вимірювання дуже високих (до 1300 К) і дуже низьких (від 4 до 80 К) температур.

Термістори застосовують для дистанційного вимірювання температури, протипожежної сигналізації тощо.

Електрична провідність напівпровідників підвищується не тільки від їх нагрівання, а й від їх освітлення. При освітленні напівпровідника сила струму в колі помітно зростає, що свідчить про збільшення провідності (зменшення опору) напівпровідників під дією світла. Цей ефект не пов'язаний з нагріванням, оскільки він може спостерігатися і при незмінній температурі.

Електрична провідність зростає внаслідок розривання зв'язків і утворення вільних електронів і дірок за рахунок енергії світла, що падає на напівпровідник. Це явище називають **фотоелектричним ефектом**. Прилади, в яких використовують фотоелектричний ефект у напівпровідниках, називають **фоторезисторами або фотоопорами**. Завдяки мініатюрності й високій чутливості фоторезистори використовуються в найрізноманітніших галузях техніки для реєстрації і вимірювання слабких світлових потоків. За допомогою фоторезисторів визначають якість поверхонь, контролюють розміри виробів тощо.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

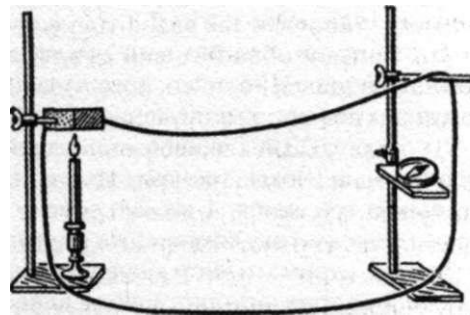
1. Що таке напівпровідниковий діод? Яка його будова?
2. Які види напівпровідників ви знаєте? Де вони застосовуються?

### Це цікаво знати

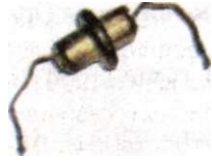
Першим кроком у дослідженні напівпровідників було відкриття у 1822 р. німецьким фізиком **Т. Зеебеком** явища виникнення ЕРС у колі з різних напівпровідників, місця з'єднання яких підтримувалися при різних температурах. Суть дослідів полягала у наступному: Зеебек, відтворюючи досліди Ерстеда, припаював два різних метали, з'єднував їх мідним провідником і розміщав усередині петлі, утвореної провідником, магнітну стрілку. Схема установки Зеебека наведена на мал. 45. Нагріваючи місце спаю за допомогою свічки, Зеебек помітив, що магнітна стрілка відхиляється! А через 12 років **Ж. Пельт'є** повідомив про температурні аномалії на контакті двох різнорідних провідників при проходженні через цей контакт електричного струму.

У 1821 р. учитель М. Фарадея **Г. Деві** встановив, що провідність «деяких металів» зменшується зі зростанням температури. Пізніше у 1833 р. вже сам Фарадей помітив, що при нагріванні сріблестого срібла його опір зменшується, тоді як відомо, що опір металів при нагріванні зростає (цю властивість використовують у **термісторах** — датчиках температури в електричних термометрах).

**Фоточутливість напівпровідників** вперше помітили в 1873 р. англійські електротехніки **В. Сміт** і **Дж. Мей**, які при



Мал. 45



Мал. 46

виготовленні високоомних опорів із селену спостерігали зменшення його опору при освітленні (цю властивість використовують у **фоторезисторах** — складових приладів для вимірювання світлових величин). Це явище відразу ж знайшло практичне використання: скориставшись високою фоточутливістю селену, американський винахідник **А. Белл** сконструював «фотофон» — прилад для передавання людської мови на відстань прямого зору, а вже на початку XX ст. за допомогою селенових фотоопорів було здійснено передачу зображень по проводах. У 1888 р. російський

фізик **В. Ульянін** у Казані опублікував повідомлення про відкриття ним явища виникнення фотоелектрорушійної сили при освітленні селену крізь напівпрозорий електрод. Знову про це явище повідомив у 1924 р. **Г. Гейгер**, а в 1932 р. **А. Ланге** побудував із закису міді перший фотоелемент із запірним шаром.

У 1922 р. інший російський фізик Нижегородської радіолабораторії **О. Лосєв** сконструював кристалічний детекторний приймач (кристадин), дію якого не могла пояснити жодна фізична лабораторія світу. Дослідження уніполярної (однобічної) провідності деяких речовин проводив німецький фізик Г. Ом, а перший напівпровідниковий (сульфідний) випрямляч для технічного застосування виготовив у 1906 р. у Росії **П. Павловський**.

Відкриття ж фізичних ефектів, покладених в основу **транзистора**, пов'язане саме з діяльністю видатного українського фізика **В. Лашкарьова** (1903—1974). Він по праву мав би одержати Нобелівську премію з фізики за відкриття транзисторного ефекту, якої в 1956 р. були удостоєні американські учені **Дж. Бардін, В. Шоклі, У. Браттейн**.

Ще в 1941 р. В. Лашкарьов опублікував статтю «Дослідження запірних шарів методом термозонда» і у співавторстві з К. Косоноговою — «Вплив домішок на вентильний фотоелемент в закису міді». Лашкарьов встановив, що обидві сторони «запільного шару», розташованого паралельно межі поділу мідь—закис міді, мають протилежні знаки носіїв струму. (На мал. 46 наведено купрокс-діод нар—л-переході (мідь—закис міді). Його виготовили на військовому заводі в Уфі під керівництвом Лашкарьова під час Другої світової війни і використовували у військових польових радіостанціях.)

Це явище одержало назву р—л-переходу. Вчений пояснив і механізм інжекції — важливого явища, на основі якого діють напівпровідникові діоди і транзистори.

Перше повідомлення в американському виданні про появу напівпровідникового підсилювача-транзистора з'явилося лише у липні 1948 р., тільки через 7 років після статті В. Лашкарьова. Його винахідники — американські учені Бардін і Браттейн пішли по шляху створення так званого точкового транзистора на базі кристала германію л-типу. Перший обнадійливий результат вони одержали наприкінці 1947 р. Проте прилад поводився нестійко, його характеристики відрізнялися непередбачуваністю, і тому практичного застосування точковий транзистор не дістав.

У 1951 р. у США з'явився надійніший — площинний — транзистор л—р—л-типу. Його створив Шоклі. Транзистор складався з трьох шарів германію л-, р- і л-типу, загальною товщиною 1 см, він зовсім не був схожий на подальші мініатюрні, а з часом і невидимі оку компоненти інтегральних схем.

До речі, отримати чисті монокристали германію та кремнію і на їх основі створити площинні транзистори та діоди вдалося іншому українському вченому **В. Тучкевичу**, який розробив також технологію виготовлення силових напівпровідникових вентилів (тиристорів).

Уже через декілька років значущість винаходу американських учених стала очевидною, і вони були нагороджені Нобелівською премією. Можливо, «холодна війна», що почалася тоді, відіграла свою роль у тому, що В. Лашкар'єв не став Нобелівським лауреатом. Його інтерес до напівпровідників не був випадковим. Починаючи з 1939 р. і до кінця життя учений послідовно і результативно займався дослідженнями їх фізичних властивостей. На додаток до двох перших праць Лашкар'єв у співавторстві із **В. Ляшенком** опублікував статтю «Електронні стани на поверхні напівпровідника», в якій було описано результати досліджень поверхневих явищ в напівпровідниках, що стали основою роботи інтегральних схем на базі польових транзисторів.

Під керівництвом В. Лашкар'єва на початку 50-х років ХХ ст. в Інституті фізики АН УРСР було організовано виробництво точкових транзисторів. Сформована ним наукова школа у галузі фізики напівпровідників стала однією з провідних у колишньому СРСР. Визнанням видатних результатів стало створення в 1960 р. Інституту напівпровідників АН УРСР, який очолив В. Лашкар'єв. У 2002 р. ім'я В. Лашкар'єва присвоєно заснованому ним Інституту напівпровідників НАН України.

### Лабораторна робота №2

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ДІОДОМ

Мета роботи: дослідити, як проводить постійний струм напівпровідниковий діод.

Прилади і матеріали: напівпровідниковий діод типу Д7, Д226 або інший; гальванічний елемент, батарея гальванічних елементів чи інше джерело постійного струму напругою до 4,5 В; лампочка розжарення напругою 2,5–3,5 В на підставці; вимикач, з'єднувальні проводи.

#### Хід роботи

1. Розгляньте напівпровідниковий діод (мал. 47). Ознайомтеся з написами та умовними позначеннями на його корпусі, звернувши особливу увагу на напрям стрілочки.

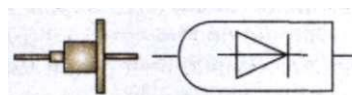
2. Складіть електричне коло за схемою, зображеною на мал. 48.

3. Зверніть увагу на світіння лампочки під час замикання кола. Не розмикаючи коло, закоротіть діод провідником, як показано на схемі штриховою лінією. Що ви будете спостерігати?

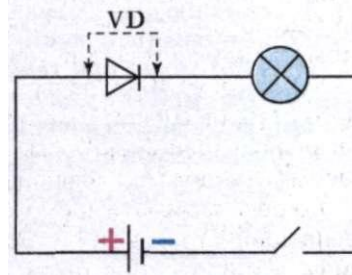
4. Вимкніть вимикач і перемкніть діод, повернувши його на 180°. Замкніть коло. Що ви спостерігаєте зараз?

5. Замкніть діод провідником. Що змінилося порівняно з попереднім дослідом?

6. Зробіть висновок про те, як напівпровідниковий діод проводить постійний струм, як пов'язані між собою полярність вмикання джерела струму, напрям стрілочки на діоді та світіння лампочки.



Мал. 47



Мал. 48

Ті, хто глибше цікавиться фізикою, можуть дослідити залежність сили струму діода від температури й освітленості. Для цього ще треба мати фотодіод та мікроамперметр чи міліамперметр (до 5 мА).

#### Контрольні запитання

1. Чому в техніці так важливі напівпровідникові діоди?
2. Що відбувається, коли ми перемикаємо діод, повернувши його на  $180^\circ$ ?

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. Чи втрачає свою теплову енергію під час зіткнення з йонами ґратки електрон провідності металу?

##### Розв'язання

Ні. Він втрачає тільки незначну кінетичну енергію, якої він набув при напрямленому русі в електричному полі.

2. Дистильована вода навіть після подвійної перегонки трохи проводить струм. Як це пояснити?

##### Розв'язання

Дуже мала частина молекул води дисоційована, і утворені йони  $\text{H}^+$  та  $\text{OH}^-$  спричиняють невелику провідність води.

3. Яка провідність напівпровідникового матеріалу — вища, власна чи домішкова?

##### Розв'язання

Домішкова (за тих невисоких температур, під час яких використовують більшість напівпровідникових пристроїв та елементів схем).

#### Рівень А

84. Як вплине на середню швидкість напрямленого руху електронів у мідному провіднику збільшення сили струму в ньому в  $k$  разів?
85. Чи однакова потужність електроплитки у таких випадках: а) на ній стоїть посудина з холодною водою; б) посудини немає?
86. Чи витрачається енергія електричного струму на електролітичну дисоціацію?
87. Який йон має найбільшу рухомість у розчині електроліту?
88. Чи виконується закон Джоуля—Ленца під час проходження струму через розчин електроліту?
89. Чи можна користуватися законом Ома для обчислення значень сили струму в розчині електролітів?
90. До германію додали невелику кількість атомів Арсену. Що і чому є основними носіями зарядів у такому напівпровіднику?
91. Магній і телур при температурі  $20^\circ\text{C}$  мають питомі опори відповідно  $0,04$  і  $5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Яка з цих двох речовин є напівпровідником?
92. Чому полярне сьйво можна спостерігати тільки у верхніх шарах земної атмосфери?
93. У діоді електрон підлітає до анода зі швидкістю  $8 \text{ Мм/с}$ . Визначте анодну напругу ( $v_{0e} = 0$ ).

#### Рівень В

94. З міді виготовили різного перерізу, але однакової довжини й маси, провідники. Порівняйте їх опори.

95. Амперметр вимірює силу струму в електроплитці з відкритою спіраллю. Чи зміняться його покази, якщо сильно подути зверху: а) на амперметр; б) на електроплитку?
96. Чи може надпровідник проводити струми як завгодно великої сили?
97. До посудини з електролітом прикладено сталу напругу. Чи залежить сила струму в ній від температури?
98. Чи є обмеження на напругу, яку ми повинні прикласти до посудини з підкисленою водою, щоб розкласти воду на водень і кисень?
99. З якою метою металеві труби водовідводів приєднують до від'ємного полюса джерела струму?
100. Пояснити явище ударної йонізації в газах.
101. Якщо заряджену скляну паличку потримати над запаленою спиртівкою, то вона швидко втратить свій заряд. Чому?
102. До кінців кола, що складається з послідовно ввімкнених термістора та резистора опором  $750 \text{ Ом}$ , подали напругу  $20 \text{ В}$ . При кімнатній температурі сила струму в колі була  $10 \text{ мА}$ . Коли термістор занурили в гарячу воду, сила струму стала  $20 \text{ мА}$ . У скільки разів змінився опір термістора?
103. Який питомий опір повинна мати домішка алюмінію в кремнії (за масою, у відсотках), щоб концентрація дірок у ньому становила  $5 \text{ см}^{-3}$ ? Припустити, що в утворенні дірки бере участь кожен атом Алюмінію.

## ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

**Контрольні запитання**

1. Чи можуть силові лінії електричного поля: а) дотикатись; б) перетинатись; в) бути замкненими?
2. Чи однаково швидко зменшується напруженість поля з віддаленням від: а) точкового заряду; б) системи з двох таких самих різноіменних зарядів, розміщених поряд?
3. Як залежить від вибору точки відліку: а) потенціал певної точки поля; б) різниця потенціалів двох точок?
4. Як точковий заряд діє на мильні бульбашки в повітрі і на повітряні бульбашки у воді?
5. Чи зміниться ємність плоского конденсатора, якщо одна з його пластин паралельно зміститься?
6. Одна з пластин плоского конденсатора більша за другу. Яка з цих пластин набуде більшого заряду під час заряджання?
7. Які параметри впливають на максимальну робочу напругу конденсатора?
8. Яке з'єднання конденсаторів — послідовне чи паралельне — більше «боїться» пробою?
9. Чи можна підняти однією рукою сучасний конденсатор ємністю кілька фарад?
10. У чому неточність твердження: в замкненому електричному колі гальванічного елемента струм проходить у напрямі до нижчого потенціалу?
11. Щоб збільшити силу струму в колі у два рази, учень увімкнув послідовно замість одного два елементи з однаковою ЕРС. Чи досяг він мети?
12. Два провідники різних опорів вмикають у коло одного і того самого джерела постійного струму: одного разу послідовно, другого — паралельно. Чи однакові ККД джерела будуть в обох випадках, якщо внутрішній опір джерела дуже малий і ним можна знехтувати?

13. Метали мають велику електропровідність. Разом з тим у них велика теплопровідність. Поясніть цю закономірність.

14. 100 % -на сірчана кислота — рідина неелектропровідна. Проте розчин її у воді є добрим провідником струму. З'ясуйте причину цього.

15. Що — електрони чи йони — більш ефективні в процесі утворення лавин заряджених частинок під час ударної йонізації, що супроводить електричний розряд у газах? Чому?

16. Де сильніше зв'язані з ядрами атомів електрони: в металах чи напівпровідниках? Поясніть чому.

17. Чи будуть змінюватися під дією електричного поля імпульс і кінетична енергія дірок, як і електронів? Чому?



### Що я знаю і вмю робити

Я вмю пояснювати фізичні явища і процеси

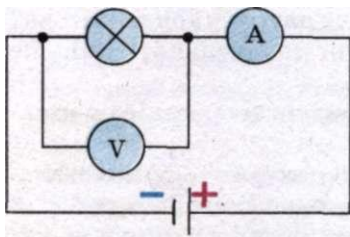
1. Яка вода — холодна чи кипляча — краще проводить струм?
2. Чи змінюється провідність розчинів електролітів від зниження їх температури?
3. Чи можна застосовувати електричну дугу для зварювання металів під водою?
4. Чи можна виготовити напівпровідниковий діод таким малим, щоб його не можна було побачити неозброєним оком?

Я знаю, як застосувати закони фізики

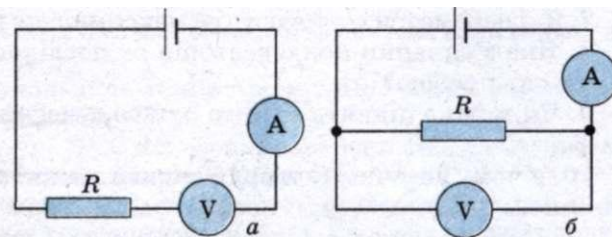
5. Чи виконуватиметься закон Ома для ділянки кола, опір якої пропорційний прикладеній напрузі?
6. За яких умов для сили струму, що проходить між двома електродами, розділеними газом, справджується закон Ома?
7. Який із видів самостійного розряду в газі можна описати законом Ома для зв'язку напруги і сили струму?

Я вмю використовувати схеми електричних кіл

8. Вольтметр показує напругу 12 В, амперметр — силу струму 1,2 А. Яку потужність споживає лампочка (мал. 49)?
9. Як правильно виміряти значення невідомого опору, маючи вольтметр, амперметр і джерело ЕРС з відомим внутрішнім опором (мал. 50, а, б)?



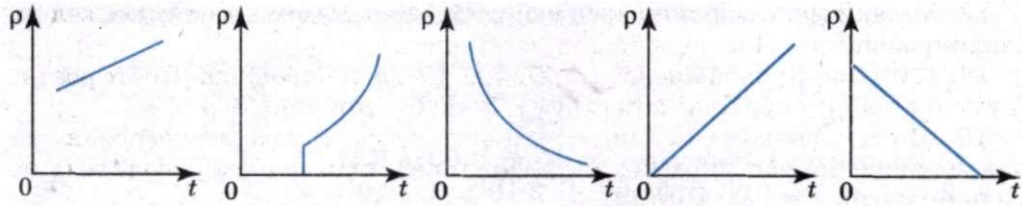
Мал. 49



Мал. 50

Я вмю читати графіки

10. На якому графіку зображено залежність питомого опору металевого провідника від температури при дуже низьких температурах?



Я знаю, як потрібно розв'язувати задачі

11. Конденсатор ємністю  $6 \text{ мкФ}$ , заряджений до напруги  $400 \text{ В}$ , з'єднали паралельно з незарядженим конденсатором ємністю  $19 \text{ мкФ}$ . Якою стала напруга на конденсаторах?

12. Заряд плоского конденсатора дорівнює  $17,7 \text{ нКл}$ , площа обкладок —  $10 \text{ см}^2$ , відстань між ними —  $3,5 \text{ мм}$ . Конденсатор заповнено слюдою. Визначте енергію електричного поля в конденсаторі.

13. Батарея з двох послідовно з'єднаних елементів з ЕРС  $2 \text{ В}$  і внутрішнім опором  $0,5 \text{ Ом}$  кожний замкнута на резистор опором  $3 \text{ Ом}$ . Визначте потужність струму в резисторі.

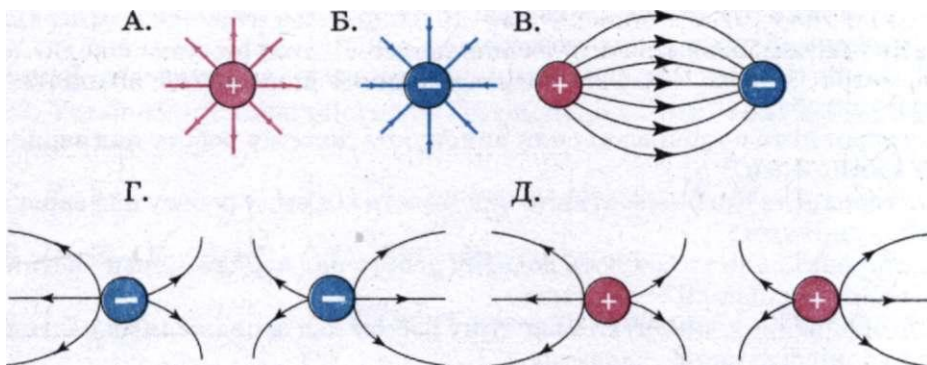
14. Якої площі поперечного перерізу треба взяти нікеліновий дріт завдовжки  $20 \text{ м}$ , щоб виготовити з нього нагрівник на  $220 \text{ В}$ , за допомогою якого можна нагріти  $2 \text{ л}$  води від  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до кипіння за  $10 \text{ хв}$  при ККД  $80\%$ ?

### ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

#### Варіант I

1. Основною ознакою електричного поля є силова дія на  
А. заряджені частинки. Б. молекули ідеального газу.  
В. магнітні полюси постійних магнітів. Г. нейтрони. Д. атоми хімічних елементів.

2. На якому малюнку електричне поле точкових зарядів зображено неправильно?



3. Як зміниться сила взаємодії двох точкових зарядів, якщо відстань між ними збільшити втричі?

А. Збільшиться у 3 рази. Б. Збільшиться у 6 разів. В. Зменшиться у 3 рази.  
Г. Зменшиться у 6 разів. Д. Зменшиться у 9 разів.



4. За якою формулою визначають енергію електричного поля зарядженого конденсатора?

А.  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ . Б.  $W = \frac{CU^2}{2}$ . В.  $E = \frac{U}{\Delta d}$ . Г.  $F = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$ . Д.  $E = \frac{F}{q}$ .

5. Скільки електронів утворює заряд  $0,00 \times 6$  Кл?

А.  $2 \cdot 10^{18}$ . Б.  $1,5 \cdot 10^{19}$ . В.  $5 \cdot 10^{18}$ . Г.  $3 \cdot 10^{19}$ . Д.  $1 \cdot 10^{16}$ .

6. На відстані 5 см дві частинки, що мають однакові за значенням заряди, притягуються в повітрі одна до одної з силою 20 мН. Визначте заряди частинок.

А. +74 нКл. Б. -74 нКл. В.  $\pm 74$  нКл. Г.  $\pm 74$  мКл. Д. +74 мкКл.

7. Визначте різницю потенціалів між двома точками електростатичного поля, якщо під час переміщення між ними заряду 4 мкКл сили поля виконали роботу 1 мДж.

А. 0,004 В. Б. 250 В. В. 25 В. Г. 4 кВ. Д. 2,5 В.

8. Який заряд накопичено в конденсаторі ємністю 2000 мкФ, зарядженому до напруги 20 В?

А. 100 Кл. Б. 0,4 Кл. В. 0,01 Кл. Г. 40 мКл. Д. 4 Кл.

9. Визначте енергію електричного поля конденсатора ємністю 2000 мкФ, приєднаного до полюсів джерела струму напругою 100 В.

А. 0,01 Дж. Б. 0,1 Дж. В. 1 Дж. Г. 10 Дж. Д. 100 Дж.

10. Установіть відповідність між назвами одиниць фізичних величин і позначеннями фізичних величин:

А. $U$ .	1. Фарад.
Б. $q$ .	2. Вольт.
В. $E$ .	3. Кулон.
Г. $C$ .	4. Ньютон на Кулон.

11. Електричний струм — це

А. упорядкований рух заряджених частинок.

Б. хаотичний рух заряджених частинок.

В. упорядкований рух атомів і молекул.

Г. хаотичний рух атомів і молекул.

Д. хаотичний рух вільних електронів.

12. Лампочка електричного ліхтарика працює від акумулятора. Всередині акумулятора

А. сторонні та кулонівські сили виконують додатну роботу над зарядженими частинками.

Б. сторонні та кулонівські сили виконують від'ємну роботу над зарядженими частинками.

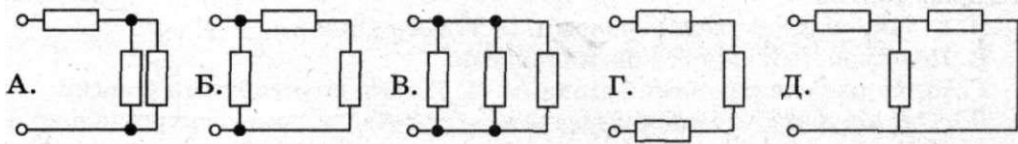
В. сторонні сили виконують додатну роботу над зарядженими частинками, а кулонівські сили — від'ємну.

Г. сторонні сили виконують від'ємну роботу над зарядженими частинками, а кулонівські сили — додатну.

Д. тільки кулонівські сили виконують від'ємну роботу над зарядженими

мі  $A. I = \frac{q}{t}$ . Б.  $I = \frac{U}{R}$ . В.  $I = \frac{P}{U}$ . Г.  $I = envS$ . Д.  $I = \frac{\epsilon}{R+r}$  — сили струму?

14. На якому з малюнків показано послідовне з'єднання трьох провідників?



15. Через резистор опором 1 кОм проходить струм силою 10 мА. Яку напругу прикладено до резистора?

А. 10 В. Б. 100 мВ. В. 100 В. Г.  $10^{-5}$  В. Д.  $10^5$  В.

16. Два резистори з опором 20 і 50 Ом з'єднали паралельно і увімкнули в мережу. Визначте відношення сил струмів у резисторах.

А. 0,8. Б. 0,5. В. 1. Г. 2. Д. 2,5.

17. Яка сила струму в електричній лампочці, якщо через її спіраль за 5 хв проходить заряд 135 Кл?

А. 4,5 А. Б. 0,45 А. В. 9 А. Г. 0,9 А. Д. 100 А.

18. Три провідники з однаковими опором по 10 Ом з'єднали так, як показано на схемі. Який загальний опір з'єднання?

А. 15 Ом. Б. 10 Ом. В. 30 Ом. Г. 50 м. Д. 20 Ом.

19. Яке значення зовнішнього опору, якщо генератор з ЕРС 230 В і внутрішнім опором 0,1 Ом подає в зовнішню частину кола напругу 220 В?

А. 2,2 Ом. Б. 3,3 Ом. В. 22 Ом. Г. 33 Ом. Д. 0,2 Ом.

20. В обмотці електричного двигуна, опір якої 0,75 Ом, сила струму 20 А. Яка кількість теплоти виділяється цією обмоткою за 1 хв роботи двигуна?

А. 15 Дж. Б. 300 Дж. В. 18 кДж. Г. 18 Дж. Д. 30 кДж.

21. Під час ремонту електроплитки її спіраль вкоротили вдвічі. Як змінилась потужність плитки, якщо напруга в мережі стала? Температуру розжарення спіралі вважати незмінною.

А. Збільшилась у 4 рази. Б. Зменшилась у 4 рази. В. Збільшилась у 2 рази. Г. Зменшилась у 2 рази. Д. Не змінилась.

22. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А.  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

Б.  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

В.  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ .

Г.  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{вт}}}{q}$ .

1. Закон Ома для повного кола.

2. ЕРС джерела струму.

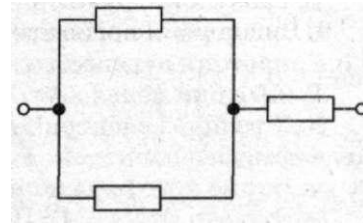
3. Опір  $n$  послідовно з'єднаних провідників.

4. Опір провідника.

23. Електричний струм в електролітах створюють

А. вільні електрони. Б. дірки і вільні електрони.

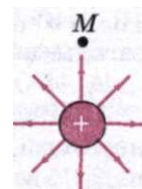
В. позитивні й негативні йони. Г. дірки. Д. протони.



24. Якими носіями електричних зарядів створюється струм у чистих напівпровідниках?  
 А. Тільки вільними електронами. Б. Тільки дірками.  
 В. Позитивними і негативними йонами.  
 Г. Вільними електронами і дірками. Д. Тільки позитивними йонами.
25. Сила струму в лампочці ліхтарика 0,32 А. Скільки електронів проходить через поперечний переріз нитки розжарення за 10 с?  
 А.  $2 \cdot 10^{18}$ . Б.  $2 \cdot 10^{19}$ . В.  $2 \cdot 10^{22}$ . Г.  $2 \cdot 10^{11}$ . Д.  $2 \cdot 10^9$ .
26. Чи отримаємо р-я-перехід, якщо впаяти олово у германій або у ванадій?  
 А. Так (в обох випадках). Б. Ні — для ванадію і так — для германію.  
 В. Ні (в обох випадках). Г. Ні — для германію і так — для ванадію.

## В а р і а н т II

1. При натиранні скляної пластинки шовком пластинка отримує позитивний заряд. При цьому  
 А. електрони переходять зі скла на шовк.  
 Б. електрони переходять із шовку на скло.  
 В. позитрони переходять із шовку на скло.  
 Г. протони переходять зі скла на шовк.  
 Д. протони переходять із шовку на скло.
2. У точці  $M$  електричного поля позитивного точкового заряду перебуває електрон. У якому напрямі почне рухатись електрон, якщо його початкова швидкість дорівнює нулю?  
 А. Від заряду. Б. Перебуватиме в стані спокою.  
 В. До заряду. Г. Навколо заряду. Д. По спіралі від заряду.
3. Як зміниться електроємність плоского повітряного конденсатора, якщо відстань між його обкладками (пластинами) збільшити у 2 рази?  
 А. Збільшиться у 2 рази. Б. Збільшиться у 4 рази.  
 В. Зменшиться у 2 рази. Г. Зменшиться у 4 рази. Д. Не зміниться.
4. За якою формулою визначають напруженість електричного поля?  
 А.  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ . Б.  $W = \frac{CU^2}{2}$ . В.  $E = \frac{U}{\Delta d}$ . Г.  $F = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$ . Д.  $E = \frac{F}{a}$ .
5. Визначте силу кулонівської взаємодії двох електронів, що знаходяться на відстані 1 м.  
 А.  $23 \cdot 10^{-28}$  Кл. Б.  $2,3 \cdot 10^{-27}$  Кл. В.  $2,3 \cdot 10^{-29}$  Кл. Г.  $2,3 \cdot 10^{-28}$  Кл. Д.  $2,3 \cdot 10^{-20}$  Кл.
6. Яка сила діє на точковий заряд 100 мкКл, розміщений в однорідному електричному полі з напруженістю 10 кВ/м?  
 А. 1 Н. Б. 100 Н. В. 10 кН. Г. 10 Н. Д. 0,1 Н.
7. Кулька, що має заряд  $+2 \cdot 10^{-6}$  Кл, у гасі притягує до себе заряджену пилінку із силою 4 мН. Визначте заряд пилінки, якщо відстань між кулькою і нею 2 см.  
 А. 0,19 нКл. Б. 1,9 нКл. В.  $-0,19$  нКл. Г.  $-1,9$  нКл. Д.  $-0,19$  мКл.
8. Чому дорівнює емність плоского повітряного конденсатора із площею пластин  $11,3 \text{ см}^2$ , які розташовані на відстані 1 мм одна від одної?  
 А. 8,85 мкФ. Б. 10 пФ. В. 100 пФ. Г. 11,3 мкФ. Д. 5,6 мкФ.
9. Яка електроємність батареї, що складається з двох паралельно з'єднаних однакових конденсаторів емністю по 10 мкФ?  
 А. 10 мкФ. Б. 5 мкФ. В. 20 мкФ. Г. 15 мкФ. Д. 25 мкФ.



10. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А.  $F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon R^2}$ .

1. Напруженість електричного поля.

Б.  $E = \frac{U}{\Delta d}$ .

2. Ємність плоского конденсатора.

В.  $W = \frac{CU^2}{2}$ .

3. Закон Кулона.

Г.  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ .

4. Енергія електричного поля.

11. Вкажіть неправильне твердження:

А. Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику внаслідок проходження в ньому струму, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму.

Б. При послідовному з'єднанні провідників їхній загальний опір дорівнює сумі опорів цих провідників.

В. При послідовному з'єднанні провідників кількість теплоти, що в них виділяється, обернено пропорційна до опорів цих провідників.

Г. Загальний опір кількох паралельно з'єднаних провідників менший за опір будь-якого з цих провідників.

Д. При паралельному з'єднанні провідників напруга на кожному з них однакова.

12. Якими носіями електричних зарядів створюється струм у металах?

А. Вільними електронами і позитивними йонами.

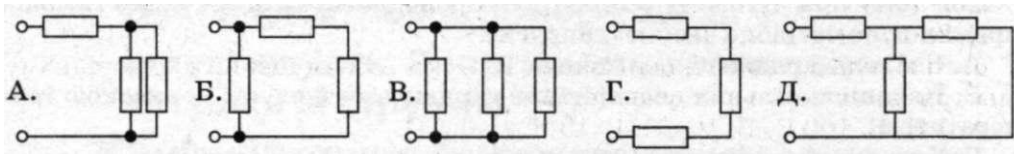
Б. Позитивними і негативними йонами. В. Вільними електронами.

Г. Негативними йонами. Д. Позитивними йонами.

13. Яке з математичних співвідношень відповідає закону Ома для повного кола?

А.  $I = \frac{q}{t}$ . Б.  $I = \frac{U}{R}$ . В.  $I = \frac{P}{U}$ . Г.  $I = envS$ . Д.  $I = \frac{\epsilon}{R+r}$ .

14. На якому з малюнків показано паралельне з'єднання трьох провідників?



15. Три резистори з опорами 100 Ом з'єднані послідовно. Чому дорівнює їх загальний опір?

А. 66,67 Ом. Б. 33,33 Ом. В. 100 Ом. Г. 0,33 Ом. Д. 300 Ом.

16. Два резистори з опорами 20 і 50 Ом з'єднали паралельно і увімкнули в мережу. Визначте відношення сил струмів у резисторах.

А. 0,8. Б. 0,5. В. 1. Г. 2. Д. 2,5.

17. ЕРС джерела 100 В. При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі дорівнює 2 А. Визначте внутрішній опір джерела.

- А. 0,1 Ом. Б. 1 Ом. В. 10 Ом. Г. 100 Ом. Д. 0,01 Ом.
18. Провідником з опором 1,5 Ом протягом 4 с проходить заряд 12 Кл. Яку роботу виконує електричний струм, що проходить провідником?
- А. 20 Дж. Б. 5,4 Дж. В. 2 Дж. Г. 54 Дж. Д. 3кДж.
19. У школі одночасно світиться 40 ламп по 60 Вт, 20 ламп по 100 Вт і 11 ламп по 40 Вт. Визначте силу струму в спільній частині кола для напруги 220 В.
- А. 2 А. Б. 5,6 А. В. 10 А. Г. 56 А. Д. 22 А.
20. Як зміниться кількість теплоти, яка виділяється в електрочайнику, якщо опір його спіралі зменшити вдвічі, а силу струму вдвічі збільшити?
- А. Збільшиться у 4 рази. Б. Зменшиться у 2 рази.  
В. Збільшиться у 2 рази. Г. Зменшиться у 4 рази. Д. Не зміниться.
21. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і фізичними величинами:
- |                       |        |
|-----------------------|--------|
| А. Сила струму.       | 1. Ом. |
| Б. ЕРС.               | 2. А.  |
| В. Опір.              | 3. Кл. |
| Г. Електричний заряд. | 4. В.  |
22. Електричний струм у напівпровідниках створюють:
- А. Вільні електрони. Б. Дірки і вільні електрони. В. Позитивні і негативні йони. Г. Дірки. Д. Протони.
23. Що таке електролітична дисоціація?
- А. Процес розпаду молекул розчиненої речовини на окремі йони під впливом електричного поля полярних молекул води.  
Б. Процес розпаду молекул розчиненої речовини на окремі йони внаслідок проходження струму через електроліт.  
В. Розпад молекул розчиненої речовини під впливом електричного поля, яке створює джерело струму.  
Г. Явище руху позитивних і негативних йонів електроліту у протилежні боки під впливом електричного поля.  
Д. Процес проходження струму в електроліті.
24. Через поперечний переріз нитки розжарення електролампочки пройшло  $1\text{Д}\cdot 10^{21}$  електронів за 15 хв. Який заряд пройшов через лампочку за цей час?
- А. 180 Кл. Б. 3 Кл. В. 0,5 Кл. Г. 2000 Кл. Д. 0,018 Кл.
25. Чому при дуговому розряді для проходження струму через газовий проміжок не потрібно високої напруги?
- А. Є вільні заряджені частинки.  
Б. Наявність вільних електричних зарядів забезпечується високою температурою.  
В. Електроди йонізують навколо себе газ.  
Г. Наявність носіїв заряду забезпечується електронною емісією.
26. Чому для зменшення втрат електроенергії на коронний розряд у лініях електропередачі високої напруги застосовують дроти якомога більшого діаметру?
- А. Щоб збільшити інтенсивність йонізації.  
Б. Щоб збільшити напруженість поля.  
В. Щоб зменшити інтенсивність йонізації і збільшити напруженість поля.  
Г. Щоб зменшити інтенсивність йонізації і напруженість поля.



- **Взаємодія струмів. Магнітне поле.  
Дія магнітного поля на провідник зі струмом**
- **Індукція магнітного поля.  
ПОТІК магнітної індукції**
- **Сила Ампера. Сила Лоренца**
- **Магнітні властивості речовини.  
Магнітний запис інформації**
- **Електромагнітна індукція.  
Закон електромагнітної індукції**
- **Індуктивність. Енергія магнітного поля  
катушки зі струмом**
- **Змінний струм. Генератор змінного струму**
- **Трансформатор. Виробництво, передача  
та використання енергії електричного струму**

## § 12. ВЗАЄМОДІЯ СТРУМІВ. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВІДНИК ЗІ СТРУМОМ

Вам уже відомо, що між нерухомими електричними зарядами діють сили, які визначаються за законом Кулона. Ця взаємодія відбувається так: кожний із зарядів створює електричне поле; поле одного заряду діє на другий заряд і навпаки. Проте між електричними зарядами можуть діяти сили й іншої природи. Взаємодії між провідниками зі струмом, тобто взаємодії між рухомими електричними зарядами, називають магнітними.

Учення про магніти та їх взаємодію тривалий час розвивалося відокремлено, як одна із галузей науки, аж поки низка відкриттів і теоретичних досліджень у ХІХ ст. не довела органічний зв'язок магніта з електрикою.

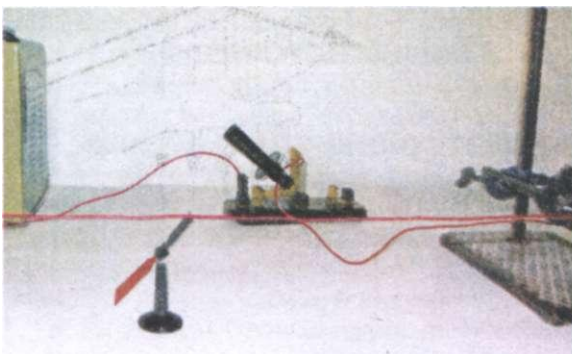
Одним із фундаментальних доведень єдності електричних і магнітних явищ є результат дослідів Г.-К. Ерстеда, датського фізика, який у 1820 р. виявив, що магнітна стрілка змінює своє положення поблизу провідника зі струмом (мал. 51).

Очевидним було те, що причиною цього є електричний струм — напрямлений рух заряджених частинок у провіднику.

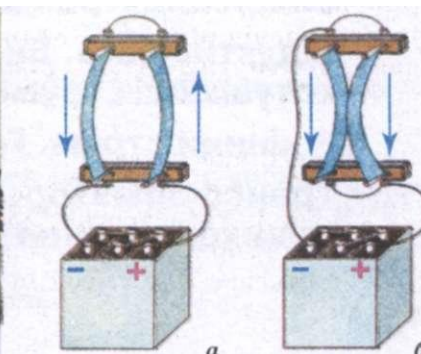
Магнітні явища хоча й пов'язані з електричними, проте не тотожні їм. Це також підтверджується дослідями. Якщо взяти два довгі паралельні провідники і приєднати їх до джерела струму, то ми побачимо, що провідники, по яких струм тече у різних напрямках, відштовхуються один від одного (мал. 52, а), а коли у провідниках струм проходить в одному напрямі, вони притягуються один до одного (мал. 52, б).

Електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне поле, яке діє на струм у другому провіднику. Поле, створене електричним струмом другого провідника, діє на перший.

Отже, подібно до того, як у просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, існує електричне поле, у просторі, що оточує струми, існує поле, яке називають магнітним.



Мал. 51



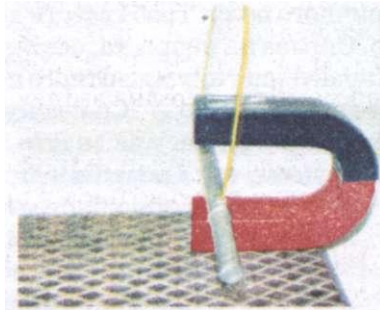
Мал. 52

Взаємодію між провідниками зі струмом, тобто взаємодію між рухомими електричними зарядами, називають магнітною. Сили, з якими провідники зі струмом діють один на одного, називають магнітними силами.

Магнітне поле — це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між рухомими електрично зарядженими частинками.

Магнітне поле має такі особливості, які відрізняють його від інших полів: магнітне поле завжди зв'язане з рухом заряджених частинок або тіл; магнітне поле діє на рухомі заряджені частинки або тіла.

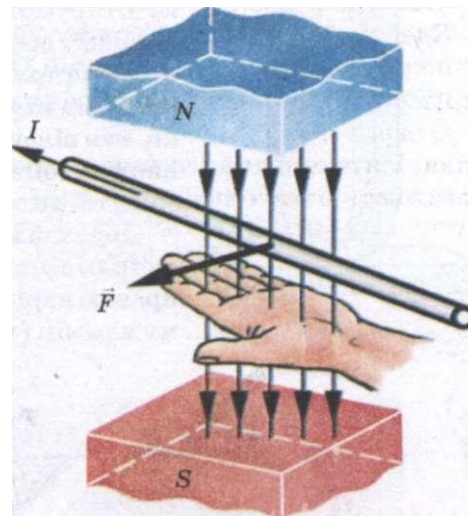
Ви вже знаєте, що два провідники зі струмом взаємодіють один з одним. Це явище пояснюється тим, що сила, яка діє на кожний з провідників, зумовлена магнітним полем, створеним струмом другого провідника. Тому зрозуміло, що коли ми помістимо провідник зі струмом у магнітне поле, наприклад в поле постійного магніту, то на нього діятиме сила. Перевіримо це на досліді. Замкнувши коло, пропустимо струм по вільно підвішеному провіднику, що перебуває в магнітному полі підковоподібного магніту. Ми помітимо, що провідник почне рухатися (мал. 53).



Мал. 53

Якщо ж забрати магніт, то провідник зупиниться. Отже, з боку магнітного поля на провідник зі струмом діє сила  $F$  так само, як діє сила з боку магнітного поля на магнітну стрілку. Змінюючи напрям струму або напрям силових ліній магнітного поля, ми помічаємо, що змінюється і напрям руху провідника, а отже, і напрям сили, що діє на провідник.

Напрямок сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, можна визначити, користуючись правилом лівої руки. Руку розміщують так, щоб силові лінії поля входили в долоню, а чотири пальці збігалися з напрямом струму у провіднику, тоді великий палець, відігнутий на  $90^\circ$ , покаже напрям сили, що діє на провідник (мал. 54).



Мал. 54

Рух провідника зі струмом у магнітному полі дуже широко застосовується в техніці: в електродвигунах, у вимірювальних приладах з котушкою, що обертається, і в багатьох інших пристроях.



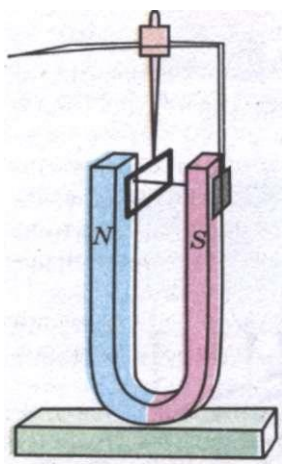
### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які взаємодії називають магнітними і в чому їх відмінність від електростатичних взаємодій?
2. Які досліди підтверджують існування магнітного поля?
3. Які сили називаються магнітними?
4. Що таке магнітне поле?
5. Як визначити напрям руху провідника зі струмом у магнітному полі?

## § 13. ІНДУКЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ. ПОТІК МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Електричне поле характеризується векторною величиною — напруженістю електричного поля. Треба ввести величину, що характеризує магнітне поле кількісно. Справа ця не проста, оскільки магнітні взаємодії складніші за електричні. Характеристику магнітного поля називають вектором магнітної індукції і позначають літерою  $B$ . Спочатку ми розглянемо лише напрям вектора  $B$ .

З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що магнітне поле створюється як електричним струмом, так і постійними магнітами. Якщо між полюсами підковоподібного магніту підвісити на гнучких дротах рамку зі струмом, то вона повертатиметься доти, поки її площина не встановиться перпендикулярно до ліній, які напрямлені від північного полюса магніту до південного (мал. 55).

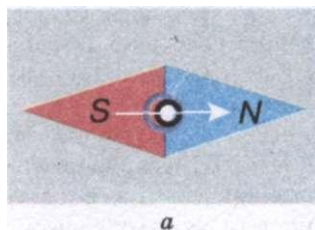


Мал. 55

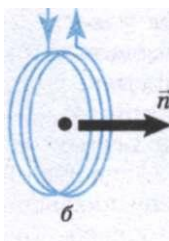
Отже, дія магнітного поля є дією, що орієнтує рамку зі струмом. Це можна використати для визначення напрямку вектора магнітної індукції.

За напрям вектора магнітної індукції беруть напрям від південного полюса  $S$  до північного  $N$  стрілки, яка вільно встановлюється в магнітному полі. Цей напрям збігається з напрямом додатної нормалі до замкнутого контуру зі струмом (мал. 56, *а*, *б*).

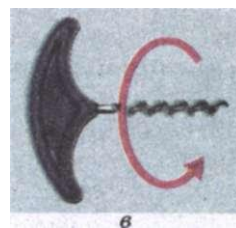
Додатна нормаль, якщо її порівняти зі свердликом, напрямлена у той бік, куди пересувається свердлик з правою нарізкою, якщо його обертати у напрямі струму в рамці (мал. 56, *в*).



а

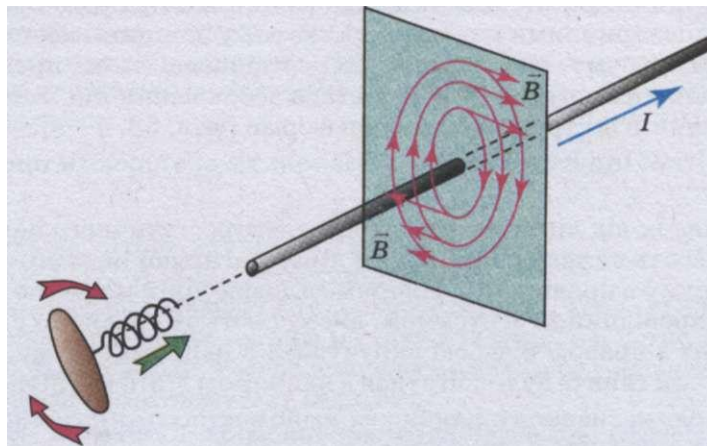


б



в

Мал. 56



Мал. 57

Маючи рамку зі струмом або магнітну стрілку, можна визначити напрям вектора магнітної індукції в будь-якій точці поля. У магнітному полі прямолінійного провідника зі струмом магнітна стрілка встановлюється по дотичній до кола (мал. 57).

Площина кола перпендикулярна до провідника, а його центр лежить на осі провідника. Напрямок вектора магнітної індукції встановлюють за допомогою правила свердлика. Правило свердлика формулюється так: якщо напрям поступального руху свердлика збігається з напрямом струму в провіднику, то напрям обертання ручки свердлика збігається з напрямом вектора магнітної індукції.

Подібно до того як електричні поля графічно зображують за допомогою ліній електричних силових ліній, магнітні поля зображують за допомогою ліній магнітної індукції (або магнітних силових ліній).

**Лінії магнітної індукції — це уявні лінії, дотичні до яких у даній точці збігаються за напрямом з вектором  $\vec{B}$  у цій точці.**

Лінії магнітної індукції можна зробити «видимими» за допомогою залізнних ошурок. Якщо на скляну пластинку, крізь яку пропущено прямий провідник зі струмом, насипати залізнних ошурок і злегка постукати по пластинці, то вони розмістяться вздовж силових ліній (мал. 58, а—в).



Мал. 58

З дослідів випливає, що лінії магнітної індукції прямого провідника зі струмом є концентричними колами, які лежать у площині, перпендикулярній до напрямку струму. Центри цих кіл розташовані на осі провідника. За допомогою залізних ошурок можна дістати зображення ліній магнітної індукції провідників із струмом будь-якої форми (мал. 58, а–в).

**Лінії магнітної індукції завжди замкнені та охоплюють провідники зі струмами.**

Це відрізняє їх від ліній напруженості електростатичного поля. Магнітні поля називають **вихровими**. Напрямок ліній магнітної індукції зв'язаний з напрямком струму в провіднику. Напрямок силових ліній магнітного поля, що створюється провідником зі струмом, визначають за правилом свердлика.

Якщо гвинт з правою різьбою вкручувати в напрямку струму, то напрям обертання ручки гвинта буде збігатися з напрямком ліній магнітної індукції.

**Магнітне поле називають однорідним, якщо вектори магнітної індукції в усіх його точках однакові ( $\vec{B} = \text{const}$ ).**

Прикладом однорідного магнітного поля може бути поле всередині **соленоїда** — котушки, довжина якої значно більша за її діаметр (мал. 58, в). Лінії магнітної індукції однорідного поля паралельні, і їх густина скрізь однакова.

З'ясуємо, від чого залежить сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі. Це нам потрібно для того, щоб дати визначення модуля вектора магнітної індукції.

Горизонтально підвішений провідник перебуває в полі постійного підковподібного магніту. Поле магніту зосереджено в основному між полюсами, тому магнітна сила діє практично лише на частину провідника довжиною  $\Delta l$ , розміщену безпосередньо між полюсами. Силу вимірюють за допомогою спеціального динамометра, зв'язаного з провідником. Вона напрямлена горизонтально перпендикулярно до провідника і ліній магнітної індукції. Збільшуючи силу струму в 2 рази, можна помітити, що й сила, яка діє на провідник, також збільшується в 2 рази. Візьмемо ще один магніт і в 2 рази збільшимо розміри області, де існує магнітне поле, і тим самим у 2 рази збільшимо довжину частини провідника, на яку діє магнітне поле. При цьому сила також збільшиться в 2 рази. І, нарешті, сила залежить від кута, утвореного вектором  $\vec{B}$  з провідником. У цьому можна впевнитися, змінюючи нахил підставки, на якій встановлено магніти, так, щоб змінився кут між провідником і лініями магнітної індукції. **Сила досягне максимального значення  $\vec{F}_{\text{max}}$ , коли вектор магнітної індукції буде перпендикулярним до провідника.**

Отже, максимальна сила, що діє на відрізок провідника довжиною  $\Delta l$ , по якому проходить струм силою  $I$ , прямо пропорційна добутку сили струму на довжину відрізка  $\Delta l$ :

$$\vec{F}_{\text{max}} \sim I \Delta l.$$

Цей дослідний факт можна використати для визначення модуля вектора магнітної індукції. Дійсно, оскільки  $\vec{F}_{\text{max}} \sim I \Delta l$ , то відношення  $\frac{\vec{F}_{\text{max}}}{I \Delta l}$  не за-

лежатиме ні від сили струму в провіднику, ні від довжини відрізка провідника. Саме тому це відношення може характеризувати магнітне поле в тому місці, де знаходиться відрізок провідника.

Модулем вектора магнітної індукції називають відношення максимальної сили, що діє з боку магнітного поля на відрізок провідника зі струмом, до добутку сили струму на довжину цього відрізка:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_{\max}}{I\Delta l}.$$

Одиницею магнітної індукції в СІ є одна тесла (**1 Тл**). **1 Тл = 1 Н/1 А · 1 м**. Ця одиниця названа на честь відомого югославського електротехніка Н. Тесла (1857—1943).

Одною з характеристик вектора магнітної індукції є її потік. Магнітний потік позначають літерою  $\Phi$ . Розглянемо плоску пластинку площею  $\Delta S$ , розміщену в однорідному магнітному полі (мал. 59).

**Магнітним потоком  $\Phi$  крізь поверхню  $\Delta S$**  називають фізичну величину, яка визначається добутком  $B_n$  (проекції вектора магнітної індукції на нормаль до поверхні) і площею цієї поверхні:

$$\Phi = B_n \Delta S \cos \alpha,$$

де  $\alpha$  — кут між напрямом нормалі  $\vec{n}$  і вектором індукції  $\vec{B}$ .

Оскільки  $B_n = B \cos \alpha$  — величина скалярна, то скаляром є і магнітний потік.

**Магнітний потік  $\Phi$**  характеризує кількість ліній магнітної індукції, що проходять крізь дану поверхню.

Для однорідного поля і плоскої поверхні, що перпендикулярна до вектора  $\vec{B}$ ,  $B_n = B = \text{const}$ , маємо

$$\Phi = BS.$$

Одиницею магнітного потоку в СІ є один вебер (**1 Вб**).

1 вебер — потік через плоску поверхню площею **1 м<sup>2</sup>**, розміщену перпендикулярно до силових ліній однорідного магнітного поля, індукція якого дорівнює 1 Тл:

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

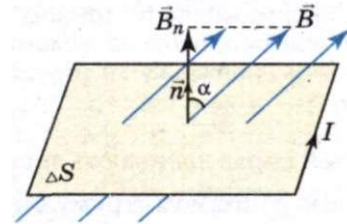
### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення модуля вектора магнітної індукції.
2. Що таке лінії магнітної індукції?
3. Що таке магнітний потік?
4. Які одиниці індукції магнітного поля і магнітного потоку в СІ?

## **§ 14.** СИЛА АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА

Одним із проявів магнітного поля є його силова дія на рухомі електричні заряди і провідники зі струмом. У 1820 р. А. Ампер установив закон, який визначає силу, що діє на відрізок провідника зі струмом в магнітному полі.

Оскільки створити відокремлений елемент струму не можна, то Ампер вивчав поведінку рухомих дрютяних замкнених контурів різної форми. Він установив, що



Мал. 59

на провідник зі струмом, вміщений в однорідне магнітне поле, індукція якого  $B$ , діє сила, пропорційна довжині відрізка провідника  $\Delta l$ , силі струму  $I$ , який проходить по провіднику, та індукції магнітного поля  $B$ :

$$F_A = BI\Delta l \sin \alpha,$$

цей вираз називають законом Ампера, а силу — силою Ампера. Тут  $\alpha$  — кут між напрямом струму в провіднику і напрямом вектора  $\vec{B}$ . Ця сила буде мати максимальне значення при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Якщо ж провідник розміщено уздовж ліній магнітної індукції, то ця сила дорівнює нулю.

Напрямок сили Ампера визначається за допомогою правила лівої руки, з яким ви ознайомилися раніше (див. мал. 54).

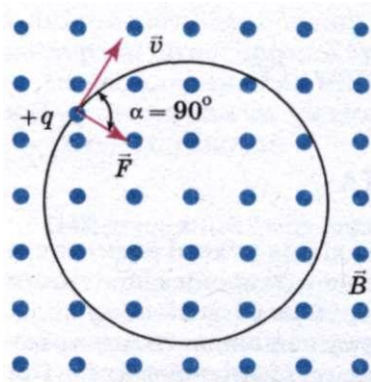
Як ми вже з'ясували, магнітне поле взаємодіє лише з провідниками, через які тече струм, і не впливає на провідники без струму. Це свідчить про те, що магнітне поле діє не на матеріал провідника, а на заряджені частинки (електрони чи йони), які в ньому переміщуються. В такому випадку сила Ампера є результуючою всіх сил, які діють на окремі рухомі заряджені частинки.

Визначимо силу, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі. Нехай на провідник довжиною  $l$ , по якому тече струм силою  $I$  і який знаходиться в магнітному полі з індукцією  $B$ , діє сила  $F_A = BI l \sin \alpha$ . Але сила струму визначається за формулою  $I = envS$ . Тоді  $F_A = nevSB l \sin \alpha$ , де добуток  $Sl$  — об'єм провідника,  $N = nSl$  — кількість заряджених частинок, які рухаються в цьому провіднику. Тоді силу, яка діє на одну рухому частинку, можна визначити, поділивши силу  $F_A$ , яка діє на всі частинки, на загальну кількість рухомих заряджених частинок  $N$ :

$$F_{\text{Л}} = \frac{F_A}{N} = evB \sin \alpha.$$

Отже, сила, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, пропорційна заряду частинки, швидкості її переміщення та індукції магнітного поля:

$$F_{\text{Л}} = evB \sin \alpha.$$



Мал. 60

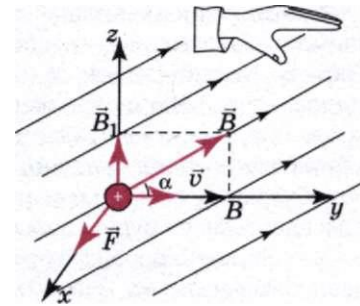
Цю формулу вперше одержав голландський фізик Г. Лоренц, і тому її звичайно називають формулою Лоренца, а силу, яка обчислюється за цією формулою, називають силою Лоренца.

З формули випливає, що сила Лоренца залежить від кута між напрямом руху зарядженої частинки і напрямом вектора індукції магнітного поля. Магнітне поле не діє на нерухомі заряджені частинки ( $F_{\text{Л}} = 0$  при  $v = 0$ ) і на частинки, які рухаються вздовж ліній індукції поля ( $\sin \alpha = 0$ ). Сила Лоренца буде максимальною, якщо частинка влітає в магнітне поле перпендикулярно до ліній його індукції. У цьому випадку  $F_{\text{Л}} = evB$ . Якщо поле однорідне ( $B = \text{const}$ ), то за-

ряджена частинка описуватиме коло (мал. 60), оскільки рух під дією сталої сили, напрямленої під прямим кутом до швидкості руху, згідно з другим законом динаміки, іншим бути не може.

Напрямок сили Лоренца, як і сили Ампера, визначається за правилом лівої руки:

якщо ліву руку розмістити так, щоб складова магнітної індукції  $\vec{B}$ , перпендикулярна до швидкості руху заряду, входила в долоню, а випрямлені чотири пальці були напрямлені за рухом позитивного заряду (проти руху негативного), то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець покаже напрям сили Лоренца  $\vec{F}_L$ , яка діє на заряд, вміщений у магнітне поле (мал. 61).



Мал. 61

При цьому потрібно пам'ятати, що це справедливо для позитивно заряджених частинок. Якщо визначається напрям сили Лоренца, що діє на електрон (чи іншу негативно заряджену частинку), то при застосуванні правила потрібно змінювати напрям швидкості руху на протилежний.

Дія сили Лоренца застосовується в багатьох приладах і технічних установках. Так, зміщення електронного променя, що «малює» зображення на екрані кінескопа телевізора чи дисплея комп'ютера, здійснюється магнітним полем спеціальних котушок, в яких проходить електричний струм, що змінюється за певним законом. У наукових дослідженнях використовуються так звані циклічні прискорювачі заряджених частинок, в яких магнітне поле потужних електромагнітів утримує заряджені частинки на колових орбітах.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення сили Ампера.
2. Як визначається сила Лоренца?
3. За якими правилами визначається напрям сили Ампера і сили Лоренца? Що потрібно при цьому враховувати?



### Це цікаво знати

#### Дослідження магнітного поля струму

**1. «Правило плавця».** У 1820 р. у Женеві на зборах натуралістів **Араго** побачив повторення дослідів Ерстеда. І, повернувшись до Франції, вирішив ознайомити із ними своїх співвітчизників. Для цього він сконструював нехитру установку з вольтовим стовпом і продумав хід експериментів.

Щоб стрілка компаса легше оберталася, він загострив опорну голку, увімкнув струм, і магнітна стрілка почала відхилятися срібним провідником зі струмом від свого напрямку. Але що це? Араго протирає срібний провідник і знімає з нього приліплені металеві ошурки. Потім кладе провідник знову на стіл, і ошурки відразу ж прилипають до нього... Араго вимикає струм, і ошурки осипаються зі срібного провідника, вмикає — вони обліплюють провідник, немов би срібло стало магнітом! Щасливе відкриття, значення якого Араго зрозумів відразу.

У той момент, коли Араго закінчив дослід, почувся стукіт у двері. Араго виглянув у вікно і побачив Ампера — академік Андре Марі Ампер — найгеніальніший і найрозсіяніший з його друзів. Вигляд Ампера свідчив проте, що вчений вже давно вишов із дому, бродячи вулицями Парижа і міркуючи над своїми геніальними відкриттями.

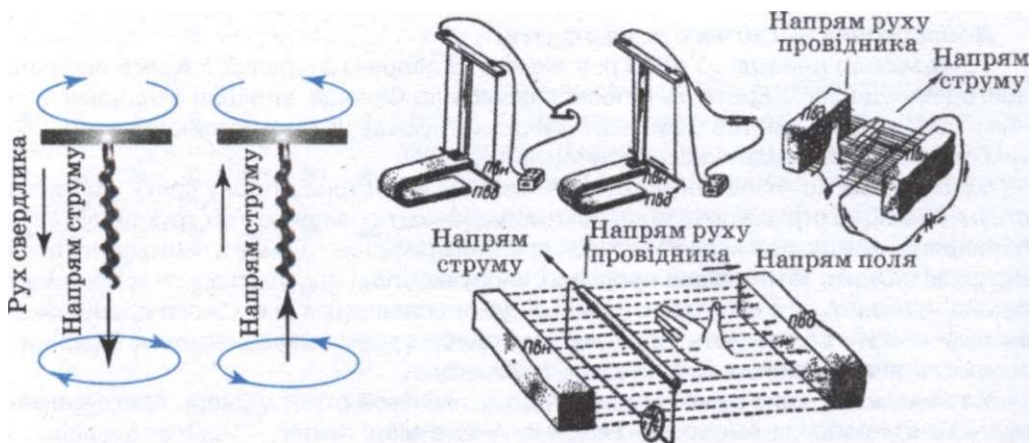
Ампер увійшов до кімнати, де Араго проводив свої досліди. «Я бачу, що Ви займаєтесь гальванічними дослідами», — зауважив Ампер. «Ви праві. Я відтворив дослід Ерстеда, і, як мені здається, натрапив на нове явище. Можливо воно зацікавить Вас», — відповів Араго. Він знову замикає коло і наближує провідник до ошурків, які обліплюють провідник, а коли вимикає струм, то ошурки висипаються на долоні Ампера. Радісний вчений вигукує: «Прекрасно, це лише зайвий раз доводить, що я правий. Заряди, які перебувають у спокої, не взаємодіють із магнітною стрілкою!» Ампер продовжує: «А як Вам здається, чи будуть взаємодіяти два провідники зі струмом, як магніти?»

Не очікуючи відповіді, Ампер виходить із помешкання Араго, у нього в голові визріває нова геніальна думка. Вчений крокує набережною Сени, перебуваючи у такому радісному та щасливому стані, який буває лише тоді, коли стає зрозумілим те, над чим довго і на-полегливо працюєш і думаєш. Раптом Ампер звертає увагу на хлопчиків, які у річці плавали за течією, весело перегукуючись, і тут вченому приходить у голову геніальна думка про просте правило, за допомогою якого можна завжди визначити відхилення магнітної стрілки електричним струмом. Він вирішив назвати це правило «правилом плавця». Якщо людина буде плести за течією, напрям якої збігається з напрямом струму, то плавець завжди буде бачити, що північний кінець магнітної стрілки відхиляється під дією цього струму вправо. Браво Ампер! Вчений оглянувся: як добре було б усе це накреслити тут, поставити стрілки, визначити напрями. Ось і кусочок крейди знайшовся у кишені, а ось і чорна дошка. Перехожі парижани почали здивовано обертатися на літнього (не дуже охайно одягнутого) джентльмена, який із великим захопленням розмальовував крейдою ... задню стінку чорної карети. 18 червня 1820 р. на засіданні Паризької академії наук А. Ампер розпочав свою знамениту серію доповідей із електромагнетизму.

## 2. «Правило свердлика».

На мал. 62 схематично проілюстровано «правило свердлика», відкрите Дж. Максвеллом. Гвинт рухається вниз за годинниковою стрілкою (точки зору спостерігача, який дивиться в напрямі поступального руху). Такий самий напрям має магнітний потік, що викликає коловий струм.

3. «Правила правої та лівої руки». До двох правил, відкритих Ампером («правило плавця») та Максвеллом («правило свердлика») англійський вчений, фізик та електротехнік **Д. Флемінг** додав два інші: «правила правої та лівої руки» для визначен-



Мал. 62

Мал. 63

ня напряму струму, магнітного поля і напряму руху провідника під впливом магнітного поля. На мал. 63 надано схему, що ілюструє ці два правила Флемінга.

На верхньому малюнку сила взаємодії полів магніту і провідника зі струмом приводить магніт у рух. Напрямок руху провідника визначається за «правилом лівої руки» (двигун), на нижньому малюнку напрям електрорушійної сили, індукованої у замкнутому контурі при його переміщенні у магнітному полі, визначається за «правилом правої руки» (генератор).

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. Які із заряджених космічних частинок — з більшою чи меншою швидкістю руху, — що пролітають поблизу екваторіальної площини Землі, найближче проникають до її поверхні? Чому?

Розв'язання

Оскільки радіус кола, яке описує заряджена частинка в магнітному полі,  $r \sim v$ , то найближче до Землі підлетять найшвидші частинки.

2. Прямий дрід довжиною 10 см, по якому тече струм 0,5 А, розміщений в однорідному магнітному полі перпендикулярно до силових ліній. Визначте індукцію магнітного поля, якщо воно діє на дрід силою 2,6 мН.

Розв'язання

Сила, з якою однорідне магнітне поле діє на прямий провідник, визначається за формулою Ампера  $F_A = BIl \sin \alpha$ .

$$\text{Звідси визначимо } B = \frac{F}{Il \sin \alpha}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо  $B = 52$  мТл.

3. Протон, проходячи прискорюючу різницю потенціалів 400 В, влетів в однорідне магнітне поле з індукцією 0,2 Тл і почав рухатися по колу. Визначте радіус кола, по якому він рухався.

Розв'язання

На заряджену частинку, яка влетіла в магнітне поле діє сила Лоренца

$$F_L = qvB \sin \alpha.$$

За умовою задачі протон рухається по колу, тоді сила Лоренца є доцентровою силою  $F = \frac{mv^2}{R}$ . Отже,  $qvB = \frac{mv^2}{R}$ , звідки  $R = \frac{mv}{qB \sin \alpha}$ .

Протон отримав швидкість, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів. За законом збереження енергії, робота, яку виконує поле при переміщенні протона, дорівнює кінетичній енергії, набутій протоном, тобто,  $A = E_k = \frac{mv^2}{2}$ . А робота сил

електричного поля при переміщенні заряду визначається за формулою  $A = qU$ . Тоді  $qU = \frac{mv^2}{2}$ , звідки  $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ .

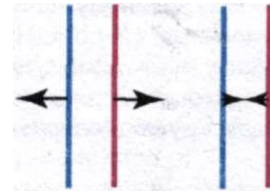
Отже, радіус кола, по якому рухався протон, визначимо за формулою  $R = \frac{\sqrt{2qUm}}{qB \sin \alpha}$ .

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо  $R = 1,45$  см.

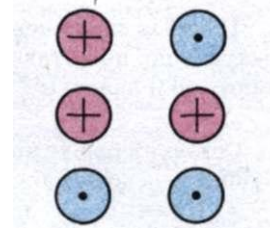


## Рівень А

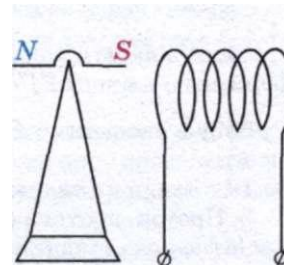
104. Які напрями має струм у проводах, коли сили взаємодії напрямлені так, як на мал. 64?
105. Як взаємодіють паралельні струми, напрямлені так, як зображено на мал. 65?
106. Позначте знаками «+» та «-» полюси джерела струму, яке живить соленоїд, щоб спостерігалася показана на мал. 66 взаємодія.
107. Яка індукція магнітного поля, що діє силою 50 мН на провідник довжиною 5 см, по якому тече струм силою 2,5 А, напрямлений перпендикулярно до ліній магнітної індукції?
108. Яка довжина активної частини провідника, якщо при силі струму в ньому 4 А на нього діє силою 0,2 Н магнітне поле, індукція якого 0,5 Тл? Напрями струму і поля взаємно перпендикулярні.
109. Якої сили струм тече провідником довжиною 40 см, вміщеним у магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції, якщо магнітне поле з індукцією 1 Тл діє на провідник з силою 0,8 Н?
110. Яка сила діє на провідник довжиною 10 см в однорідному магнітному полі, якщо його магнітна індукція становить 2,6 Тл, а сила струму у провіднику дорівнює 12 А. Кут між напрямом струму і лініями індукції: 1)  $90^\circ$ ; 2)  $30^\circ$ ?
111. На провідник довжиною 50 см із струмом силою 20 А, розміщений в однорідному магнітному полі, що має магнітну індукцію 0,1 Тл, діє сила 0,5 Н. Визначте кут між напрямом струму в провіднику і вектором магнітної індукції.
112. Яка сила струму в провіднику довжиною 20 см, розташованому в однорідному полі, що має магнітну індукцію 2 Тл, коли сила, яка діє на провідник, дорівнює 0,75 Н, а кут між напрямом ліній магнітної індукції і струму дорівнює  $49^\circ$ ?
113. Який магнітний потік пронизує плоску поверхню площею  $50 \text{ см}^2$  при індукції поля 0,4 Тл, якщо ця поверхня: а) перпендикулярна до вектора індукції поля; б) розташована до вектора індукції під кутом  $45^\circ$ ;  $30^\circ$ ?
114. Магнітний потік у середині контуру, площа поперечного перерізу якого  $60 \text{ см}^2$ , становить 0,3 мВб. Визначте індукцію поля в середині контуру. Вважати, що поле однорідне.
115. Визначте магнітний потік, що пронизує плоску прямокутну площину завдовжки 60 см і завширшки 25 см, якщо магнітна індукція в усіх її точках дорівнює 1,5 Тл, а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до цієї площини кут  $90^\circ$ .
116. Визначте знак заряду частинки за напрямом її руху і напрямом сили Лоренца (мал. 67 і 68).
117. Швидкість електрона  $e$  напрямлена до нас (мал. 69). А. В якому напрямі відхилиться електрон під дією маг-



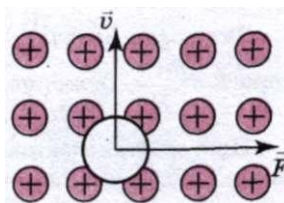
Мал. 64



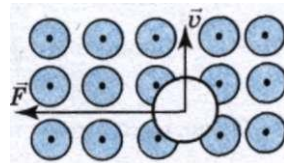
Мал. 65



Мал. 66

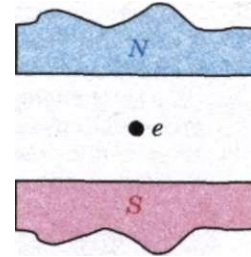


Мал. 67



Мал. 68

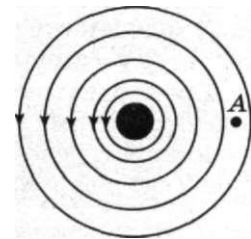
- нітного поля? Б. Відповісти на те саме запитання, якщо:
- 1) швидкість електрона напрямлена в протилежний бік;
  - 2) лінії магнітної індукції напрямлені в протилежний бік.
118. Електрон рухається у вакуумі в однорідному магнітному полі, індукція якого  $0,1 \text{ Тл}$ , зі швидкістю  $3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ . Чому дорівнює сила, що діє на електрон, якщо кут між напрямом його швидкості і лініями індукції становить  $90^\circ$ ?
119. Яка сила діє на протон, що рухається зі швидкістю  $10 \text{ Мм/с}$  в магнітному полі з індукцією  $0,2 \text{ Тл}$  перпендикулярно до лінії індукції?
120. Електрон рухається у вакуумі в однорідному полі, магнітна індукція якого  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ , зі швидкістю  $1 \cdot 10^4 \text{ км/с}$ , напрямленою перпендикулярно до лінії індукції. Визначте силу, що діє на електрон.



Мал. 69

## Рівень В

121. На мал. 70 зображено магнітне поле прямого струму:
- а) який напрям має струм у провіднику? б) чи є поле в точці А? в) який напрям має вектор магнітної індукції у будь-якій точці поля? г) визначте напрям сил, які діють у цьому полі на полюси магнітної стрілки.
122. Чим відрізняється магнітне поле від електростатичного?
123. Чому струмінь розплавленого металу, коли пропускати крізь нього струм, звужується (зменшується площа поперечного перерізу)? Як можна застосувати це явище в металургії?
124. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими  $l$ , в одному напрямі течуть струми  $I_1$  та  $I_2$ . Визначте індукцію магнітного поля в точці А, яка лежить на продовженні прямої, що з'єднує провідники на відстані  $S$  від другого провідника. Вважати, що обидва провідники знаходяться у вакуумі.
125. Струм силою  $I$ , що проходить по кільцю з мідного проводу перерізом  $S$ , створює в центрі кільця індукцію магнітного поля, що дорівнює  $B$ . Яка різниця потенціалів між кінцями провідника, що утворює кільце?
126. При переміщенні провідника довжиною  $80 \text{ см}$  зі струмом силою  $20 \text{ А}$  в однорідному магнітному полі з індукцією  $1,2 \text{ Тл}$  перпендикулярно до нього виконано роботу  $1,92 \text{ Дж}$ . Визначте переміщення провідника.
127. Для переміщення на  $0,25 \text{ м}$  провідника довжиною  $0,4 \text{ м}$  в однорідному магнітному полі, індукція якого  $1,25 \text{ Тл}$  було виконано роботу  $0,25 \text{ Дж}$ . Якої сили струм проходив провідником, якщо він рухався перпендикулярно до поля?
128. По горизонтально розташованому провіднику завдовжки  $20 \text{ см}$  і масою  $4 \text{ г}$  проходить струм силою  $10 \text{ А}$ . Визначте індукцію (модуль і напрям) магнітного поля, в якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася силою Ампера.
129. Який магнітний потік пронизує плоску прямокутну площину довжиною  $50 \text{ см}$  і шириною  $30 \text{ см}$ , коли магнітна індукція становить  $2 \text{ Тл}$ , а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до площини кут  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$ ?
130. Плоский контур, площа якого дорівнює  $25 \text{ см}^2$ , знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією  $0,04 \text{ Тл}$ . Визначте магнітний потік, що пронизує контур, якщо його площина утворює кут  $30^\circ$  з лініями індукції.
131. Електрон, який має швидкість  $1,9 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ , влітає в однорідне магнітне поле, перпендикулярне до напрямку його руху. Індукція магнітного поля становить  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ . Визначте радіус кривизни траєкторії електрона і його доцентрове прискорення.



Мал. 70

132. Траєкторія електрона є дугою кола радіусом 10 см. Індукція магнітного поля  $1 \cdot 10^{-2}$  Тл. Визначте швидкість руху електрона і період його обертання.
133. В однорідне магнітне поле з індукцією 10 мТл перпендикулярно до лінії індукції влітає електрон, кінетична енергія якого 30 кеВ. Визначте радіус кривизни траєкторії руху електрона у полі.
134. Електрон рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого 4 мТл. Визначте період обертання електрона.

### § 15. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ. МАГНІТНИЙ ЗАПИС ІНФОРМАЦІЇ

Магнітне поле створюється не тільки електричними струмами, а й постійними магнітами. Постійні магніти можна виготовити тільки з небагатьох речовин, але всі ті речовини, вміщені в магнітне поле, намагнічуються, тобто самі створюють магнітне поле. Тому вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  в однорідному магнітному середовищі відрізняється від вектора  $\vec{B}_0$  у тій самій точці простору у вакуумі.

Для характеристики впливу середовища на магнітну взаємодію струмів (тобто магнітних властивостей речовин) вводять поняття відносної магнітної проникності речовини. Якщо магнітна індукція в середовищі дорівнює  $\vec{B}$ , а у вакуумі цей самий струм створює індукцію  $\vec{B}_0$ , то відношення

$$\frac{\vec{B}}{\vec{B}_0} = \mu,$$

яке показує, у скільки разів магнітна індукція в речовині більша за магнітну індукцію, створювану цим самим струмом у вакуумі, називають відносною магнітною проникністю даної речовини.

Природно, що відносна магнітна проникність речовини є величиною безрозмірною.

Залежно від значення відносної магнітної проникності всі речовини можна поділити на дві групи: 1) парамагнетики, для яких  $\mu > 1$ ; 2) діамагнетики, для яких  $\mu < 1$ . Згідно з різними значеннями відносної магнітної проникності речовини по-різному поведуться в магнітному полі.

Молекули парамагнетиків мають відмінні від нуля власні магнітні моменти.

**Магнітний момент** — векторна величина, що характеризує взаємодію тіла з магнітним полем.

Якщо магнітне поле відсутнє, то ці моменти розміщені хаотично, тому вектор намагнічення дорівнює нулю.

Якщо в магнітне поле внести парамагнетик, то магнітні моменти окремих атомів або молекул орієнтуються за напрямом поля так, що власне поле парамагнетика буде підсилювати зовнішнє магнітне поле, тобто зовнішнє магнітне поле буде підсилюватися. Якщо такий ефект існує, то він має велике значення і перевагу над діамагнетизмом.

Тепловий рух атомів і молекул руйнує взаємну орієнтацію магнітних моментів молекул, тому намагніченість парамагнетика залежить від тем-

ператури, і відносна магнітна проникність парамагнетиків спадає із збільшенням температури. Відносна магнітна проникність парамагнетиків, як і діамагнетиків, не залежить від індукції зовнішнього магнітного поля. Парамагнетиками є лужні метали, кисень, алюміній, платина.

Діамагнетики, вміщені в магнітне поле, навпаки, послаблюють його.

Це послаблення можна пояснити

виникненням у діамагнетик у внутрішнього магнітного поля, направленого проти зовнішнього магнітного поля. До діамагнетиків належать майже всі гази, мідь, золото, срібло, алмаз, графіт тощо.

Різницю у намагнічуванні парамагнетиків і діамагнетиків легко виявити якісно, спостерігаючи поведінку речовин у сильному магнітному полі. Підвісимо, наприклад, між полюсами сильного електромагніту стержень із графіту і зорієнтуємо його вздовж поля (мал. 71).

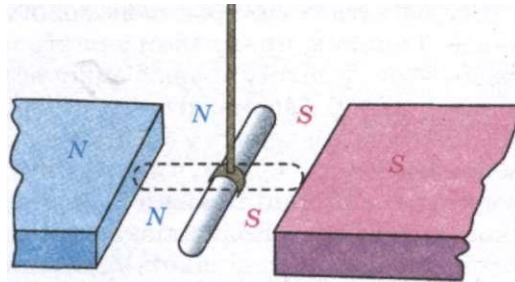
Увімкнемо електромагніт в електромережу. Графітовий стержень повернеться в магнітному полі і встановиться перпендикулярно до його ліній індукції. Це можна пояснити тим, що під час намагнічення стержня на його кінцях виникають магнітні полюси, однойменні з ближчими полюсами зовнішнього електромагніту, і стержень виштовхується з магнітного поля. Особливо чітко видно виштовхування діамагнетика з магнітного поля, якщо між полюсами електромагніту запалити свічку. Гази полум'я мають діамагнітні властивості, і тому полум'я виштовхується магнітним полем.

Граничним випадком парамагнетизму є феромагнетизм. Магнітна проникність більшості феромагнетиків за звичайних температур вимірюється сотнями й тисячами одиниць, а деяких спеціально виготовлених феромагнетиків — може досягати одного мільйона. Це означає, що у феромагнетиках внутрішнє магнітне поле може в сотні й тисячі разів перевищувати зовнішнє магнітне поле. Наприклад, якщо в котушку вставити сталеве осердя, то за такої самої сили струму в котушці магнітна індукція поля зросте в сотні разів. До феромагнетиків, крім заліза, належать нікель, кобальт, гадоліній, деякі сплави і хімічні сполуки.

Феромагнетики мають ще ряд властивостей, які істотно відрізняють їх від діа- і парамагнетиків. Характерною особливістю феромагнетиків є складна залежність індукції внутрішнього поля намагніченого феромагнетика від індукції зовнішнього поля намагнічуючих струмів.

Для феромагнетиків характерна властивість, яку називають гістерезисом. Суть її полягає в тому, що процеси намагнічення і розмагнічення проходять неоднаково. Феромагнетик, який перебував у магнітному полі, зберігає певне намагнічення навіть у разі відсутності поля. Прикладом цього можуть бути постійні магніти.

Важко уявити сучасну радіоелектроніку без елементів із штучних феромагнетиків — феритів. З них виготовляються антени, осердя коливальних контурів та трансформаторів. Широко використовують феритові постійні магніти.



Мал. 71

Без магнітних матеріалів не можна уявити сучасні методи запису інформації. Типовим прикладом пристрою для запису на магнітній плівці є магнітофон. У цьому апараті використовується спеціальна плівка, покрита тонким шаром феромагнітного матеріалу. Змінний електричний струм від підсилювача надходить у спеціальну записуючу головку, що має котушку з феромагнітним осердям, в якому є вузька щілина. При проходженні струму котушкою в щілині головки з'являється магнітне поле, магнітна індукція якого змінюється. Коли плівка проходить над головкою, на ній залишається низка намагнічених ділянок, відповідних змінному струму, який подається в головку. При відтворенні звуку відбувається зворотний процес: намагнічена стрічка збуджує в магнітній головці електричні сигнали, які після підсилення надходять на динамік. Подібний фізичний процес відбувається під час запису інформації на диску вінчестера в сучасному комп'ютері.

Відомо, що як Земля породжує магнітне поле, так і кожен живий організм утворює таке поле. Існування магнітного поля впливає на організм людини, а саме, викликає збудження атомів і молекул і значні зміни на атомному рівні, збільшує активність молекул і прискорює метаболізм клітин. Крім того, розширює кровоносні судини, знижує згортання крові, підтримує здатність тромбоцитів триматися разом і збільшує споживання кисню. Можна сказати, що за відсутності магнітного поля тіло людини та інших живих організмів буде мати серйозні проблеми з правильною роботи.

Кожна клітина, тканина, орган нашого тіла генерує електромагнітне поле, що перебуває в гармонії з магнітним полем Землі і взаємодіє з космосом. Сьогодні на магнітне поле нашої планети впливає величезна кількість штучних полів. Це спотворює наше біополе, і воно перестане нормально функціонувати.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка величина характеризує магнітні властивості середовища?
2. Які тіла називають феромагнетиками?
3. З якою метою застосовують феромагнітні матеріали?
4. Чи впливає магнітне поле на живі організми?



### Це цікаво знати

**Дослідження взаємодії речовини і магнітного поля.** У 1837 р. М. Фарадей показав, що не лише залізо і сталь виявляють магнітні властивості: подібні властивості, хоч і в значно меншій мірі, характерні для всіх речовин. Підвішуючи на тонких нитках між полюсами сильного магніту невеликі стерженьки різних речовин, учений побачив, що стерженьки, виготовлені з одних речовин, розміщуються в напрямі від полюса до полюса. Ці тіла Фарадей назвав **парамагнітними** (з грец. *para* — уздовж). Такі, наприклад, метали, як алюміній, манган, платина. Стерженьки ж з інших речовин розміщувались перпендикулярно до лінії, що сполучає магнітні полюси. Фарадей назвав їх **діамагнітними** (з грец. *dia* — уперек). Такими виявились мідь, срібло, золото, вода, вісмут й інші. Ці самі властивості мають яблуко, хліб, м'ясо.

Речовини, які здатні сильно намагнічуватися, Фарадей назвав **феромагнітними** (буквально — залізомагнітними). Це — залізо, сталь, чавун, нікель, кобальт й інші.

Досліджуючи магнітні властивості різних речовин, Фарадей дійшов висновку, що вони мають неоднакову «**магнітну проникність**». Виявляючи одну за одною приховані

таємниці природи, він все більше і більше схилявся до такої думки: «Всі сили природи можуть перетворюватися одна в одну».

Давня суперечка між ученими про причину виникнення електрики в гальванічних батареях закінчилася прийняттям точки зору Фарадея: «Хімічна дія розчинів на метал, а не лише просте стикання або контакт металів, викликає електричний струм. У гальванічних батареях хімічна енергія перетворюється в електричну».

**§ 16.****ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ.  
ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ**

Як вам відомо, електричне поле створюється електричними зарядами, а магнітне поле — рухомими зарядами, тобто електричним струмом. Між ними існує дуже тісний взаємозв'язок. Магнітне поле, що змінюється в часі, породжує електричне поле, а змінне електричне поле породжує магнітне. Без цього зв'язку між полями різноманітність виявів електромагнітних сил не була б такою широкою, якою вона є насправді. Не існувало б ні радіохвиль, ні світла.

Перший вирішальний крок у відкритті нових властивостей електромагнітних взаємодій зробив основоположник уявлень про електромагнітне поле М. Фарадей. Він був упевнений в єдиній природі електричних і магнітних явищ. Завдяки цьому Фарадей зробив відкриття, що лежить в основі будови всіх генераторів електростанцій світу, які перетворюють механічну енергію в енергію електричного струму.

Це відкриття було зроблене 29 серпня 1831 р. й отримало назву явища електромагнітної індукції.

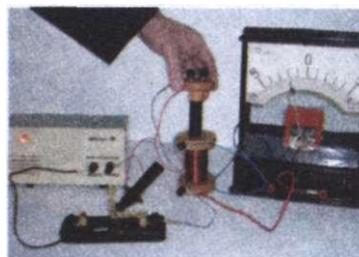
**Явище електромагнітної індукції — це виникнення електричного струму в провідному контурі, який або розміщено нерухомо в змінному магнітному полі, або переміщається в постійному магнітному полі так, що кількість ліній магнітної індукції, які перетинають контур, змінюється.**

Явище електромагнітної індукції Фарадей досліджував за допомогою двох ізольованих одна від одної дрітятих спіралей, намотаних на дерев'яні котушки (мал. 72). Одну спіраль було з'єднано з гальванічною батареєю, а другу — з гальванометром, який реєструє слабкі струми. У моменти замикання і розмикання кола першої спіралі стрілка гальванометра в колі другої спіралі відхилялась.

Виконавши безліч дослідів, Фарадей встановив, що в замкнених провідних контурах електричний струм виникає тільки тоді, коли вони розміщені в змінному магнітному полі, незалежно від того, як змінюється з часом потік індукції магнітного поля.

**Струм, який виникає під час явища електромагнітної індукції, називають індукційним.**

Індукційний струм у котушці з металевого дроту виникає також під час зміни сили струму



Мал. 72

в другій котушці, магнітне поле якої пронизує першу котушку. Індукційний струм виникає також під час руху котушки відносно нерухомого постійного магніту. Якщо з'єднана з гальванометром котушка рухається повільно в однорідному полі, то індукційний струм не виникає, бо кількість силових ліній, що перетинають котушку, весь час залишається незмінною.

Поява електричного струму в замкненому контурі під час зміни магнітного поля, що його пронизує, свідчить про дію в контурі сторонніх сил неелектростатистичної природи або про виникнення ЕРС індукції. Явища електромагнітної індукції кількісно описують на основі встановлення зв'язку між ЕРС індукції і магнітним потоком. Ця величина залежить від значень вектора не в одній точці, а в усіх точках поверхні, обмеженої плоским замкненим контуром.

Причина виникнення індукційного струму полягає, перш за все, в тому, що в замкненому контурі спочатку виникає ЕРС, а вже потім під її впливом у контурі, опір якого  $R$ , проходить індукційний струм — такий, якого потре-

бує закон Ома для повного кола  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ . Досліди Фарадея показали,

що сила індукційного струму пропорційна швидкості зміни магнітного потоку

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  через поверхню, обмежену контуром:

$$I_1 \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Опір провідника не залежить від швидкості зміни магнітного потоку. Отже,  $I_1 \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  тільки тому, що ЕРС індукції

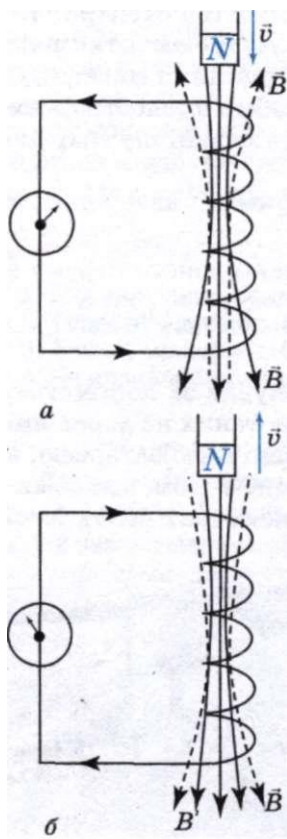
$$\mathcal{E}_1 \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Закон електромагнітної індукції сформульовано саме для ЕРС, оскільки за такого формулювання він виражає суть явища, незалежного від властивостей провідників, у яких виникає індукційний струм. Згідно із законом електромагнітної індукції ЕРС індукції в замкненому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, що обмежена контуром:

$$\mathcal{E}_1 = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Ця формула описує фундаментальний закон природи — основний закон електромагнітної індукції. Час-то цей закон називають законом Фарадея.

Під час проведення дослідів з електромагнітної індукції можна помітити, що стрілка приладу відхиляється то в один бік, то в другий, що свідчить про різні напрями індукційного струму (мал. 73, а, б).



Мал. 73

Російський вчений Е. Ленц застосував до явища електромагнітної індукції закон збереження і перетворення енергії і сформулював правило, користуючись яким можна визначити напрям індукційного струму.

Правило Ленца формулюється так:

індукційний струм, що виникає в замкненому контурі, протидіє зміні магнітного потоку, який збуджує цей струм.

Правило Ленца є виявом закону збереження і перетворення енергії в електромагнітних процесах. Енергія індукційного струму в провіднику дорівнює тій роботі, що виконується з подолання протидії магнітного поля, створеного індукційним струмом.

Застосуємо це правило до закону електромагнітної індукції. На мал. 74 зображено замкнений контур. Додатним вважатимемо напрям обходу контуру проти руху годинникової стрілки. Нормаль до контуру  $\vec{n}$  утворює правий гвинт з напрямом обходу. Нехай магнітна індукція  $\vec{B}$  напрямлена вздовж нормалі до контуру і з часом зростає. Тоді  $\Phi > 0$  і  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ .

Згідно з правилом Ленца індукційний струм створює магнітний потік  $\Phi' < 0$ . Силкові лінії магнітного поля індукційного струму зображено на мал. 74 штрихом. Отже, цей струм  $I$  згідно з правилом свердлика напрямлений за рухом годинникової стрілки (проти напрямку додатного обходу) і ЕРС індукції від'ємна. Тому в рівнянні електромагнітної індукції має стояти знак мінус, який вказує, що  $\mathcal{E}_i$  і  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  мають різні знаки:

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

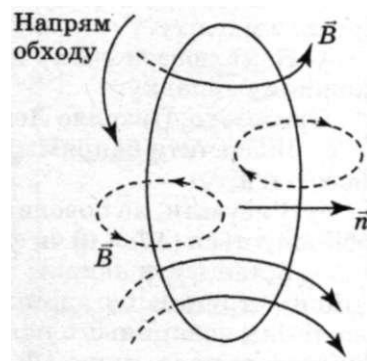
Якщо в з'єднаних послідовно контурах відбуваються однакові зміни магнітного потоку, то ЕРС індукції в них дорівнює сумі ЕРС індукції в кожному із контурів. Оскільки змінюється магнітний потік у котушці, що складається із  $N$  однакових витків провідника, то загальна ЕРС індукції буде в  $N$  разів більшою від ЕРС індукції в окремому контурі:

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

Рівняння  $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  може набувати й іншого

вигляду залежно від характеру зміни магнітного потоку. Для випадку нестационарного магнітного поля, коли вектор індукції магнітного поля змінюється з часом за незмінних площі контуру та його орієнтації ( $S = \text{const}$ ,  $\alpha = \text{const}$ ):

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha.$$



Мал. 74



У разі зміни орієнтації поля ( $B = \text{const}$ ) або зміни орієнтації контуру в стаціонарному полі ( $S = \text{const}$ ):

$$\mathcal{E}_1 = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{BS(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\Delta t},$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  — кути між нормаллю до контуру і вектором індукції в початковий і кінцевий моменти часу.

Якщо магнітне поле стаціонарне ( $\vec{B} = \text{const}$ ), а орієнтація контуру незмінна ( $\alpha = \text{const}$ ), то ЕРС індукції може виникати внаслідок зміни площі контуру, її розраховують за формулою:

$$\mathcal{E}_1 = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{BS(S_2 - S_1)}{\Delta t} \cos \alpha, \text{ де}$$

$S_1$  і  $S_2$  — площі контуру на початку і наприкінці, наприклад, руху ділянки контуру.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке явище електромагнітної індукції?
2. Сформулюйте правило Ленца.
3. Що таке індукційний струм?
4. У чому полягає закон електромагнітної індукції?

### Лабораторна робота № 3

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Мета роботи: експериментально вивчити явище електромагнітної індукції, встановити всі істотні особливості цього явища, навчитись користуватися правилом Ленца.

Обладнання: котушка, дугоподібні магніти, міліамперметр, джерело постійного струму, реостат, з'єднувальні провідники.

#### Хід роботи

1. Приєднати затискачі міліамперметра до затискачів котушки.
2. Вставити один із полюсів дугоподібного магніту всередину котушки, одночасно спостерігаючи за стрілкою міліамперметра.
3. Повторити спостереження, витягаючи магніт з котушки і змінюючи полюси магніту.
4. Намалювати схему досліду і перевірити виконання правила Ленца у кожному випадку.

*Примітка.* Правило Ленца треба перевіряти за такою послідовністю.

- Визначити напрям ліній магнітної індукції зовнішнього поля (постійного магніту).
- З'ясувати, як поводить себе потік магнітної індукції зовнішнього поля: збільшується ( $\Delta\Phi > 0$ ) чи зменшується ( $\Delta\Phi < 0$ ).
- Встановити напрям ліній індукції магнітного поля, створеного індукційним струмом, що виник у котушці. Ці лінії будуть напрямлені протилежно лініям зовнішнього поля, якщо  $\Delta\Phi > 0$ , і прямуватимуть за лініями зовнішнього поля, якщо  $\Delta\Phi < 0$ .
- Визначити напрям індукційного струму за правилом свердлика.

5. Повільно вставити в котушку або витягти з неї два магніти, складені одноїменними полюсами. Повторити дослід, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясувати, в яких випадках сила індукційного струму більша.

### Для допитливих

Через отвір котушки падає магніт. Чи з однаковим прискоренням він рухатиметься в котушці, якщо кінці обмотки будуть замкнені? Якщо вони не будуть замкнені?

## § 17. ІНДУКТИВНІСТЬ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОТУШКИ ЗІ СТРУМОМ

Явище електромагнітної індукції спостерігається в усіх випадках, коли змінюється магнітний потік через контур. Проте провідник зі струмом перебуває у власному магнітному полі, і якщо це поле змінюється, то в провіднику має збуджуватися ЕРС індукції. Власне магнітне поле такого провідника залежить від сили струму в ньому, тому в разі зміни сили струму в колі в провіднику збуджується ЕРС.

Виникнення ЕРС у провіднику під час зміни сили струму в ньому самому називається самоіндукцією.

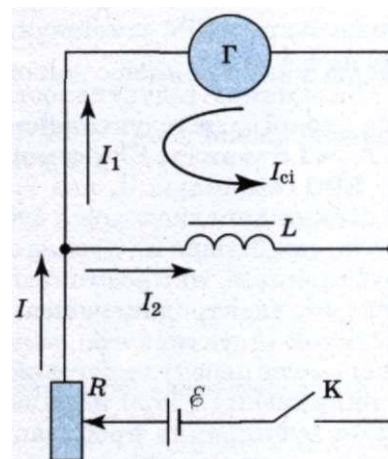
Розглянемо коло (мал. 75), яке складається з батареї ЕРС, реостата  $R$ , котушки індуктивності  $L$ , гальванометра  $\Gamma$  і ключа  $K$ .

Якщо коло замкнене, то по гальванометру  $\Gamma$  і котушці індуктивності  $L$  проходить електричний струм. У момент розмикання кола стрілка гальванометра різко відхиляється у протилежний бік. Причина цього в тому, що при розмиканні кола магнітний потік у котушці зменшується, створюючи в ній ЕРС самоіндукції. Струм самоіндукції  $I_{ci}$  за правилом Ленца перешкоджає спаданню магнітного потоку, тобто він напрямлений у котушці так само, як і спадний струм  $I_2$ . Цей струм повністю проходить через гальванометр, але за напрямом, протилежним напрямку  $I_1$ .

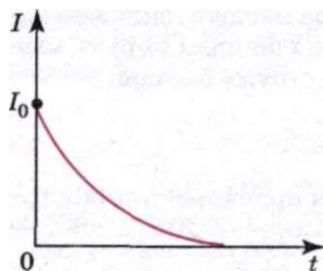
**Явище виникнення індукованого струму в колі внаслідок зміни струму в ньому називають самоіндукцією.**

Самоіндукція — це окремий випадок явища електромагнітної індукції.

Графік зміни сили струму в колі в момент розмикання наведено на мал. 76. Струм поступово зменшується від значення  $I$ , яке було перед розмиканням, до нуля, нагріваючи при цьому провідники. Якщо б обмотка котушки була виготовлена з надпровідного матеріалу і закорочена таким самим провідником, то струм у колі існував би нескінченно довго.



Мал. 75



Мал. 76

Оскільки самоіндукція — окремий випадок явища електромагнітної індукції, закон Фарадея можна застосовувати і для визначення ЕРС самоіндукції. Пригадаємо, що магнітний потік через площу, обмежену контуром струму, пропорційний силі струму. Дійсно,  $\Phi = BS$ , а магнітна індукція поля, створюваного струмом, пропорційна в усіх випадках силі струму, тобто  $B \sim I$ . Отже, можна твердити, що

$$\Phi = LI,$$

де  $L$  — коефіцієнт пропорційності між силою струму в контурі і створюваним нею потоком магнітної індукції через цей контур.

**Коефіцієнт  $L$  називається індуктивністю провідника, або його коефіцієнтом самоіндукції.**

Індуктивність провідника в даному середовищі визначається його розмірами і формою. Індуктивність прямолінійного провідника незначна, проте вона зростає, якщо з нього зробити виток. Індуктивність котушки зростає пропорційно кількості її витків.

Запишемо формулу для обчислення ЕРС самоіндукції:

$$\mathcal{E}_{ci} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Якщо форма контуру не змінюється, то коефіцієнт самоіндукції є сталим, тоді

$$\mathcal{E}_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Таким чином, ЕРС самоіндукції в колі пропорційна швидкості зміни сили струму в цьому колі.

Якщо  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 1$ , то  $|\mathcal{E}_{ci}| = L$ , тобто індуктивність — це фізична величина, яка визначається ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі у разі зміни сили струму на 1 А за 1 с.

За одиницю індуктивності в СІ беруть один генрі (**1 Гн**). З формули видно, що **1 генрі** — це індуктивність провідника, в якому при зміні сили струму на **1 А** за **1 с** виникає ЕРС самоіндукції **1 В: 1 Гн = 1 В · 1 с / 1 А**.

ЕРС самоіндукції, яка виникає під час замикання і розмикання кола, в деяких випадках може бути досить значною. Чим більша індуктивність кола, тим більша ЕРС і сила струму самоіндукції. Ось чому в разі вимикання рубильників, які розмикають електричні кола з потужними електромагнітами, електродвигунами, трансформаторами та іншими пристроями з великою індуктивністю, між їх контактами пролітає електрична іскра, яка іноді може перейти в дуговий розряд і зіпсувати рубильник. Причиною цього є виникнення в колі настільки великої ЕРС самоіндукції, що між контактами рубильника пробивається повітряний проміжок. Для розмикання таких кіл користуються масляними вимикачами і вживають інші застережні заходи.

Магнітне поле нерозривно зв'язане з електричним струмом: воно виникає, змінюється і зникає зі зміною сили струму. Отже, під час замикання кола частина енергії джерела струму завжди витрачається на створення магнітного поля. Тому воно повинно мати енергію, що дорівнює роботі, витраченій струмом на його створення. Саме енергією магнітного поля пояснюється явище електромагнітної індукції, зокрема самоіндукції. У разі замикання кола з джерелом постійної ЕРС сила струму не відразу досягає максимального значення (яке визначається законом Ома), а певний час зростає, оскільки частина енергії джерела витрачається в цей час на створення магнітного поля. Досягнувши максимального значення, сила струму в колі вже не змінюється. При цьому постійним стає і магнітне поле струму, його енергія теж не буде змінюватися. Джерело струму витрачає енергію лише на підтримання постійної сили струму, і ця частина енергії перетворюється у внутрішню енергію провідників, тобто витрачається на їх нагрівання. Під час розмикання кола магнітне поле струму зникає, однак згідно із законом збереження енергії його енергія перетворюється в енергію струму самоіндукції, який підсилює струм, що вимикають.

Таким чином, **явище електромагнітної індукції ґрунтується на взаємних перетвореннях енергій електричного струму і магнітного поля.**

Енергію магнітного поля котушки індуктивності можна знайти, виходячи з таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується з часом за лінійним законом. У цьому разі ЕРС самоіндукції має таке постійне значення.

$$\mathcal{E}_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{t},$$

де  $t$  — час, за який сила струму в колі лінійно зменшується від початкового значення  $I$  до 0.

За цей час у колі проходить електричний заряд

$$q = \frac{I}{2} t.$$

При цьому робота електричного струму

$$A = q \mathcal{E}_{ci} = \frac{It}{2} \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}.$$

Ця робота виконується за рахунок енергії магнітного поля котушки індуктивності.

Енергія  $W_m$  магнітного поля котушки індуктивності дорівнює половині добутку її індуктивності на квадрат сили струму в ній:

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



### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке самоіндукція?
2. У який момент іскрить рубильник: під час замикання чи розмикання кола? Чому?
3. Що таке індуктивність?
4. Наведіть одиниці індуктивності.
5. Коло, яке містить джерело постійної ЕРС, замкнули. На що витрачається енергія джерела до і після встановлення постійної сили струму?

### Задачі та справи

#### Розв'язуємо разом

1. Вертикальний залізний циліндр, підвішений на динамометрі, намагнітили так, щоб його північний полюс був зверху. Циліндр розмістили на однаковій відстані від екватора: перший раз у північній півкулі, другий — у південній. Коли покази динамометра були більші?

#### Розв'язання

Перший раз, тому що напрям сили тяжіння збігається з напрямом складової притягання циліндрика магнітним полем Землі.

2. Який заряд пройде через поперечний переріз замкненого провідника опором 10 Ом при зміні магнітного потоку від 35 до 15 мВб?

#### Розв'язання

При зміні магнітного потоку в провіднику виникає ЕРС індукції  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}$ .

Оскільки провідник замкнений, то у ньому буде текти струм силою  $I = \frac{\mathcal{E}_1}{R} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t}$ .

Разом з цим, сила струму дорівнює зміні заряду за одиницю часу:  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t}$ .

Звідси  $\Delta q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}$ .

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо:  $\Delta q = 2$  мКл.

3. Котушку дуже малого опору та індуктивністю 3 Гн під'єднано до джерела струму, ЕРС якого 15 В і дуже малий внутрішній опір. Через який інтервал часу сила струму в котушці досягне значення 50 А?

#### Розв'язання

За законом Ома для повного кола  $\mathcal{E} = I(R+r)$ , де  $\mathcal{E}$  — повна ЕРС у колі, що дорівнює для цього випадку сумі  $\mathcal{E}_1$  — ЕРС джерела і  $\mathcal{E}_2$  — ЕРС самоіндукції, яка виникає після під'єднання котушки до джерела:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ .

ЕРС самоіндукції визначається за формулою  $\mathcal{E}_2 = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ . Враховуючи попередні

співвідношення, отримаємо  $\mathcal{E}_1 - L\frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R+r)$ . За умовою задачі опори  $R$  і  $r$  дуже

малі, тому  $\mathcal{E}_1 - L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$  або  $\mathcal{E}_1 = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ . Звідки можна визначити швидкість зміни стру-

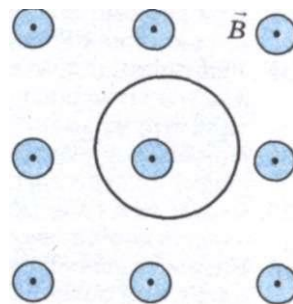
му  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_1}{L}$ , а потім — час, потрібний для збільшення сили струму до значення 50 А:

$t = \frac{IL}{\mathcal{E}_1}$ . Зробивши розрахунки, отримаємо  $t = 10$  с.

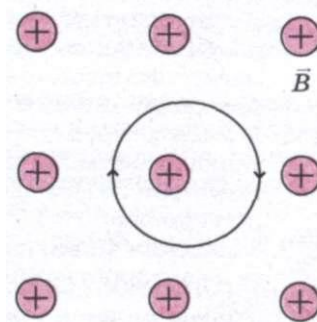
#### Рівень А

135. Що станеться, коли до екрана телевизора, який працює, піднести магніт? Поясніть.  
 135. Чому полярне сяйво спостерігається в основному в полярних районах земної кулі?  
 136. Чому корпус компаса виготовляють із пластмаси, латуні, алюмінію, але не із заліза?

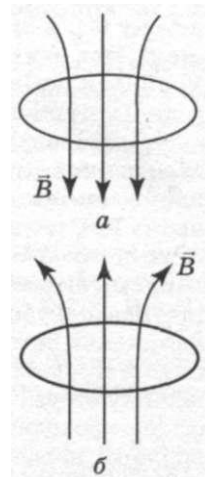
137. Чому магнітофонну плівку не рекомендується зберігати поблизу приладів, які містять електромагніти?
138. Магнітна індукція у бруску металу дорівнює  $0,75$  Тл, а індукція зовнішнього намагніченого поля дорівнює  $0,0375$  Тл. Яку відносну магнітну проникність має метал?
139. Якої форми прагне набутти замкнений провідник, по якому тече струм?
140. В однорідному магнітному полі поступально рухається провідний контур. Чи виникає ЕРС індукції у контурі, якщо магнітне поле: а) однорідне; б) неоднорідне?
141. Як взаємодіють сусідні витки соленоїда, коли по них тече струм?
142. У замкнутому витку дроту, що має опір  $2 \cdot 10^{-2}$  Ом, миттєве значення індукційного струму становить  $5$  А. Яка ЕРС індукції?
143. Прямий провідник довжиною  $35$  см перетинає однорідне магнітне поле зі швидкістю  $6$  м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Сам провідник також перпендикулярний до ліній магнітної індукції. Визначте індукцію магнітного поля, якщо між кінцями провідника виникає різниця потенціалів  $12$  мВ.
144. Визначте різницю потенціалів, яка виникає між кінцями крил літака при горизонтальному польоті зі швидкістю  $1200$  км/год, якщо розмах крил  $40$  м, а вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює  $50$  мкТл.
145. Провідне кільце міститься в магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні до площини кільця. Який напрям має індукційний струм під час зростання магнітної індукції (мал. 77)?
146. Провідне кільце перебуває у магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні до кільця (мал. 78). Збільшується чи зменшується магнітна індукція, якщо індукційний струм має напрям, вказаний на малюнку?
147. Визначте напрям сил, які діють на провідне кільце (мал. 79, а, б), якщо індукція магнітного поля: а) збільшується; б) зменшується.
148. За  $2,5$  мс магнітний потік, який пронизує контур, рівномірно спадає від  $10$  до  $5$  мВб. Визначте ЕРС індукції в контурі.
149. У контурі провідника за  $0,3$  с магнітний потік змінився на  $0,06$  Вб. Яка швидкість зміни магнітного потоку? Яка ЕРС індукції в контурі?
150. Магнітний потік, що пронизує контур провідника, рівномірно змінився на  $0,6$  Вб так, що ЕРС індукції стала дорівнювати  $1,2$  В. Визначте час, протягом якого змінювався магнітний потік.
151. Визначте індуктивність котушки з осердям, якщо при швидкості зміни сили струму  $50$  А/с у ній збуджується ЕРС самоіндукції  $20$  В.
152. З якою швидкістю змінюється сила струму в котушці індуктивністю  $120$  мГн, якщо в ній виникає ЕРС самоіндукції  $6$  В?



Мал. 77



Мал. 78

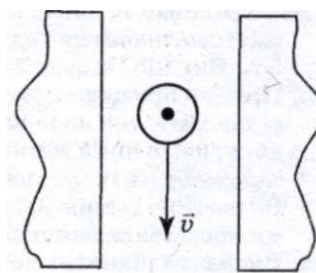


Мал. 79

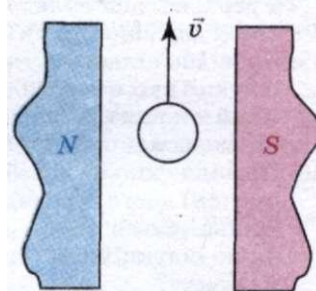
153. При рівномірній зміні в котушці сили струму від 5 до 10 А впродовж 250 мс у ній виникає ЕРС самоіндукції 2 В. Яка індуктивність котушки?
154. У котушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму 20 А. Яку енергію має магнітне поле цієї котушки? Як зміниться енергія магнітного поля, коли сила струму зменшиться вдвічі?
155. По обмотці соленоїда індуктивністю 0,2 Гн тече струм силою 10 А. Визначте енергію магнітного поля соленоїда.
156. Струм якої сили має проходити в обмотці дроселя з індуктивністю 0,5 Гн, щоб енергія дорівнювала 10 Дж?
157. Визначте енергію магнітного соленоїда, в якому при силі струму 10 А виникає магнітний потік 0,5 Вб.

## Рівень В

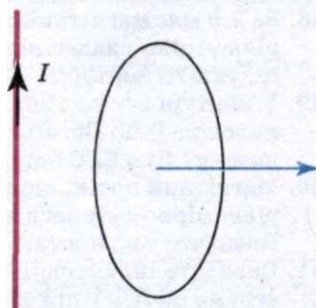
158. Якщо у магнітне поле потрапить електрон, вектор швидкості якого перпендикулярний до напрямку магнітного поля, то він рухатиметься по коловій траєкторії. Доведіть це.
159. У мас-спектрометрі одноразово йонізована частинка рухається зі швидкістю 956 км/с по колу діаметром 20 см в однорідному магнітному полі, індукція якого 0,1 Тл. Визначте масу частинки.
160. Запаленим сірником розжарте голку і наблизьте її до стрілки компаса. Результат досліду поясніть.
161. Визначте магнітну проникність нікелю, коли відомо, що магнітний потік  $\Phi^1$  який пронизує його переріз, у 2,4 раза менший від магнітного потоку  $\Phi^2$ , який пронизує такий самий переріз сталі. Магнітна проникність сталі 670.
162. У скільки разів підсилиться магнітне поле в середині котушки зі струмом, якщо в котушку ввести сталеве осердя?
163. Між полюсами магніту рухається провідник. За напрямом його руху і напрямом індукованої в ньому ЕРС визначте полюси магніту (мал. 80).
164. Між полюсами магніту рухається провідник у напрямі, вказаному на мал. 81. Визначте напрям індукованої у провіднику ЕРС.
165. Замкнений виток дроту знаходиться біля провідника зі струмом (мал. 82). Чи буде виникати у провіднику струм, якщо: а) обертати виток навколо осі, що проходить через провідник; б) обертати навколо осі, паралельної провіднику; в) обертати навколо осі, перпендикулярної до провідника; г) рухати поступально паралельно провіднику; г) рухати поступально перпендикулярно до провідника?
166. Рейки залізничної колії ізольовані одна від одної і від землі. По цих рейках їде потяг зі швидкістю 20 м/с. Вертикальна складова магнітного поля Землі  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл, відстань між рейками 1,54 м. Що покаже мілівольтметр, приєднаний до рейок?



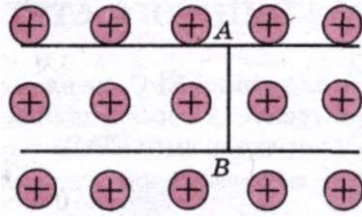
Мал. 80



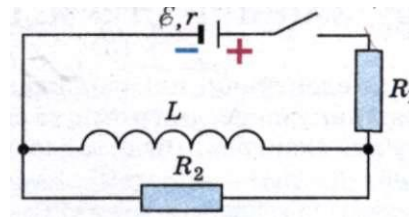
Мал. 81



Мал. 82



Мал. 83



Мал. 84

167. На паралельні горизонтальні рейки подано напругу, і по провіднику  $AB$  (мал. 83) тече струм силою  $I$ . Під дією магнітного поля провідник рухається з прискоренням  $a$ . Визначте індукцію магнітного поля, якщо площа поперечного перерізу провідника дорівнює  $S$ , а густина матеріалу провідника  $\rho$ . Тертя не враховувати.
168. Чим пояснюється нагрівання шматка металу, що перебуває у магнітному полі, яке швидко змінюється?
169. Три однакові штабові магніти падають в однаковому положенні з тієї ж висоти. Один падає вільно, інший під час падіння проходить крізь незамкнений соленоїд, а третій крізь замкнений соленоїд. Порівняти час падіння магнітів. Відповіді обґрунтувати на основі правила Ленца та закону збереження енергії.
170. У замкненому витку, виготовленому із алюмінієвої дротини завдовжки 10 см і поперечного перерізу  $1,4 \text{ мм}^2$ , магнітний потік зменшується від 10 до 5 мВб упродовж 5 с. Яка сила струму, індукованого у витку?
171. Магнітний потік через кожен із 50 однакових витків котушки становить 100 мВб. Під час його рівномірного зменшення впродовж 10 мс у котушці виникає ЕРС 200 В. До якого значення зменшується магнітний потік?
172. Магнітний потік через контур замкненого провідника опором 30 мОм за 2 с змінюється на 12 мВб. Яка сила струму, що протікає у провіднику під час цієї зміни, якщо магнітний потік змінюється рівномірно?
173. Котушка, яка має 1000 витків, перебуває у магнітному полі. Магнітний потік, що пронизує витки котушки, змінюється на 2 мВб, якщо сила струму в котушці змінюється на 16 А. Яка індуктивність котушки?
174. Під час зростання сили струму у котушці від 1 до 2 А упродовж 10 мс у ній виникає ЕРС самоіндукції 20 В. Яка індуктивність котушки? Який магнітний потік пронизує котушку в момент часу, коли сила струму становить 1,5 А, якщо вона має 200 щільно намотаних витків?
175. Котушка, опір якої становить 50 Ом та індуктивність — 0,001 Гн, розміщена в магнітному полі. Під час рівномірної зміни магнітного поля потік через котушку зріс на 1000 Вб, і сила струму у котушці збільшилася на 0,1 А. Який заряд пройшов за цей час по котушці?
176. Котушка, яка має 1000 витків, перебуває у магнітному полі. Магнітний потік, який пронизує витки котушки, змінюється на 2 мВб, якщо сила струму в котушці змінюється на 16 А. Яка індуктивність котушки?
177. Під час зміни сили струму в котушці, індуктивність якої 0,11 Гн, у 5,13 раза енергія магнітного поля змінилася на 16,2 Дж. Визначте початкові значення енергії та сили струму.
178. Соленоїд завдовжки 50 см і діаметром 0,8 см має 20 000 витків мідного проводу і перебуває під постійною напругою. Визначте час, протягом якого в обмотці соленоїда виділиться така кількість теплоти, яка буде дорівнювати енергії магнітного поля в соленоїді.
179. Який заряд пройде через резистор  $R_2$  (мал. 84) після розмикання ключа? ЕРС джерела  $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$ , внутрішній опір  $r = 1,5 \text{ Ом}$ , індуктивність котушки  $L = 0,2 \text{ Гн}$ , опори резисторів  $R_1 = 7,5 \text{ Ом}$  і  $R_2 = 3 \text{ Ом}$ . Опором котушки можна знехтувати.



### § 18. ЗМІННИЙ СТРУМ. ГЕНЕРАТОР ЗМІННОГО СТРУМУ

Якщо електричне коло під'єднати до джерела змінної ЕРС, на електрони в провіднику почне діяти змінна сила, яка примусить їх переміщатися. При цьому рух електронів буде точно повторювати характер змін ЕРС.

**Змінний струм** — це, по суті, вимушені коливання електричних зарядів у провіднику під дією прикладеної змінної ЕРС.

Змінний струм за характером змін сили струму може бути найрізноманітнішим. Найбільш важливими є струми, сила яких змінюється за гармонічним законом, тобто за законом синуса чи косинуса.

Розглянемо замкнений контур площею  $S$  в однорідному магнітному полі, індукція якого  $\vec{B}$ . Контур рівномірно обертається навколо осі  $OO'$  з кутовою швидкістю  $\omega$  (мал. 85).

Магнітний потік, який пронизує контур, визначається за формулою  $\Phi = BS \cos \alpha$ , де  $\alpha$  — кут між вектором нормалі  $\vec{n}$  до площини контуру і вектором  $\vec{B}$ .

У процесі рівномірного обертання контуру кут повороту  $\alpha$  змінюється з часом за законом  $\alpha = \omega t$ , а магнітний потік, який пронизує контур, за законом

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

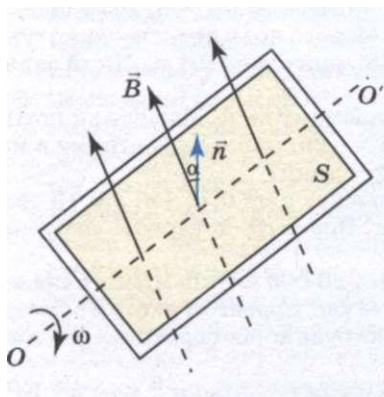
У замкнутому контурі виникає ЕРС індукції  $\varepsilon_1 = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}$ , значення якої у певний момент часу  $\varepsilon_1 = \omega BS \sin \alpha$  за формулою

$$\varepsilon_1 = \omega BS \sin \alpha.$$

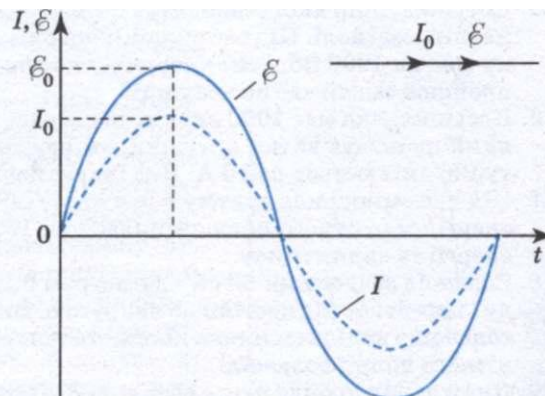
Як впливає з формули, ЕРС індукції, що виникає в замкнутому контурі, у процесі його рівномірного обертання в однорідному магнітному полі змінюється з часом за законом синуса (мал. 86).

ЕРС індукції максимальна при  $\sin \omega t = 1$ , тобто при  $\alpha = \omega t = \frac{\pi}{2}$ .

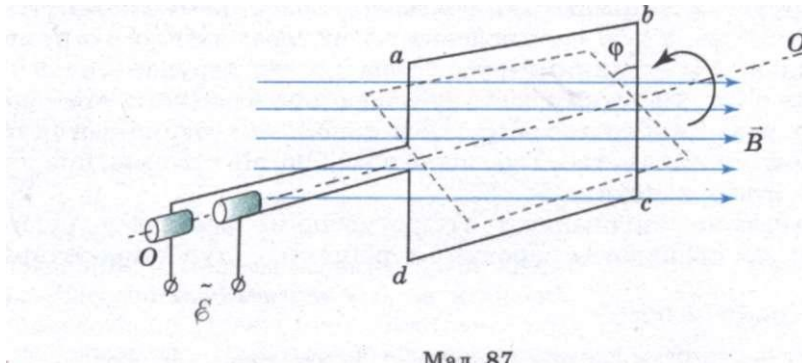
Величина  $\varepsilon_{\max} = \omega BS$  називається амплітудним значенням ЕРС індукції.



Мал. 85



Мал. 86



Мал. 87

Якщо такий контур замкнути на зовнішнє коло, то по колу проходитиме струм, сила і напрям якого змінюються.

Миттєве значення змінного струму, що проходить активним опором  $\bar{R}$ , визначимо за законом Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t,$$

де  $I_{\max}$  – амплітудне значення сили струму.

Інтервал часу  $T$ , протягом якого змінна ЕРС здійснює одне повне коливання, називається періодом змінного струму.

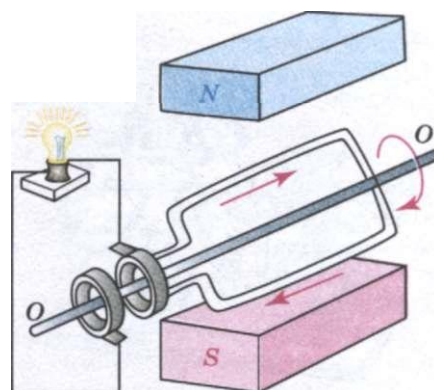
Кількість повних коливань, які здійснюються за 1 с, називають частотою змінного струму  $\nu$ .

Розглянутий принцип одержання ЕРС лежить в основі будови більшості технічних індукційних генераторів змінного струму. Якщо виток розріжемо і кінці його з'єднаємо з кінцями зовнішнього кола за допомогою двох ізолюваних один від одного кілець, якими ковзають щітки зовнішнього кола (мал. 87), то отримаємо схему найпростішого генератора.

Збуджувані в послідовно з'єднаних витках ЕРС додаються. Тому для одержання великої ЕРС у промислових генераторах контур, який обертається у магнітному полі, складають з послідовно з'єднаних витків дроту, намотаного на феромагнітне осердя. Тоді ЕРС, збуджена у такому генераторі, дорівнюватиме

$$\mathcal{E}_1 = N \omega B S \sin \alpha.$$

На мал. 88 зображено найпростішу схему генератора змінного струму. У рамці, яка обертається в магнітному полі, виникає змінна ЕРС індукції. Якщо коло замкнути, то в ньому проходитиме змінний струм. Із зовнішнім колом рамка з'єднується кільцями, закріпленими на одній осі з рамкою. За один оберт рамки полярність щіток змінюється двічі. Щоб



Мал. 88

збільшити напругу, яку знімають з клем генератора, на рамки намотують не один, а багато витків. У всіх промислових генераторах змінного струму витки, в яких індукується змінний струм, установлюють нерухомо, а магнітна система обертається. Нерухому частину генератора називають статором, а рухому — ротором. Якщо ротор обертати за допомогою зовнішньої сили, то разом з ротором обертатиметься і магнітне поле, яке він створює, при цьому в провідниках статора індукується ЕРС.

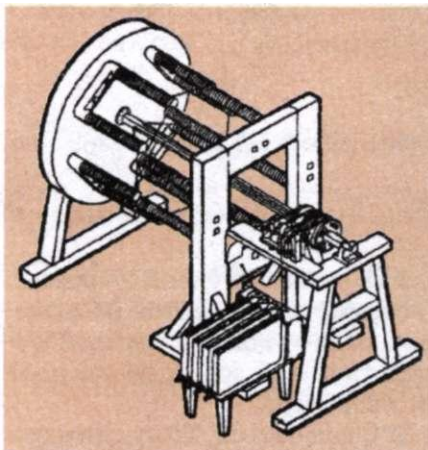
Електрогенератори, які працюють з гідротурбінами, називають гідрогенераторами, а ті, що працюють з паровими турбінами, — турбогенераторами.

### 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

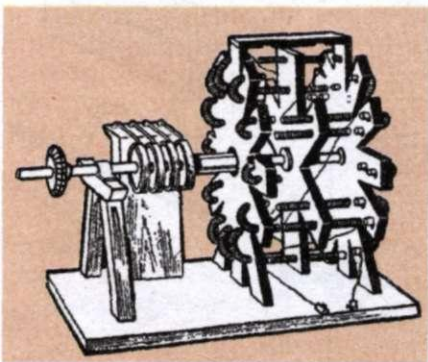
1. Що таке змінний струм? Якими законами він описується?
2. Що таке амплітудне значення ЕРС індукції?
3. Який принцип роботи генераторів змінного струму?
4. Як визначається ЕРС індукції, що виникає у генераторі?



### Це цікаво знати



Мал. 89



Мал. 90

Найбільш важливими для практичного застосування є праці петербурзького академіка **Б. С. Якобі** зі створення електродвигуна з обертальним рухом якоря. У травні 1834 р. він сконструював свій перший електродвигун, який мав (мал. 89) дві групи П-подібних електромагнітів; одна з них розташовувалася на нерухомій рамі, а інша — на диску, який міг обертатися. Джерелом живлення слугувала батарея гальванічних елементів. Обмотки електромагнітів нерухомої рами були з'єднані послідовно, і струм обтікав їх увесь час в одному напрямі. Напрямок струму в електромагнітах на диску весь час змінювався за допомогою спеціального комутатора оригінальної конструкції. Це обумовлювало зміну полярності цих електромагнітів, а їх взаємодія (притягання і відштовхування) створювала обертальний момент. Такий електродвигун мав потужність близько 15 Вт, тобто міг піднімати вантаж масою 4—5 кг на висоту приблизно 30 см за 1 с. Про свою роботу Б. С. Якобі доповів на засіданні Паризької академії наук 1 грудня 1834 р. Звістка про його винахід швидко розлетілася по всіх країнах.

Прагнучи збільшити потужність машини, Б. С. Якобі створив електродвигун зведеного типу (мал. 90), який мав 24 нерухомих електромагніти і 12 рухомих прямих електромагнітів; принцип дії машини залишався таким самим. Зміна конструкції, проте, не привела до значного збільшення потужності. А тому Якобі розпочав пошук принципово но-

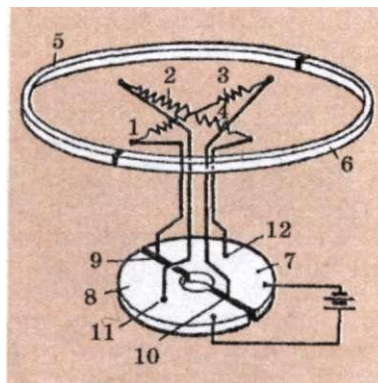
вого вирішення цієї проблеми, і в 1838 р. досяг мети.

У 1837 р. американський техник **Т. Девенпорт** побудував електродвигун, що працював за принципом взаємодії рухомих електромагнітів з нерухомими постійними магнітами (мал. 91). Він складався з чотирьох хрестоподібно розміщених електромагнітів 1–4, закріплених на дерев'яному диску, що жорстко зв'язаний з вертикальним валом. Електромагніти розміщувалися всередині двох напівкруглих постійних магнітів 5 і 6. На особливій підставці були закріплені мідні пластини 7 і 8, розділені посередині ізоляцією; до них підводився струм від батареї елементів. Одна пара послідовно з'єднаних електромагнітів мала пружинячі контакти 9 і 10, а інша пара — такі ж контакти 11 і 12. Полярність електромагнітів змінювалася за допомогою комутатора. Двигун Девенпорта був більш компактним, ніж машина Якобі, завдяки розміщенню в одній площині рухомих і нерухомих магнітів, хоча заміна електромагнітів постійними магнітами і була кроком назад, оскільки магніти мають велику вагу і здатні розмагнічуватися.

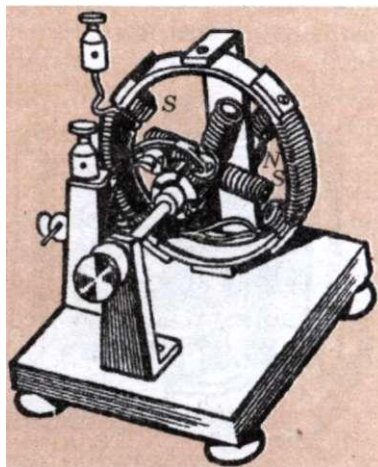
У середині 1837 р. за пропозицією Б. С. Якобі, який прагнув до практичного використання електродвигунів, у Росії була створена «Комісія для постановки дослідів із пристосування електромагнітної сили до руху машин за способом професора Якобі». Згідно із задумками, електродвигун був найбільш зручний для водного транспорту (він мав би замінити важкий, громіздкий і пожежонебезпечний для дерев'яного судна паровий двигун і вугільний бункер до нього), атому до складу Комісії увійшли разом із Е. Ленцем та П. Шіллінгом, представники морського відомства на чолі з адміралом І. Крузенштерном. Комісія отримала для дослідів бот, що вміщав 12 пасажирів і був розрахований на 10 веслярів.

Спочатку Б. С. Якобі пропонував встановити на боті електродвигун конструкції 1834 р., помістивши його вал упоперек судна, а на кінцях валу розташувати грібні колеса. Проте електродвигун займав дуже багато місця. Б. С. Якобі почав займатися розробкою нової конструкції, що було успішно завершено у 1838 р. (Модель одного елемента такого електродвигуна Якобі (конструкція 1838 р.) наведено на мал. 92). Він змінив положення магнітів і розмістив по 20 двигунів на двох вертикальних валах.

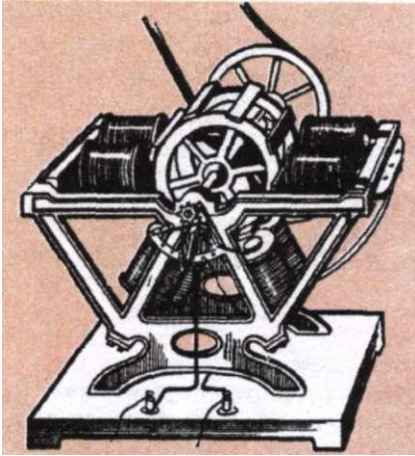
У конструкції знайшла практичне застосування пропозиція Т. Девенпорта, а саме, розташовувати нерухомі і обертальні магніти в одній площині. Не дивлячись на збільшені розміри електродвигуна по вертикалі, його можна було зручно закріпити на судні. Випробування показали, що електродвигун цілком придатний для руху бота, але завдяки живленню струмом від гальванічних батарей вартість проїзду була приблизно у 25 разів більша від вартості цієї ж роботи, виконуваної паровою машиною. Таким чином, питання про використання електродвигуна виявилось залежним від створення економічного генератора електричної енергії.



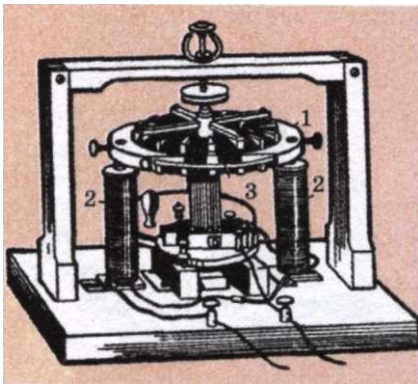
Мал. 91



Мал. 92



Мал. 93



Мал. 94

Із електродвигунів, що отримали застосування у 50—60-х роках XIX ст. можна вказати на машину французького інженера **П. Фромана** (мал. 93), яка використовувалася для приведення в дію друкарських верстатів. Особливість установки: шість пар електромагнітів розташовували по колу, а на якорі закріплювали металеві пластини, що притягувалися або відштовхувалися електромагнітами (на малюнку дві верхні пари не показано).

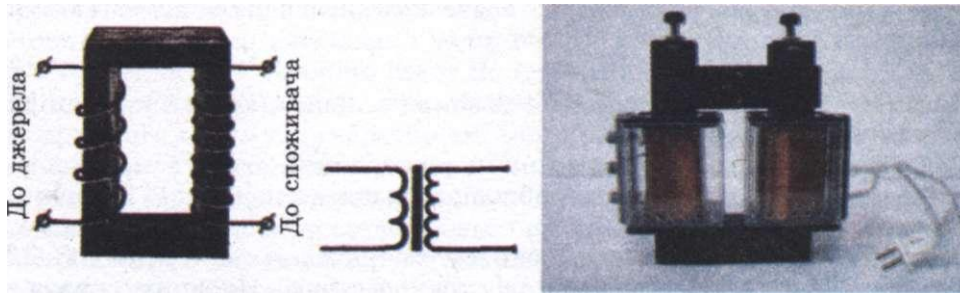
Одним із серйозних недоліків цієї і попередніх конструкцій електродвигунів була непостійність обертального моменту: у зв'язку з позмінним притяганням та відштовхуванням магнітів дія електродвигунів була поштовхоподібною, що було малоперспективним для застосування їх на практиці.

Перший крок для ліквідації цього недоліку зробив молодий італійський учений, згодом професор фізики Болонського і Пізанського університетів, **А. Пачінотті**. У 1860 р. він сконструював електродвигун із кільцевим якорем і практично постійним обертальним моментом (мал. 94): основні деталі цієї установки — якорь 7 і електромагніти 2. Якорь із сталі мав форму кільця із зубцями, за допомогою латунних спиць він прикріплювався на вертикальному валу. Між зубцями на кільце намотувалися котушки 3, кінці яких виводилися до пластин колектора, розміщеного на нижній частині вала. Обмотки електромагнітів вмикалися послідовно із обмотками якоря, тобто можна сказати, що це був перший електродвигун із послідовним збудженням. Учений вказував на можливість перетворення своєї машини в генератор. Відомості про електродвигун Пачінотті були опубліковані в 1836 р., проте про ідею кільцевого якоря згадали лише через 10 років.

## § 19. ТРАНСФОРМАТОР. ВИРОБНИЦТВО, ПЕРЕДАЧА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Однією з важливих переваг змінного струму над постійним є те, що силу струму і напругу змінного струму можна в найширших межах перетворювати (трансформувати) без істотних втрат потужності. Для зменшення витрат електричної енергії в лініях електропередач силу струму в них зменшують, а напругу збільшують до сотень тисяч і більше вольт, а в місцях споживання електроенергії напругу знижують до необхідних значень (сила струму при цьому відповідно зростає).

**Трансформатор** — це прилад, призначений для перетворення параметрів змінного струму, що складається із виготовленого з м'якого феромагнетика осердя замкненої форми, на якому встановлено дві обмотки — первинну і вторинну.



Мал. 95

Уперше трансформатор сконструював у 1878 році російський вчений **П. М. Яблочков**, а на початку ХХ ст. його вдосконалив професор **С. М. Усатий** і професор Київського університету **М. Й. Доліво-Добровольський**. Трансформатор складається із замкненого осердя з феромагнетика, на якому розміщують дві (інколи більше) котушки у вигляді обмоток з дроту. Одну обмотку, яку вмикають у джерело змінної напруги, називають первинною, другу обмотку, до якої приєднують «навантаження», що споживає енергію, називають вторинною (мал. 95).

В основу роботи трансформатора покладено явище електромагнітної індукції. Розглянемо принцип дії трансформатора. Нехай на вхід трансформатора подається змінна напруга  $U_1$ . В осерді трансформатора виникає змінний магнітний потік, який пронизує як первинну, так і вторинну обмотки трансформатора. У первинній і вторинній обмотках відповідно виникають ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ і } \varepsilon_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де  $N_1$  і  $N_2$  — кількість витків первинної і вторинної обмоток.

Визначимо напруги на вході і виході трансформатора:

$$U_1 = I_1 R_1 - \varepsilon_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ і } U_2 = I_2 R_2 - \varepsilon_2 = I_2 R_2 + N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де  $R_1$  і  $R_2$  — відповідно опори первинної і вторинної обмоток трансформатора;  $I_1$  і  $I_2$  — сили струмів, які проходять по первинній і вторинній обмотках.

Розглянемо випадок, коли вторинна обмотка розімкнена, тобто  $I_2 = 0$  (холостий хід). Технічні трансформатори конструюють так, щоб виконувалась умова  $I_1 R_1 \ll \varepsilon_1$ , тобто обмотки трансформатора мають невеликий активний опір, але велику індуктивність. Поділивши почленно одне на одне рівняння напруг, отримуємо

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Напруга на кінцях первинної обмотки трансформатора так відноситься до напруги на кінцях його вторинної обмотки, як кількість витків первинної обмотки відноситься до кількості витків вторинної обмотки.

Це відношення називають **коефіцієнтом трансформації  $k$** :

$$k = \frac{N_1}{N_2}$$

Якщо  $k > 1$ , то трансформатор буде знижувальним, якщо  $k < 1$  — підвищувальним.

Трансформатор перетворює змінний електричний струм так, що відношення сили струму до напруги приблизно однакове в первинній і вторинній обмотках.

За допомогою трансформатора знижують значення сили струму і збільшують напругу під час передавання електричної енергії. Це сприяє зниженню теплових втрат ( $Q = I^2 R t$  — закон Джоуля—Ленца). Враховуючи, що потужність сили струму визначається добутком напруги і сили струму, таке зменшення сили струму не змінить переданої потужності.

Передавання електроенергії на великі відстані здійснюють при напругах у декілька сотень тисяч вольтів. Генератори потужних електростанцій виробляють силу струму напругою від 6 до 20 кВ.

Перші генератори були створені в 50-х роках XIX ст., а вже в 70-х роках почалося їх промислове виробництво. Тепер рівень виробництва і споживання енергії — найважливіший показник розвитку продуктивних сил суспільства. Головне значення при цьому має електроенергія — найуніверсальніша і найзручніша для використання форма енергії.

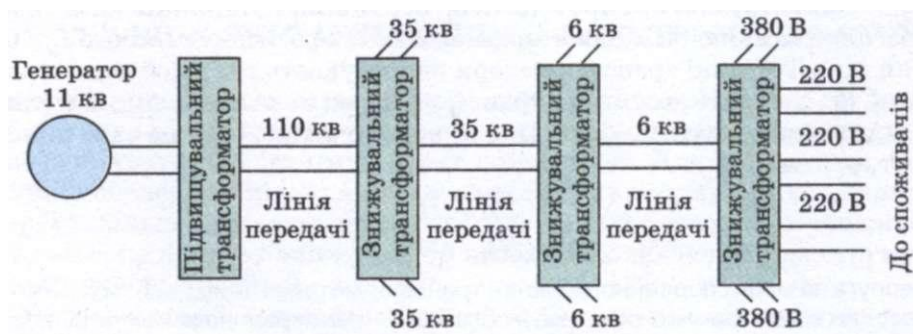
Електроенергію в Україні виробляють на таких електростанціях: теплових (ТЕС і ТЕЦ), гідро (ГЕС), атомних (АЕС) і вітрових (ВЕС).

Джерелом енергії на ТЕС і ТЕЦ (теплоелектроцентрально) є вугілля, газ, торф, мазут та ін., на ГЕС — потенціальна енергія води, піднятої греблею, на АЕС — ядерне паливо, розміщене в тепловидільних елементах (ТВЕЛ) ядерного реактора, на ВЕС — енергія вітру.

Для передавання електроенергії від електростанцій використовують трансформатори для підвищення напруги до декількох сотень кіловольтів. На місцях споживання електроенергії за допомогою трансформаторів напругу зменшують (мал. 96).

Сучасна цивілізація неможлива без широкого використання електроенергії. Порушення постачання електроенергією великого міста внаслідок аварії паралізує його життя.

Понад 90 % споживаної людством енергії отримують від спалювання вугілля, нафти, газу. Для цього використовують теплові електростанції, на яких



Мал. 96

хімічна енергія палива перетворюється в електричну. За рахунок згоряння палива відбувається нагрівання води, перетворення її в пару і нагрівання пари. Струмінь пари високого тиску спрямовується на роторні лопаті парової турбіни і примушує їх обертатися. Ротор турбіни обертає ротор генератора електричного струму. Генератор змінного струму перетворює механічну енергію в енергію електричного струму.

Змінний струм від генератора по провідниках надходить до споживачів, де електрична енергія перетворюється в інші види енергії. За допомогою електродвигуна змінного струму енергія електромагнітних коливань перетворюється у механічну енергію, а в лампах розжарення, в спіралях електронагрівальних приладів електрична енергія змінного струму перетворюється у внутрішню енергію. Електричну енергію широко застосовують у промисловості, сільському господарстві, на транспорті тощо.



### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. З чого складається трансформатор і яке його призначення?
2. Яке фізичне явище покладене в основу роботи трансформатора?
3. Як визначити коефіцієнт трансформації?
4. Де використовують трансформатори?
5. Де виробляється електроенергія і як вона передається до споживача?

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. Напруга на кінцях ділянки кола, по якому проходить змінний струм, змінюється з часом за законом  $U = U_{\max} \cos \omega t$ , В. У момент часу  $t = \frac{T}{6}$  напруга дорівнює 10 В. Визначте амплітуду напруги і циклічну частоту, якщо період коливань становить 0,01 с.

#### Розв'язання

Циклічна частота визначається за формулою  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , тому  $\omega = 628 \text{ с}^{-1}$ .

Миттєве значення напруги в момент  $t = \frac{T}{6}$  можна визначити так:

$$U = U_{\max} \cos \frac{2\pi T}{T} \frac{1}{6} = U_{\max} \cos \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2} U_{\max}.$$

Звідси  $U_{\max} = 2U$ . Отже,  $U_{\max} = 20 \text{ В}$ .

2. Що трапиться, коли вийняти осердя й ввімкнути обмотку трансформатора у мережу з напругою, на яку він розрахований?

#### Розв'язання

У даному випадку згорить первинна обмотка.

#### Рівень А

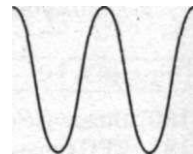
180. Визначте період та частоту змінного струму, кутова частота якого дорівнює 100 л Гц.
181. ЕРС генератора змінного струму змінюється за законом  $\mathcal{E} = 310 \sin 100\pi t$ , В. Визначте амплітуду ЕРС, частоту та період її зміни, а також ЕРС у момент часу 0,035 с.



182. Сила струму на ділянці кола змінюється за законом  $J = 10\sin 400\pi t$ , А. Визначте амплітудне значення сили струму, період і частоту зміни сили струму, а також силу струму в момент часу 1,25 мс.
183. Напруга в мережі, що її виміряли вольтметром, становить 120 В. Чому дорівнює амплітудне значення напруги?
184. Первинна і вторинна обмотки трансформатора не перебувають у безпосередньому електричному контакті. Яким чином відбувається передача енергії електричного струму з першої у другу?
185. Чим знижувальний трансформатор відрізняється від підвищувального? Чи можна знижувальний трансформатор використати як підвищувальний?
186. Трансформатор у режимі холостого ходу все-таки споживає з електромережі потужність, хоч і вкрай малу. На що вона витрачається?
187. Під якою напругою перебуває первинна обмотка ненавантаженого трансформатора, що має 100 витків, якщо вторинна обмотка має 250 витків, а напруга на ній дорівнює 550 В? Який коефіцієнт трансформації цього трансформатора?
188. Первинна обмотка ненавантаженого трансформатора перебуває під напругою 220 В. Напруга на вторинній обмотці, що має 450 витків, становить 660 В. Який коефіцієнт трансформації в цьому випадку? Яка кількість витків у первинній обмотці?
189. Трансформатор має коефіцієнт трансформації 10. Яка напруга підведена до його первинної обмотки, якщо в режимі холостого ходу на затискачах вторинної обмотки напруга становить 22 В? Скільки витків у первинній обмотці, якщо у вторинній їх 100?
190. По лінії електропередачі передається потужність 15 кВт. Сила струму в лінії 10 А, а втрати потужності на нагрівання проводів становлять 2 %. Який опір проводів лінії?
191. Втрати потужності у двопровідній лінії опором 2 Ом становлять 2 %. У лінію передається потужність 2,5 кВт. Які втрати напруги на проводах лінії?
192. Від трансформаторної підстанції передається потужність 5 кВт. Сила струму в лінії електропередачі при цьому становить 25 А. Який ККД лінії електропередачі, якщо її опір 0,5 Ом?

### Рівень В

193. Як відомо, графік залежності ЕРС від часу при рівномірному обертанні провідної рамки в однорідному магнітному колі є синусоїда. Як зміниться вигляд графіка, якщо частота обертання рамки збільшиться вдвічі?
194. Електроплитку можна живити як змінним, так і постійним струмом. Чи однаково розжарюється спіраль плитки, якщо в обох випадках вольтметри показали однакові напруги?
195. Визначте значення ЕРС, яка індукується в рамці площею  $100 \text{ см}^2$ , що обертається із частотою 50 Гц у магнітному полі з індукцією 0,2 Тл. Запишіть закон зміни ЕРС, що індукується в рамці, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до лінії індукції магнітного поля.
196. Скільки витків має рамка площею  $500 \text{ см}^2$ , якщо під час обертання її з частотою 1200 об/хв у магнітному полі з індуктивністю 100 мТл у ній індукується ЕРС, амплітудне значення якої дорівнює 63 В. Запишіть закон зміни ЕРС, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до лінії індукції.
197. На мал. 97 показано графік змінного струму частотою 1 кГц. Яка частота розгортки графіка?
198. Під час обертання дротяної рамки в однорідному магнітному полі магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за за-



Мал. 97

- коном  $\Phi = 0,01 \cos 10\pi t$ , Вб. У якому положенні була рамка в початковий момент часу? Який вигляд має залежність ЕРС індукції від часу? Яка частота обертання рамки? Чому дорівнюють максимальні значення ЕРС та магнітного потоку?
199. З якою метою у трансформаторах котушки первинної і вторинної обмоток одягають на замкнене феромагнітне осердя?
  200. Обмотку підвищувального трансформатора зроблено із дроту різного діаметру. В якій із обмоток, первинній чи вторинній, діаметр дроту більший?
  201. Що може трапитись, якщо трансформатор, призначений для експлуатації в мережі змінного струму 220 В, приєднати до джерела постійного струму такої ж напруги?
  202. Первинну обмотку знижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації 8 увімкнено в мережу з напругою 220 В. Опір вторинної обмотки 2 Ом, а сила струму в ній 2 А. Визначте ЕРС, індуквану у вторинній обмотці, та напругу на навантаженні.
  203. Підвищувальний трансформатор має коефіцієнт трансформації 0,5. Навантаження споживає потужність 190 Вт при силі струму 0,44 А. Опір вторинної обмотки дорівнює 30 Ом. Яка напруга підведена до первинної обмотки, якщо її опір вкрай малий? Яку потужність споживає трансформатор?
  204. Трансформатор радіотранслятора навантажений 400 гучномовцями, кожен з яких споживає струм силою 8,3 мА при напрузі 30 В. Напруга на його первинній обмотці дорівнює 480 В. Напруга на вторинній обмотці в режимі холостого ходу дорівнює 31 В. Який опір вторинної обмотки? Яка сила струму в первинній обмотці трансформатора?
  205. Теплова електростанція на виробництво електроенергії 1 кВт/год витрачає умовне паливо масою 320 г. Який ККД електростанції? Питома теплота згоряння умовного палива 29 МДж/кг.
  206. Електростанція передає потужність 2 ГВт під напругою 500 кВ. Визначити опір лінії електропередачі, якщо її ККД 96 %.
  207. Місцева електростанція передає в лінію потужність 500 кВт. Які втрати потужності в лінії та який її ККД, якщо вона працює під напругою 20 кВ, а її опір 20 Ом?

### ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

#### Контрольні запитання

1. Джеймс Максвелл стверджував, що електричний струм — це те, що створює магнітне поле. Як це твердження слід розуміти?
2. У досліді Ерстеда магнітна стрілка не притягується до провідника зі струмом і не відштовхується від нього, а лише повертається. Яка важлива особливість ліній магнітної індукції впливає з цього факту?
3. Із виразу для модуля сили Лоренца отримайте вираз для модуля сили Ампера.
4. Є два види сталі: одна з великою залишковою індукцією, друга — з порівняно незначною. Яка з них більше придатна для виготовлення постійних магнітів, а яка для осердь трансформаторів? Чому?
5. Запропонуйте який-небудь нескладний спосіб стирання інформації, записаної на магнітну стрічку або плівку.
6. Замкнений контур провідника рухається в неоднорідному магнітному полі вздовж ліній магнітної індукції поля. Доведіть, що ЕРС індукції в цьому випадку не дорівнює нулю.
7. Чи залежить ЕРС індукції в рухомому провіднику, що перетинає лінії магнітної індукції, від його опору? А сила струму? Чому?

8. Навколо провідника зі струмом виникло магнітне поле. Що є джерелом енергії цього поля?
9. Як — послідовно чи паралельно — з'єднані між собою проводи двопровідної лінії електропередачі?
10. Як добути у вторинній обмотці трансформатора постійний електричний струм?
11. Опір вторинного кола трансформатора зменшують. Як відіб'ється це на ККД трансформатора? Чому? Опори котушок мізерно малі.
12. При однакових напругах втрати на коронний розряд у лініях постійного струму менші, ніж у лініях змінного струму. Чому?

### Що я знаю і вмю робити

**Я вмю використовувати співвідношення між фізичними величинами під час розв'язування фізичних задач**

1. До кінців прямолінійного мідного провідника з площею поперечного перерізу  $2 \text{ мм}^2$  прикладено напругу 6 В. Визначте найбільшу силу, з якою однорідне магнітне поле індукцією 100 мТл може діяти на цей провідник.

2. Яку роботу виконує однорідне магнітне поле з індукцією 20 мТл під час переміщення в ньому прямого провідника завдовжки 50 см на відстань 10 см, якщо по ньому проходить струм силою 10 А? Переміщення відбувається в напрямку дії сили Ампера, а провідник весь час утворює з вектором магнітної індукції кут  $30^\circ$ .

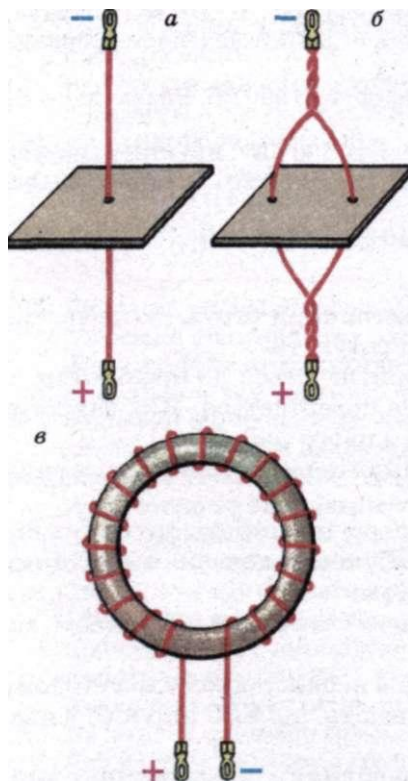
3. Магнітний потік через кожні 100 однакових витків котушки становить 200 мВб. Під час його рівномірного зменшення впродовж 5 мс у котушці виникає ЕРС 400 В. До якого значення зменшується магнітний потік?

4. Магнітний потік через контур замкнутого провідника опором 100 мОм за 5 с змінюється на 20 мВб. Яка сила струму, що протікає у провіднику під час цієї зміни, якщо магнітний потік змінюється рівномірно?

**Я знаю, які є спектри магнітних полів, і вмю їх малювати**

5. На мал. 98, а показано прямий провідник, що проходить через картонний екран, площина якого перпендикулярна до провідника. На мал. 98, б жилу провідника розділено на дві гілки, що також проходять через екран. На мал. 98, в зображено тороїдальне дерев'яне осердя, що має суцільну обмотку.

Намалюйте в зошитах спектри магнітних полів прямого і розділеного провідника в площинах екранів і картину магнітного поля тороїдальної обмотки в площині малюнка.



Мал. 98

**Я знаю, як взаємодіють між собою провідники зі струмом**

6. На мал. 99 показано котушки, кінці обмоток яких досить довгі і закріплені в спеціальних затискачах. З'єднання кінців котушок з джерелом струму наведено на мал. 99, а. Визначте характер взаємодії котушок і намалуйте в зошитах схеми їхніх магнітних полів.

7. На мал. 99, зображено дві котушки А і В. Між котушками підвішена на тонких гнучких провідниках котушка С. В середині цієї котушки закріплена стрілка. Визначте положення цієї стрілки при виникненні струму в усіх котушках.

**Я знаю, як побудований трансформатор, вмю пояснювати, як він працює**

8. Чи може трансформатор: а) мати одну первинну обмотку і кілька вторинних; б) змінювати напругу постійного струму; в) підвищувати напругу одночасно зі збільшенням сили змінного струму?

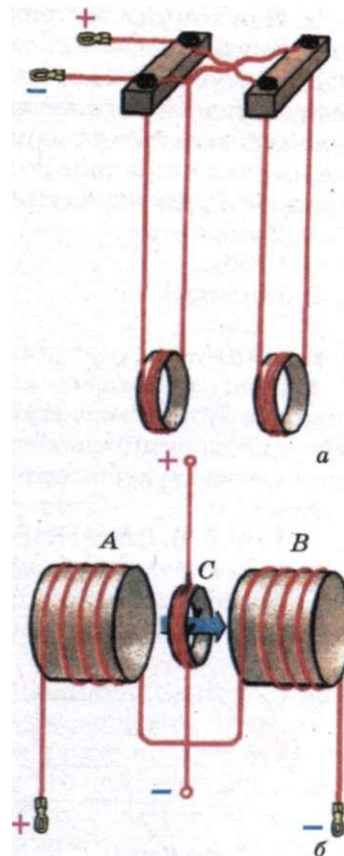
9. Чи змінює трансформатор частоту сили струму?

10. Чим пояснити, що ККД трансформатора вищий, ніж у найбільш вдалих конструкцій електродвигунів?

11. Під якою напругою перебуває первинна обмотка ненавантаженого трансформатора, що має 100 витків, якщо вторинна обмотка має 250 витків, а напруга в ній 550 В? Який коефіцієнт трансформації цього трансформатора?

12. Первинну обмотку знижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації 10 увімкнено в мережу з напругою 220 В. Опір вторинної обмотки 4 Ом, а сила струму в ній 3 А. Визначте ЕРС, індуквану у вторинній обмотці, та напругу на навантаженні.

13. Коефіцієнт трансформації підвищувального трансформатора дорівнює 0,5. Вторинна обмотка має опір 0,2 Ом, а опір навантаження 10,8 Ом. Напруга на навантаженні становить 216 В. Якою напругою живиться трансформатор? Яка сила струму в первинній обмотці? Який ККД трансформатора?



Мал. 99

**ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ**

**Варіант I**

- Силовою характеристикою магнітного поля є  
А. вектор магнітної індукції. Б. магнітна проникність.  
В. магнітний потік. Г. сила Лоренца. Д. сила Ампера.
- Сила Лоренца — це сила, з якою магнітне поле діє на  
А. електричний заряд, що рухається.  
Б. провідник зі струмом.

В. нерухомий електричний заряд.

Г. постійний магніт.

Д. нейтральну частинку, що рухається.

3. Визначте напрям сили Лоренца, яка діє з боку магнітного поля на рухомий негативний заряд  $q$ . Вектор магнітної індукції напрямлений від нас, перпендикулярно до площини малюнка, вектор швидкості руху заряду лежить у площині малюнка.

А. Вниз.

Б. Вгору.

В. Вправо.

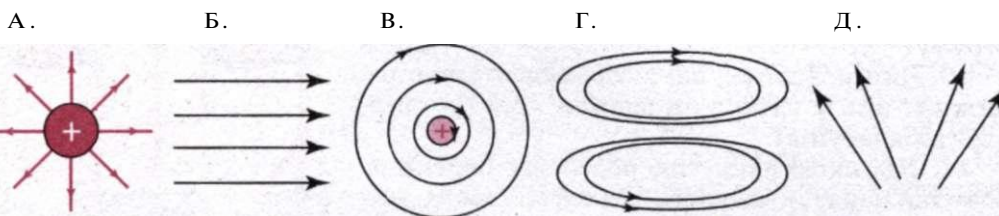
Г. Вліво.

Д. До нас.

4. Куди напрямлена сила Лоренца, з якою магнітне поле постійного магніту діє на рухомий електрон? Вектори індукції магнітного поля і швидкості частинки взаємно перпендикулярні і лежать у площині малюнка.

А. Вгору. Б. Вліво. В. До нас. Г. Від нас. Д. Вправо.

5. Який з варіантів відповідає картині силових ліній магнітного поля прямолінійного провідника зі струмом?



6. Провідник, по якому тече струм силою 5 А, розміщений у магнітному полі з індукцією 10 мТл. Кут між напрямом сили струму і вектором магнітної індукції поля становить  $60^\circ$ . Визначте довжину провідника, якщо поле діє на нього з силою 20 мН.

А. 0,12 м. Б. 120 см. В. 0,46 м. Г. 4,6 см. Д. 0,46 см.

7. Електрон влітає в однорідне магнітне поле індукцією  $10^{-3}$  Тл зі швидкістю 100 км/с перпендикулярно до силових ліній поля. Визначте силу, яка діє на електрон з боку магнітного поля.

А.  $1,6 \cdot 10^{-20}$  Н. Б.  $1,6 \cdot 10^{-17}$  Н. В. 16 мкН. Г.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Н. Д.  $1,6 \cdot 10^{-21}$  Н.

8. Який магнітний потік створюється магнітним полем Землі через підлогу площею  $25 \text{ м}^2$ , якщо вертикальна складова вектора індукції цього поля 50 мкТл?

А. 2 мкВб. Б. 0. В. 1,25 мВб. Г. 0,5 мкВб. Д. 2,5 мВб.

9. При переміщенні провідника довжиною 80 см зі струмом силою 20 А в однорідному магнітному полі з індукцією 1,2 Тл перпендикулярно до нього виконано роботу 1,92 Дж. Визначте переміщення провідника.

А. 1 м. Б. 1 см. В. 10 м. Г. 0,1 м. Д. 0,1 см.

10. Максимальний обертальний момент, який діє на рамку площею  $1 \text{ см}^2$ , розміщену в магнітному полі, дорівнює 2 мкН · м. Сила струму, що проходить у рамці, становить 0,5 А. Визначте індукцію магнітного поля.

А. 0,04 Тл. Б. 0,4 Тл. В. 4 Тл. Г. 26 мТл. Д. 46 Тл.

11. Плоска прямокутна рамка має 250 витків, площу  $500 \text{ см}^2$  і розміщена в однорідному магнітному полі з індукцією 0,2 Тл. Якої сили струм проходить у витках рамки, якщо найбільший обертальний момент, що діє на рамку, дорівнює  $2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ?

А. 0,1 А. Б. 2,5 А. В. 1 А. Г. 25 А. Д. 10 А.

12. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і їх назвами.

А. Обертальний момент.	1. Н.
Б. Магнітна індукція.	2. Вб.
В. Магнітний потік.	3. $\text{Н} \cdot \text{м}$ .
Г. Сила Лоренца.	4. Тл.

13. Індукційний струм виникає у будь-якому замкнутому провідному контурі, якщо

А. контур перебуває в однорідному магнітному полі.  
 Б. контур рухається поступально в однорідному магнітному полі.  
 В. змінюється магнітний потік, що пронизує контур.  
 Г. контур перебуває в неоднорідному магнітному полі.  
 Д. магнітний потік, що пронизує контур, не змінюється.

14. В однорідному магнітному полі, що змінюється, розміщена нерухома дротяна рамка. Виберіть правильне твердження.

А. Якщо вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площі рамки, в рамці виникає індукційний струм.

Б. Якщо вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площі рамки, магнітний потік через площину рамки весь час дорівнює нулю.

В. ЕРС індукції в рамці залежить тільки від площі рамки.

Г. Індукційний струм у рамці виникає за будь-якого положення рамки.

Д. ЕРС індукції в рамці не залежить від площі рамки.

15. На малюнку наведено схематичне зображення короткозамкненої котушки, яку охоплює дротяний виток із джерелом струму й вимикачем. Виберіть правильне твердження.

А. Індукційний струм у котушці буде існувати весь час, поки ключ замкнуто.

Б. При замиканні ключа в котушці на короткий час виникає індукційний струм.

В. У котушці взагалі не виникає індукційний струм.

Г. При розмиканні ключа в котушці не виникає індукційний струм.

Д. Магнітне поле індукційного струму завжди напрямлене вгору.

16. Який із наведених нижче виразів характеризує поняття індуктивності?

А. Фізична величина, що характеризує дію магнітного поля на заряд.

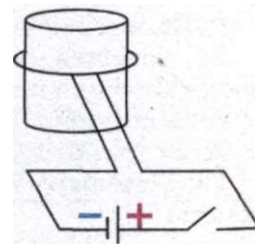
Б. Фізична величина, що характеризує здатність провідника перешкоджати проходженню струму.

В. Фізична величина, що характеризує здатність провідника перешкоджати зміні струму.

Г. Явище, що характеризує дію магнітного поля на заряд, який рухається.

Д. Явище, що характеризує дію магнітного поля на нерухомий заряд.

17. Якщо розімкнути ключ у колі живлення потужного електромагніту, спостерігається сильна іскра. Що її викликає?



- А. ЕРС джерела струму.
- Б. ЕРС самоіндукції в котушці електромагніту.
- В. Хаотичний рух вільних електронів у провідниках.
- Г. Електростатичне поле.
- Д. Електричні заряди.

18. У провіднику, який рухається в магнітному полі, виникає ЕРС індукції. Виберіть правильне твердження.

- А. Якщо збільшити індукцію магнітного поля, ЕРС індукції в провіднику, який рухається, зменшиться.
- Б. ЕРС індукції максимальна, якщо швидкість провідника перпендикулярна до провідника і вектора індукції магнітного поля.
- В. ЕРС індукції залежить тільки від швидкості руху провідника.
- Г. ЕРС індукції залежить тільки від довжини провідника.
- Д. ЕРС індукції залежить тільки від індукції магнітного поля.

19. Виберіть формулу для визначення магнітного потоку.

А.  $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ . Б.  $L = \frac{\Phi}{I}$ . В.  $W = \frac{LI^2}{2}$ . Г.  $\mathcal{E} = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$ . Д.  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

20. У котушці з індуктивністю 0,5 Гн при зростанні сили струму виникла ЕРС самоіндукції 12 В. На скільки щосекунди збільшувалася сила струму?  
А. 0,1 А. Б. 6 А. В. 12 А. Г. 24 А. Д. 30 А.

21. Як потрібно змінити індуктивність контуру, для того, щоб за незмінного значення сили струму в ньому енергія магнітного поля зменшилася в 4 рази?

- А. Збільшити у 2 рази.
- Б. Зменшити у 2 рази.
- В. Збільшити в 4 рази.
- Г. Зменшити в 4 рази.
- Д. Збільшити у 8 разів.

22. Котушка має 200 однакових витків. Магнітний потік, який пронизує витки котушки при силі струму 8 А, дорівнює 3 мВб. Яка енергія магнітного поля котушки?

- А. 24 Дж. Б. 4 Дж. В. 5 Дж. Г. 1,2 Дж. Д. 2,4 Дж.

23. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А.  $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

1. Закон електромагнітної індукції.

Б.  $\mathcal{E} = Blv \sin \alpha$ .

2. Енергія магнітного поля.

В.  $\mathcal{E} = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$ .

3. ЕРС самоіндукції.

Г.  $W = \frac{LI^2}{2}$ .

4. ЕРС індукції в рухомих провідниках.

24. Виробництво електроенергії зумовлено розвитком

- А. промисловості.
- Б. побутової техніки.
- В. охорони навколишнього середовища.

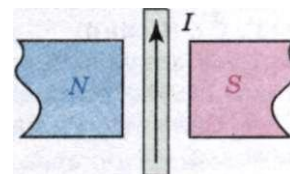
- Г. лісового господарства.  
 Д. транспорту.
25. В основу роботи генератора постійного струму покладено явище  
 А. нагрівання провідників під дією електричного струму.  
 Б. породження змінним магнітним полем вихрового електричного.  
 В. нагрівання магнітним полем.  
 Г. породження магнітним полем електричного.  
 Д. породження змінним магнітним полем електростатичного поля.
26. Генератор змінного струму складається з  
 А. замкненої рамки, постійного магніту.  
 Б. ротора, статора.  
 В. ротора, статора, щітки.  
 Г. ротора, статора, щіток, кілець.  
 Д. ротора, статора, щіток, напівкілець.
27. Первинна обмотка трансформатора використовується для  
 А. створення змінного магнітного поля.  
 Б. індуквання струму.  
 В. нагрівання.  
 Г. охолодження.  
 Д. під'єднання до джерела постійного струму.

## Варіант II

1. Фізична величина, що характеризує магнітні властивості речовини, називається

- А. магнітною індукцією. Б. магнітним потоком.  
 В. діелектричною проникністю середовища.  
 Г. магнітною проникністю середовища. Д. магнітним полем.

2. Вкажіть напрям сили Ампера, з якою магнітне поле діє на відрізок провідника зі струмом. Провідник розташований у площині малюнка перпендикулярно до силових ліній магнітного поля.

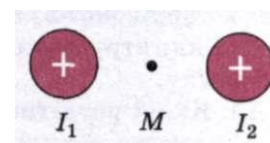


- А. Вліво.  
 Б. Вправо.  
 В. До нас.  
 Г. Від нас.  
 Д. Вгору.

3. Яке співвідношення є математичним записом модуля сили Лоренца?

- А.  $F = q\mathcal{E}$ . Б.  $F = qBv\sin\alpha$ . В.  $F = BIl\sin\alpha$ . Г.  $F = \mu N$ . Д.  $F = ma$ .

4. По двох паралельних прямолінійних провідниках, розташованих перпендикулярно до площини малюнка, течуть струми з силами  $I_1 = 1$  А та  $I_2 = 2$  А. Куди напрямлений вектор магнітної індукції у точці  $M$ , яка рівновіддалена від цих провідників?



- А. Вгору. Б. Вліво. В. Вниз. Г. Від нас. Д. Вправо.

5. На відрізок провідника довжиною 10 см, по якому тече струм силою 10 А, з боку однорідного магнітного поля діє сила  $5 \cdot 10^{-3}$  Н. Яка індукція магнітного поля, якщо провідник розташований перпендикулярно до силових ліній поля?

- А. 200 Тл. Б. 200 мТл. В. 5 мТл. Г. 5 Тл. Д. 2 Тл.



6. Яка сила діє на відрізок провідника завдовжки 10 см в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл, якщо сила струму у провіднику 1 А, а кут між напрямом струму та силовими лініями магнітного поля становить  $60^\circ$ ?  
 А. 0,866 Н. Б. 8,66 Н. В. 8,66 мН. Г. 5 мН. Д. 5 Н.

7. Визначте доцентрове прискорення електрона, який рухається зі швидкістю  $1 \cdot 10^6$  м/с в однорідному магнітному полі з індукцією  $1 \cdot 10^{-3}$  Тл, якщо швидкість електрона перпендикулярна до вектора магнітної індукції.

А.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  м/с<sup>2</sup>. Б. 10 м/с<sup>2</sup>. В. 160 м/с<sup>2</sup>. Г.  $1 \cdot 10^3$  м/с<sup>2</sup>. Д.  $1,76 \cdot 10^{14}$  м/с<sup>2</sup>.

8. Визначте модуль вектора індукції магнітного поля Землі, вертикальна і горизонтальна складові якого відповідно дорівнюють 50 і 20 мкТл.

А. 70 мкТл. Б. 30 мкТл. В. 53,85 мкТл. Г. 45,83 мкТл. Д. 27,48 мкТл.

9. Магнітна індукція у бруску металу дорівнює 0,75 Тл, а індукція зовнішнього намагніченого поля дорівнює 0,0375 Тл. Яку відносну магнітну проникність має метал?

А. 10. Б. 15. В. 20. Г. 25. Д. 30.

10. Рамку площею 40 см<sup>2</sup> розмістили в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл так, що нормаль до рамки перпендикулярна до ліній індукції. При якій силі струму на рамку діятиме обертальний момент 20 мН · м?

А. 5 мА. Б. 100 А. В. 10 мА. Г. 15 А. Д. 50 А.

11. Електрон під дією сили однорідного електричного поля, що дорівнює  $1,456 \cdot 10^{-17}$  Н, рухається з прискоренням. Визначте прискорення електрона.

А.  $1,6 \cdot 10^{13}$  м/с<sup>2</sup>. Б. 1 м/с<sup>2</sup>. В. 0,016 м/с<sup>2</sup>. Г.  $1 \cdot 10^{12}$  м/с<sup>2</sup>. Д.  $1,76 \cdot 10^{14}$  м/с<sup>2</sup>.

12. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А.  $F = qvB \sin \alpha$ . 1. Магнітна проникність середовища.

Б.  $\mu = \frac{B}{B_0}$ . 2. Сила Ампера.

В.  $\Phi = BS \cos \alpha$ . 3. Сила Лоренца.

Г.  $F = BIl \sin \alpha$ . 4. Магнітний потік.

13. У нерухомій дротяній рамці, що розташована в магнітному полі, виникає індукційний струм. Виберіть правильне твердження.

А. Сила струму максимальна, коли магнітний потік через рамку не змінюється.

Б. Сила струму прямо пропорційна опорі рамки.

В. Сила струму тим більша, чим повільніше змінюється магнітний потік через рамку.

Г. Якщо площа рамки паралельна лініям індукції магнітного поля, магнітний потік через рамку дорівнює нулю.

Д. Сила струму тим менша, чим швидше змінюється магнітний потік через рамку.

14. Якщо магнітне поле змінюється, то виникає

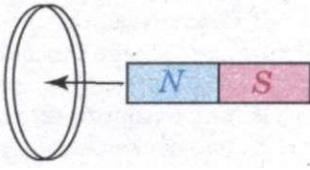
А. електростатичне поле.

Б. позитивний електричний заряд.

В. вихрове електричне поле.

Г. негативний електричний заряд.

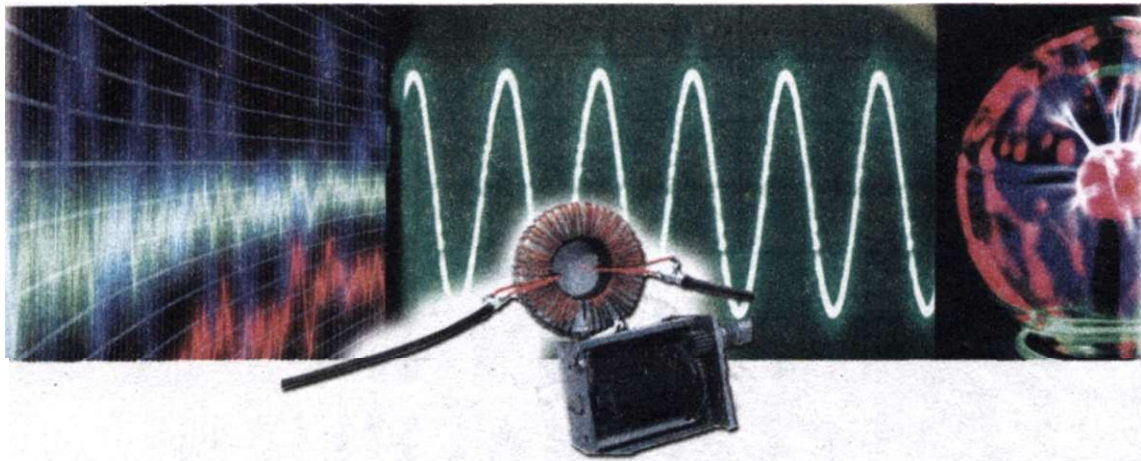
Д. позитивний і негативний електричні заряди.

15. Вихрове електричне поле виникає при
- проходженні постійного струму по замкнутому контуру.
  - змінах магнітного поля.
  - взаємодії двох електричних струмів.
  - взаємодії двох нерухомих заряджених частинок.
  - повертанні площини контуру навколо осі.
16. До центра мідного кільця, підвішеного на нитці, швидко підносять магніт (малюнок). Що відбудеться з кільцем?
- Кільце відштовхнеться від магніту.
  - Кільце залишиться нерухожим.
  - Кільце притягнеться до магніту.
  - У кільці виникне незатухаючий струм.
  - Кільце повернеться до магніту іншим боком.
- 
17. За 2,5 мс магнітний потік, який пронизує контур, рівномірно спадає від 10 до 5 мВб. Визначте ЕРС індукції в контурі.
- 2 В.
  - 4 В.
  - 0,2 В.
  - 0,4 В.
  - 20 В.
- 18.3 якою швидкістю провідник завдовжки 1 м рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 12 мТл, якщо між його кінцями виникає різниця потенціалів 120 мВ? Сам провідник і напрям його руху перпендикулярні до ліній індукції магнітного поля.
- 0,1 м/с.
  - 10 м/с.
  - 35 м/с.
  - 2 м/с.
  - 100 м/с.
19. Визначте індуктивність котушки, в якій під час зміни сили струму від 5 до 10 А за 0,1 с виникає ЕРС самоіндукції 10 В.
- 300 Гн.
  - 0,05 Гн.
  - 20 Гн.
  - 4 Гн.
  - 0,2 Гн.
20. Визначте швидкість зміни магнітного потоку в соленоїді з 1000 витків під час збудження в ньому ЕРС індукції 150 В.
- 15 Вб/с.
  - 0,15 Вб/с.
  - 1,5 Вб/с.
  - 0,25 Вб/с.
  - 25 Вб/с.
21. У котушці з індуктивністю 0,2 Гн сила струму 10 А. Чому дорівнює енергія магнітного поля цієї котушки?
- 1 Дж.
  - 10 Дж.
  - 20 Дж.
  - 100 Дж.
  - 0,01 Дж.
22. Визначте індуктивність котушки з осердям, якщо при швидкості зміни сили струму 50 А/с у ній збуджується ЕРС самоіндукції 20 В.
- 400 мГн.
  - 0,04 Гн.
  - 40 Гн.
  - 40 мкГн.
  - 4 Гн.
23. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і їх назвами:
- |                       |           |
|-----------------------|-----------|
| А. Індуктивність.     | 1. Вебер. |
| Б. Магнітна індукція. | 2. Генрі. |
| В. Магнітний потік.   | 3. Вольт. |
| Г. ЕРС індукції.      | 4. Тесла. |
24. В основу роботи генератора змінного струму покладено явище
- гістерезису.
  - електромагнітної індукції.
  - нагрівання магнітним полем.
  - розрядки конденсатора.
  - зарядки конденсатора.
25. Генератор постійного струму складається з
- індуктора, якоря, колектора із щітками.
  - індуктора, якоря.

- В. індуктора, колектора.
  - Г. якоря, колектора із щітками.
  - Д. індуктора, колектора із щітками, постійного магніту.
26. В основу роботи трансформатора покладено закон
- А. Джоуля—Ленца.
  - Б. Кірхгофа.
  - В. Ома для постійного струму.
  - Г. Фарадея для електромагнітної індукції.
  - Д. Ньютона.
27. Вторинна обмотка трансформатора використовується для
- А. під'єднання до джерела змінного струму та створення магнітного поля.
  - Б. під'єднання до джерела постійного струму.
  - В. індукування струму за рахунок змінного магнітного поля.
  - Г. створення постійного струму.
  - Д. нагрівання.

# МЕХАНІЧНІ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ





## Розділ 3 Колювання і хвилі

- Колювальний рух. Період і частота колювань
- Гармонічні колювання
- Математичний маятник.  
Період колювань математичного маятника
- Вільні колювання. Вимушені колювання.  
Резонанс
- Поширення механічних колювань у пружному середовищі. Поперечні та поздовжні хвилі.  
Довжина хвилі
- Колювальний контур. Виникнення електромагнітних колювань у колювальному контурі
- Гармонічні електромагнітні колювання.  
Частота власних колювань контуру
- Затухаючі та вимушені електромагнітні колювання. Резонанс
- Електромагнітне поле. Електромагнітні хвилі
- Швидкість поширення, довжина, частота електромагнітної хвилі.  
Шкала електромагнітних хвиль
- Властивості електромагнітних хвиль та їх застосування

## § 20. КОЛИВАЛЬНИЙ РУХ. ПЕРІОД І ЧАСТОТА КОЛИВАНЬ

Як вам вже відомо з попередніх класів, коливаннями або коливальними рухами називають такі види механічного руху чи зміни стану системи, які періодично повторюються в часі, наприклад, механічні коливання тіла на пружині, коливання маятників, коливання струн, вібрації фундаментів будівель, електромагнітні коливання в коливальному контурі.

За фізичною природою коливання поділяють на механічні та електромагнітні, за характером коливань — на вільні, вимушені та автоколивання. Хоча коливання досить різноманітні за своєю фізичною природою, але вони мають спільні закономірності й описуються однотипними математичними методами.

Коливання притаманні всім явищам природи. Пульсують зорі і обертаються планети Сонячної системи, у земній атмосфері та іоносфері циркулюють потоки заряджених і нейтральних частинок, вітри збуджують коливання і хвилі на поверхні водойм. Всередині будь-якого живого організму безперервно відбуваються процеси, які ритмічно повторюються, наприклад биття серця.

Світло — це також коливання, але електромагнітні. За допомогою електромагнітних коливань, які поширюються в просторі, можна здійснювати радіозв'язок, радіолокацію, передавати телевізійні передачі, а також лікувати деякі хвороби. Перелічити всі види коливань неможливо.

Наведені приклади механічних і електромагнітних коливань з першого погляду мають мало спільного. Проте під час їх дослідження було виявлено цікаву закономірність: різні за фізичною природою коливання описуються однаковими математичними рівняннями, що значно полегшує їх вивчення.

Пристрої, в яких можуть здійснюватися коливання, називають коливальними системами. Будь-яка коливальна система має положення рівноваги. Нерухома система обов'язково перебуває в такому положенні. Сама по собі система не може вийти з положення рівноваги; для цього необхідний вплив зовнішньої сили.

Важлива особливість коливальних рухів — їх періодичність, тобто точна або наближена повторюваність руху тіл через рівні інтервали часу.

**Мінімальний інтервал часу, через який відбувається повторення руху тіла, називають періодом коливань.**

Період коливань позначають літерою  $T$ . Його одиницею в СІ є одна секунда (1 с).

**Кількість коливань, здійснених за одиницю часу, називають частотою коливань  $\nu$ .**

Одиницею частоти в СІ є один герц (1 Гц).  $1 \text{ Гц} = 1 \frac{1}{\text{с}}$ . Вона названа так на честь відомого німецького фізика Г. Герца. Якщо частота коливань  $\nu = 1 \text{ Гц}$ , то це означає, що відбувається одне коливання за секунду. Приблизно з такою частотою б'ється людське серце. Якщо  $\nu = 50 \text{ Гц}$ , то відбуваються 50 коливань за секунду.

Частота коливань — це величина, обернена до періоду:  $\nu = \frac{1}{T}$ .

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають коливальним рухом?
2. Яким явищем природи притаманні коливальні рухи?
3. Що таке частота та період коливань?

## § 21. ГАРМОНІЧНІ КОЛИВАННЯ

Серед усіх різноманітних форм коливань важливе місце належить гармонічним коливанням. Гармонічні коливання — це найпростіші періодичні коливання. Більшість коливань, які трапляються на практиці, складні. З курсу математики відомо, що будь-яке складне періодичне коливання є сумою найпростіших гармонічних коливань (гармонік). Гармонічні коливання — єдиний тип коливань, форма яких не спотворюється у процесі відтворення.

Коливання, під час яких величини, що їх описують, змінюються з часом за законом синуса або косинуса, називають гармонічними.

Переконаємося в цьому за допомогою коливання кульки, яка ковзає вздовж осі  $Ox$ , під дією сили пружності пружини  $F = -kx$ .

Коливання кульки можна розглядати як проекцію колового руху кульки (мал. 100) на вісь  $Ox$ . Нехай  $A$  — рухомий радіус допоміжного кола, що відповідає найбільшому відхиленню кульки від положення рівноваги  $x_{\max}$ . Якщо обертати кульку по колу з такою кутовою швидкістю  $\omega$ , щоб проекція її руху збігалася з рухом кульки під дією сили пружності пружини, то її миттєве положення буде визначатися рівністю

$$x = x_{\max} \cos \varphi.$$

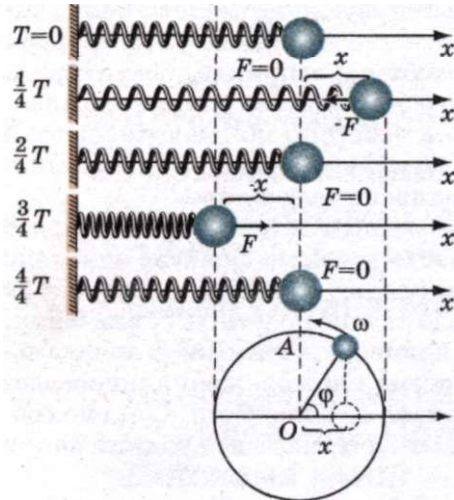
Під час обертання рухомого радіуса зі сталою кутовою швидкістю  $\omega$  кут  $\varphi$  між радіусом і віссю  $Ox$  зростає прямо пропорційно часу:

$$\varphi = \omega_0 t.$$

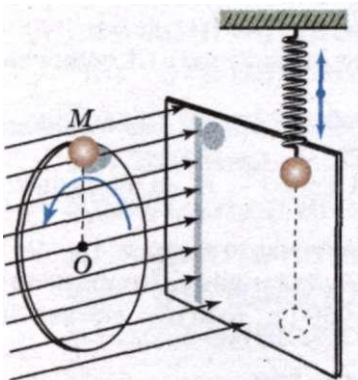
Проекція  $x$  рухомого радіуса на вісь  $Ox$  змінюватиметься за законом:

$$x = x_{\max} \cos \varphi = x_{\max} \cos \omega_0 t.$$

Аналогічно можна також порівняти коливання тіні кульки, закріпленої на



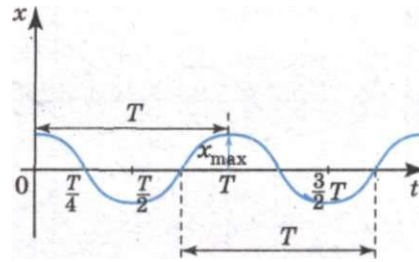
Мал. 100



Мал. 101

диску, який обертається зі сталою кутовою швидкістю  $\omega^0$ , і кульки пружинного маятника (мал. 101). Можна підібрати таку швидкість обертання диска, що рух тіні кульки на екрані повністю збігатиметься з рухом кульки пружинного маятника. Так само можна показати, що проекція рухомого радіуса  $OM$  на вертикальний діаметр змінюватиметься за законом:

$$x = x_{\max} \sin \varphi = x_{\max} \sin \omega_0 t.$$



Мал. 102

Проекції рухомого радіуса в обох описаних випадках можна розглядати як координати кульки, яка обертається по колу.

Таким чином, у зазначених випадках координата тіла, яке здійснює вільні коливання, змінюється з часом за законом синуса або косинуса. Графік залежності координати тіла від часу відповідно до  $x = x_{\max} \cos \omega_0 t$  є косинусоїда, зображена на мал. 102.

Важливою характеристикою коливального руху є амплітуда.

**Амплітудою гармонічних коливань** називають модуль найбільшого зміщення тіла (коливальної системи) від положення рівноваги.

Амплітуда може мати різні значення залежно від того, наскільки ми зміщуємо тіло від положення рівноваги в початковий момент часу, і від того, яка швидкість надається при цьому тілу. Іншими словами, амплітуда визначається початковими умовами і дорівнює множнику при синусоїдальній чи косинусоїдальній функції, який відповідає даному коливальному процесу.

Через інтервал часу  $T$ , що дорівнює періоду  $T$ , тобто зі збільшенням аргументу косинуса на  $\omega_0 T$ , рух повторюється і косинус набуває попереднього значення. Проте з математики відомо, що найменший період косинуса дорівнює  $2\pi$ . Отже,  $\omega_0 T = 2\pi$ , звідки

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

Таким чином, величина  $\omega_0$  — це кількість коливань тіла, але не за одну секунду, а за  $2\pi$  секунд. Вона називається циклічною або коловою частотою.

При заданій амплітуді гармонічних коливань координата коливного тіла в будь-який момент часу однозначно визначається аргументом косинуса (або синуса)  $\varphi = \omega_0 t$ .

**Величину  $\varphi$ , яка стоїть під знаком косинуса або синуса, називають фазою коливань**, що описуються цими функціями.

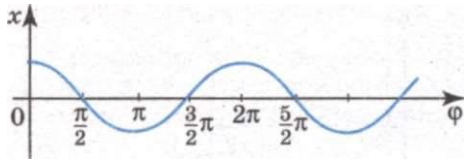
Одиницею фази є радіан або градус.

Від фази залежить значення не лише координати, а й швидкості, й прискорення, що змінюються також за гармонічним законом. Тому можна сказати, що при заданій амплітуді фаза визначає стан коливальної системи у будь-який момент часу.

Оскільки  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ , то  $\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}$ . Відношення  $\frac{t}{T}$  показує, яка частина

періоду пройшла від початку коливань.





Мал. 103

Будь-якому значенню часу, вираженому в частинах періоду, відповідає значення фази, виражене в радіанах.

Наприклад, коли пройде час  $t = \frac{T}{4}$

(чверть періоду),  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ .

На графіку можна зобразити залежність координати коливної точки не від часу, а від фази. На мал. 103 показано ту саму косинусоїду, що й на мал. 102, але на горизонтальній осі замість часу відкладено різні значення фази  $\varphi$ .

Вам вже відомо, що для гармонічних коливань координата тіла змінюється з часом відповідно до закону косинуса або синуса. Проте при цьому слід врахувати поняття фази.

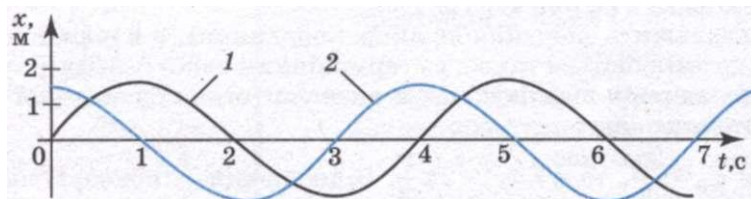
Синус відрізняється від косинуса лише зсувом аргументу на чверть періоду, тобто на  $\frac{\pi}{2}$ :  $\cos \varphi = \sin \left( \varphi + \frac{\pi}{2} \right)$ . Тому для опису гармонічних коливань за-

мість формули  $x = x_{\max} \cos \omega_0 t$  можна використати формулу  $x = x_{\max} \sin \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$ .

Проте при цьому початкова фаза, тобто значення фази в момент  $t = 0$ , дорівнюватиме не нулю, а  $\frac{\pi}{2}$ . Звичайно коливання тіла на пружині (або маятнику) збуджують, виводячи його з положення рівноваги, а потім відпускаючи. У початковий момент зміщення від положення рівноваги є максимальне, тому описувати коливання зручніше формулою  $x = x_{\max} \cos \omega_0 t$ , використовуючи косинус.

Інша річ, коли коливання тіла, що перебуває у стані спокою, збуджують короткочасним поштовхом. Тоді в початковий момент координата дорівнює нулю, і коливання зручніше описувати формулою з використанням синуса  $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$ , тому що при цьому початкова фаза дорівнює нулю.

Коливання, описані рівняннями  $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$  і  $x = x_{\max} \sin \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$ , різняться між собою лише фазами. Різниця фаз (зсув фаз) цих коливань дорівнює  $\frac{\pi}{2}$ . На мал. 104 показано графіки залежності координат від часу для



Мал. 104

двох гармонічних коливань, зсунутих за фазою на  $\frac{\pi}{2}$ . Графік 1 відповідає коливанням, що відбуваються відповідно до закону синусоїди  $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$ , а графік 2 — коливанням, що відбуваються відповідно до закону косинусоїди  $x = x_{\max} \cos \omega_0 t = x_{\max} \sin \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$ .

Щоб визначити різницю фаз двох коливань, обидва ці коливання треба записати через одну і ту саму тригонометричну функцію (косинус або синус).

У гармонічних коливаннях координати тіла, його швидкість і прискорення також змінюються гармонічно. Проекція швидкості на вісь  $Ox$  має такий вигляд:

$$v_x = -\omega_0 x_{\max} \sin \omega_0 t = \omega_0 x_{\max} \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Швидкість під час гармонічних коливань змінюється з часом гармонічно, але коливання швидкості випереджають за фазою коливання координати на  $\frac{\pi}{2}$ .

У момент, коли координата дорівнює нулю (момент проходження положення рівноваги), модуль швидкості максимальний, і, навпаки, швидкість дорівнює нулю, коли координата максимальна за модулем (мал. 105, а, б). Максимальне значення швидкості за модулем, тобто амплітуду  $v_{\max}$  коливань швидкості можна записати через амплітуду зміщення у вигляді

$$v_{\max} = \omega_0 x_{\max}.$$

Проекція прискорення на вісь  $Ox$  така:

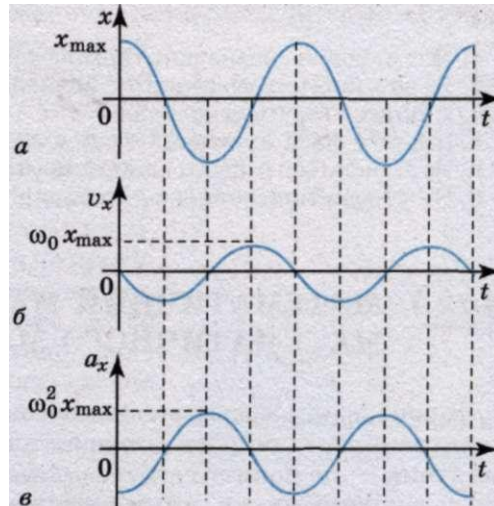
$$a_x = -\omega_0^2 x_{\max} \cos(\omega_0 t + \pi).$$

Під час гармонічних коливань прискорення змінюється гармонічно. Амплітуда прискорення

$$a_{\max} = \omega_0^2 x_{\max}.$$

За фазою коливання прискорення випереджають коливання координати на  $\pi$ .

Прискорення і координата за модулем набувають максимального значення одночасно, але мають протилежні знаки. У такому разі кажуть, що коливання відбуваються у протифазі (мал. 105, а, в).



Мал. 105

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які коливання називають гармонічними?
2. Як зв'язана циклічна частота коливань з періодом?
3. Що таке амплітуда коливань?
4. Що таке фаза коливань? Різниця фаз?
5. Як змінюється з часом швидкість у гармонічних коливаннях?
6. Як зв'язані прискорення й координата у гармонічних коливаннях?

## § 22. МАТЕМАТИЧНИЙ МАЯТНИК. ПЕРІОД КОЛИВАНЬ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА

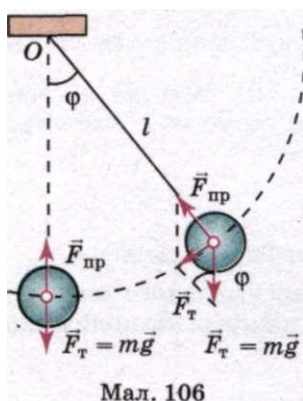
З попередніх класів ви знаєте, що математичним маятником вважають точкове тіло, підвішене до нерозтяжної і невагомої нитки. Математичний маятник — це поняття абстрактне, тому що: розміри кульки набагато менші за довжину нитки, цими розмірами можна нехтувати і розглядати кульку як матеріальну точку. Розтягом нитки також можна нехтувати, оскільки він дуже малий. Можна нехтувати і масою нитки порівняно з масою кульки.

Отже, з певним наближенням математичним маятником можна вважати кульку, підвішену на нитці (мал. 106). Рівняння руху математичного маятника має вигляд  $a = -\frac{g}{l}x$ . Разом з цим, розглядаючи рух проекції тіла, яке

рівномірно обертається по колу, можна записати  $a = -\omega^2 x$ . Прирівнюючи ці рівняння, отримаємо  $\omega^2 = \frac{g}{l}$ . Проте  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , тоді  $\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{l}$ , звідки

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

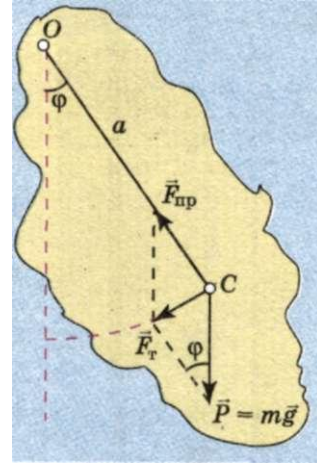
Ця формула для визначення періоду коливань математичного маятника була виведена і перевірена на дослідах голландським фізиком К. Гюйгенсом (1629—1695), тому її часто називають формулою Гюйгенса.



Період коливань математичного маятника залежить лише від прискорення вільного падіння в даному місці Землі і від довжини маятника. Період не залежить від амплітуди коливань і від маси підвішеного тягарця, що легко перевірити на дослідах з різними маятниками. Слід лише пам'ятати, що розміри тягарця мають бути малими порівняно з довжиною підвісу і що малим має бути також кут відхилення маятника від вертикалі. З наведеної залежності періоду коливань математичного маятника можна легко експериментально визначити прискорення вільного падіння. Для цього треба виміряти довжину маятника і період його коливань.

Залежність періоду колювань математичного маятника від Прискорення вільного падіння використовується для точних вимірювань прискорення вільного падіння на поверхні Землі. Річ у тому, що прискорення вільного падіння в різних точках земної поверхні на одній і тій самій географічній широті є неоднаковим і залежить, хоча й незначно, від густини порід, з яких складаються верхні шари земної кори.

Усяке тіло, що має вісь обертання, яка не проходить через центр мас, здатне здійснювати колювання. Такі тіла називають фізичними маятниками. Нехай ми маємо тіло довільної форми, закріплене на осі обертання  $O$  (мал. 107). Центр мас цього тіла — точка  $C$ . Відстань від осі обертання до центра мас позначимо  $a$ . Якщо таке тіло вивести зі стану рівноваги і відпустити, то воно здійснюватиме колювання під дією рівнодійної сили тяжіння та сили пружності, що виникає в самому тілі. У будь-який момент часу рівнодійна сил направлена до положення рівноваги. Отже, маємо необхідні умови для виникнення колювань, як у разі колювань тягарця на пружині та математичного маятника. Формула для визначення періоду колювань фізичного маятника за аналогією з формулою для математичного маятника матиме такий вигляд:



Мал. 107

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}},$$

де  $m$  — маса фізичного маятника;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $a$  — відстань від осі обертання до центра мас маятника.

У формулу входить величина  $I$ , що характеризує інертні властивості тіл, які обертаються. Цю величину називають моментом інерції тіла відносно осі обертання.



## ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

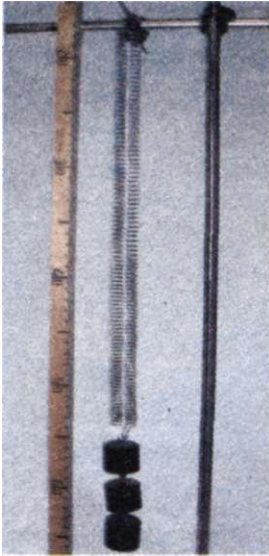
1. Яка коливальна система називається математичним маятником?
2. Від чого залежить період колювань математичного маятника?
3. Як і чому зміниться період колювання залізної кульки, підвішеної на нитці, якщо під нею помістити магніт?
4. Яка коливальна система називається фізичним маятником?

### Лабораторна робота № 4

#### ВИГОТОВЛЕННЯ МАЯТНИКА І ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ЙОГО КОЛІВАНЬ

Мета роботи: виготовити пружинний маятник і визначити період його колювань.

Обладнання: набір тягарців з механіки НГМ-100, тримач зі спіральною пружиною, штатив для фронтальних робіт, метр демонстраційний, секундомір або годинник із секундною стрілкою.



Мал. 108

## Хід роботи

1. Закріпити пружину з тримачем у лапці штатива і підвісити до неї тягарець масою 100 г. Поряд з тягарцем закріпити вертикально вимірювальну лінійку і позначити початкове положення тягарця.

2. Підвісити до пружини ще два тягарці масою по 100 г (мал. 108) і виміряти її видовження  $\Delta x$ , спричинене дією сили  $F = 2 \text{ Н}$ . За виміряними видовженнями і відомою силою обчислити жорсткість пружини:

$$k = \frac{F}{\Delta x}.$$

3. Знаючи жорсткість пружини, обчислити період  $T$  пружинного маятника масою 200 і 400 г за формулою

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

4. Залишити на пружині два тягарці масою по 100 г, вивести пружинний маятник з положення рівноваги, змістивши його на 5–7 см униз, і експериментально визначити період коливань маятника. Для цього,

вимірявши інтервал часу  $\Delta t$ , протягом якого маятник здійснює 20 повних

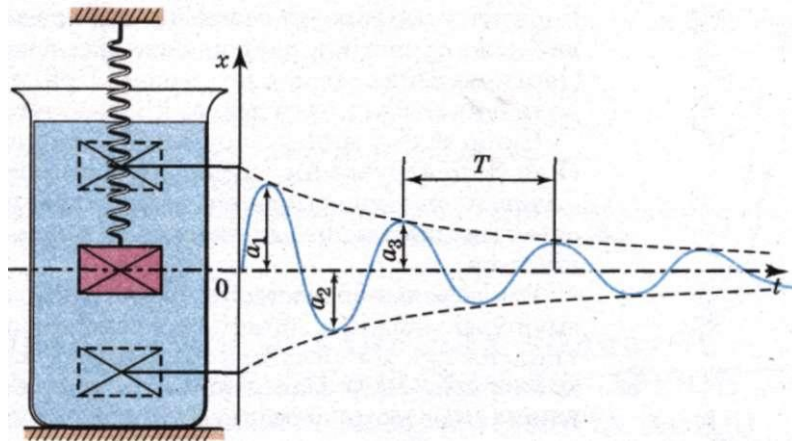
коливань, визначити період коливань за формулою  $T = \frac{\Delta t}{N}$ .

5. Такі самі вимірювання і обчислення виконати з маятником масою 400 г.
6. Скласти таблицю і внести у неї результати.
7. Порівняти результати і зробити висновки.

## § 23.

### ВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ. ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС

При розгляді гармонічних коливань ми нехтували втратами механічної енергії у коливальних системах, тобто розглядали ідеальні випадки. Проте, в реальних системах втрати механічної енергії завжди існують. Вони викликані наявністю тертя, опору середовища, утворенням механічних хвиль тощо. Тому амплітуда коливань у реальних системах з часом зменшується, і коливання, зрештою, припиняються. Наприклад, з часом припиняються коливання тягарця на пружині чи гойдалці, якщо їх час від часу не підштовхувати. Якщо в коливальній системі тіло вивести зі стану рівноваги і відпустити, то воно здійснюватиме так звані вільні коливання, які завжди є затухаючими. У розглянутих випадках вільних коливань тіла: математичного маятника, тягарця на пружині тощо припускалося, що тіло, яке коливається, не зустрічає на своєму шляху жодних перешкод. За таких ідеальних умов його гармонічні коливання можуть тривати необмежено довго. За реальних умов руху тіла, яке здійснює вільні коливання, завжди перешкоджають різні опо-



Мал. 109

ри, які сповільнюють коливання і сприяють їх затуханню. Наприклад, тертя коливного тіла по інших тілах, до яких воно дотикається внаслідок нерівності поверхонь. Затухання коливань настає також через опір повітря, води чи іншого середовища, в якому здійснюються коливання. Тертя між частинками пружного тіла (пружин, ресор), яке є джерелом відновлювальної сили пружності, також сприяє затуханню вільних коливань.

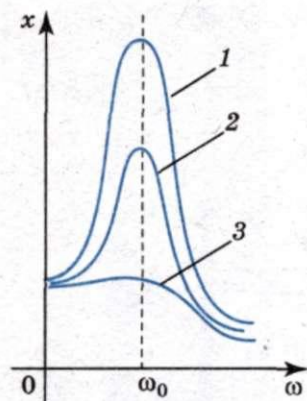
Розглянемо докладніше випадок, коли тіло коливається в середовищі, що чинить протидію його руху. На тіло з боку середовища діє сила, що залежить від швидкості тіла і напрямлена в бік, протилежний напрямку руху тіла. Прикладом може бути тягарець, підвішений на пружині в посудині з рідиною (мал. 109).

Якщо опір рідини великий порівняно з відновлювальною силою пружності, то коливальний рух тіла в такому середовищі взагалі неможливий. Тіло, виведене з положення рівноваги, прагне зайняти положення спокою, підходячи до цього положення поступово, без коливань. Якщо ж сила опору мала порівняно з силою пружності, то тіло, виведене з положення рівноваги, почне здійснювати в рідині затухаючий коливальний рух. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що амплітуда затухаючих коливань з часом зменшується. Важливо зауважити, що невеликий опір середовища мало змінює період власних коливань тіла, однак інтенсивно гасить ці коливання.

Затухання коливань у багатьох випадках — бажане і корисне явище, в інших — небажане й шкідливе. У першому випадку затухання коливань намагаються створити і підтримувати за допомогою відповідних механізмів і пристосувань. У другому випадку, навпаки, усувають затухання засобами, які зменшують вплив тертя й опору середовища, використанням змащення, заміни тертя ковзання тертям кочення за допомогою роликів підшипників тощо.

**Вимушеними коливаннями вважають коливання, що відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили.**

Наприклад, можна взяти в руку книжку і здійснювати нею вимушені коливання. На книжку з боку руки буде діяти зовнішня періодична сила. Однак, у таких вимушених коливаннях немає нічого особливого і цікавого.



Мал. 110

Інша річ, коли зовнішня періодична сила діє на тіло, яке може самостійно здійснювати вільні коливання (такі коливання завжди затухаючі). Прикладом цих коливань можуть бути дерева під дією вітру.

Якщо тіло в момент початку дії змущувальної сили було нерухомим, то спочатку амплітуда його коливань поступово зростає, а через певний час досягає максимального значення і далі вже не збільшується.

Важливе явище спостерігається у разі, коли частота змущувальної сили збігається з частотою коливань тіла, на яке ця сила діє. При цьому амплітуда коливань досягає максимального значення, яке у багато разів може перевищувати амплітуду вільних коливань. Таке явище називають резонансом. В ідеальному випадку, коли в системі немає опору,

резонанс настає, якщо частоти змущувальної сили і вільних коливань системи збігаються. Амплітуда коливань при цьому нескінченно зростає.

Пояснити явище резонансу найпростіше на основі таких міркувань. Під час резонансу створюються найсприятливіші умови для передавання енергії від зовнішнього джерела періодично змінної сили до коливальної системи, в якій можуть виникати вільні коливання. У коливальній системі, де не виникають вільні коливання, резонанс не спостерігається.

Амплітуда вимушених коливань під час резонансу залежить не лише від значення зовнішньої змущувальної сили, а й від тертя у коливальній системі. Із збільшенням зовнішньої сили, природно, зростає і амплітуда вимушених коливань. Вона набуває під час резонансу такого значення, для якого додатна робота зовнішньої сили повністю компенсує втрати енергії системою внаслідок тертя. Очевидно, що чим менше тертя в коливальній системі, тим більшою буде амплітуда вимушених коливань для однієї й тієї самої зовнішньої сили. Залежність амплітуди вимушених коливань від частоти для трьох коливальних систем з різними силами тертя і для однієї й тієї самої амплітуди зовнішньої сили показано на мал. 110. Тут крива 1 відповідає системі з мінімальною силою тертя, крива 2 — з середньою, а крива 3 — з максимальною. З цих графіків видно, що чим менше тертя в системі, тим сильніше зростає амплітуда вимушених коливань з наближенням системи до резонансу. Якщо тертя мале, то резонанс чітко виражений, а якщо велике, то нечітко. Коли частота змін змущувальної сили в системі далека від резонансної, в цьому разі амплітуда коливань мала і майже не залежить від сили опору в системі. Якщо ж тертя таке велике, що не виникають вільні коливання, то резонанс взагалі не спостерігається.

У багатьох випадках резонанс є корисним явищем. Резонанс ми використовуємо в різноманітних типах частотомірів. Особливо важливу роль він відіграє у радіотехніці. Однак трапляються випадки, коли резонанс треба не допускати, оскільки його неврахування може призводити до певних ускладнень, навіть до катастроф. Так, у Манчестері 60 осіб зруйнували міст через річку Ірвель, в якому виникли резонансні коливання під дією вітру. У 1850 р. зруйнувався Анжерський підвісний міст, коли по ньому крокував батальйон французької піхоти чисельністю 500 осіб, при цьому 226 осіб загинуло.

Наведені приклади засвідчують важливість дослідження коливань і необхідність урахування їх у техніці.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка різниця між вільними і вимушеними коливаннями?
2. У чому полягає явище резонансу?
3. Накресліть і поясніть графіки залежності амплітуди вимушених коливань від частоти змін змушувальної сили для двох значень сили опору.

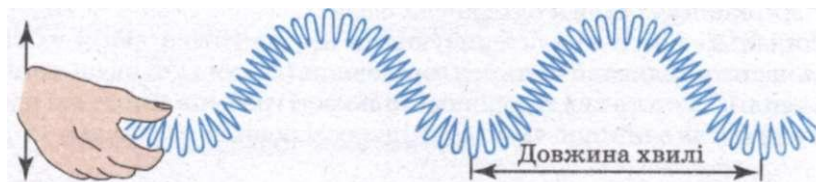
## § 24. ПОШИРЕННЯ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ У ПРУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ. ПОПЕРЕЧНІ ТА ПОЗДОВЖНІ ХВИЛІ. ДОВЖИНА ХВИЛІ

Поширення коливань у середовищі називають хвильовим процесом. Важливо зазначити, що поширення хвиль не супроводжується перенесенням частинок середовища, — вони лише коливаються навколо положень рівноваги. Проте з хвилею переноситься енергія, яка поширюється у просторі від джерела коливань.

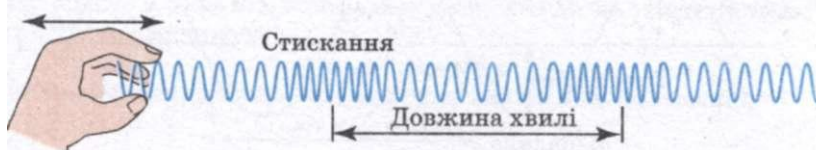
Напрямок поширення хвилі називають променем. Залежно від напрямку коливань частинок щодо напрямку поширення хвилі розрізняють хвилі поперечні й поздовжні.

Коли хвиля рухається по пружині, припустимо, зліва направо, ділянки пружини коливаються вгору і вниз, тобто в напрямі, перпендикулярному (або поперечному) до руху самої хвилі (мал. 111). Така хвиля називається поперечною.

Однак не всяка хвиля є поперечною. Коливання можуть відбуватися і вздовж напрямку поширення хвилі. Тоді хвиля називається поздовжньою. У поздовжній хвилі частинки середовища коливаються в тому самому напрямі, в якому поширюється хвиля. Поздовжні хвилі легко спостерігати в м'якій розтягнутій пружині, почергово стискаючи і розтягуючи один її кінець (мал. 112). Розглянемо процес утворення поперечної хвилі (мал. 113). Першій точці надається коливальний

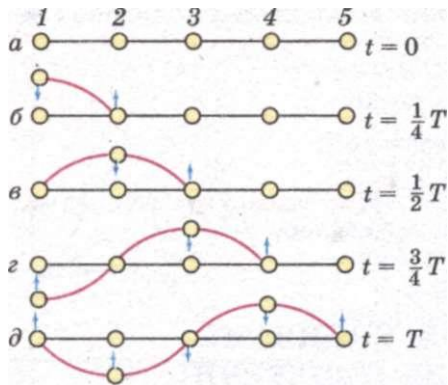


Мал. 111



Мал. 112





Мал. 113

рух зовнішньою періодичною силою, що має період коливань  $T$ . Усі точки середовища зв'язані між собою пружними силами. Тому коливання точки 1 спричиняє коливання точки 2, що, у свою чергу, спричиняє коливання точки 3 і т. д. — у пружному середовищі поширюватиметься хвиля. Під час коливань у середовищі, наприклад у твердому тілі, виникають пружні сили (відбувається деформація зсуву). Через чверть періоду точка 1 відхилиться на максимальну відстань від положення рівноваги і почне рухатися вниз. У цей час точка 2 починає рухатися вгору (мал. 113, б). Ще через чверть періоду зміщення точки 2 буде максималь-

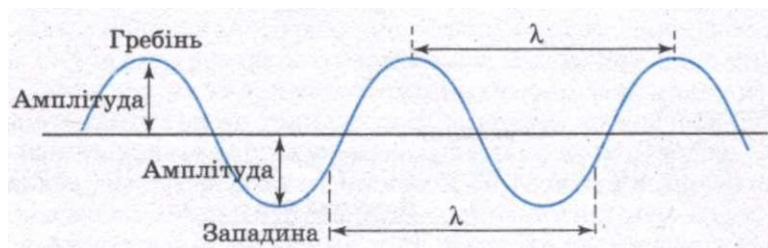
ним, а точка 3 почне рухатися вгору (мал. 113, в). Точка 1 у цей момент досягне положення рівноваги, набуде максимальної швидкості і продовжуватиме рухатися вниз. Наступні фази процесу за один період ілюструє мал. 113, г, д. Якщо енергія коливань не зменшуватиметься, то й коливання поширюватимуться далі.

У разі поширення поздовжньої хвилі точки пружного середовища також здійснюють коливання щодо своїх положень рівноваги, але при цьому коливання їх відбуваються у тому самому напрямку, в якому поширюється хвиля, тому під час поширення поздовжньої хвилі спостерігаються згущення й розрідження частинок середовища, в якому хвиля поширюється.

На мал. 114 показані основні параметри, якими характеризують періодичну синусоїдальну хвилю. Вищі точки хвильового руху називають гребенями, а нижчі — западинами. Амплітуда — це максимальна висота гребеня чи глибина западини, виміряна відносно нульового рівня (або положення рівноваги); повний розмах коливань від гребеня до западини дорівнює подвійній амплітуді.

Відстань між двома сусідніми гребенями називають довжиною хвилі  $\lambda$ . Довжина хвилі дорівнює відстані між будь-якими двома послідовними однаковими за висотою точками хвилі (або відстані між найближчими точками, які коливаються в однакових фазах).

Синусоїдальні хвилі характеризуються ще частотою хвилі  $\nu$ , під якою розуміють частоту коливань частинок середовища (частота коливань поплавця на поверхні хвилі). Частота хвилі дорівнює кількості гребенів хвилі, які проходять через дану точку за одиницю часу (або кількості повних коливань).



Мал. 114

**Швидкістю хвилі  $v$**  називають швидкість, з якою переміщається гребінь хвилі.

Швидкість хвилі слід відрізнити від швидкості частинок самого середовища. За період, протягом якого хвиля здійснює одне колювання, тобто опускається з гребеня в западину і знову піднімається на гребінь, хвиля просується на відстань  $\lambda$ , і її швидкість дорівнює  $v = \frac{\lambda}{T}$ .

## 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка хвиля називається поперечною, яка позовжною?
2. Що називають довжиною хвилі?
3. Чи однакою є довжина хвиль однієї й тієї самої частоти в різних середовищах?

## Задачі та справи

### Розв'язуємо разом

1. Як зміниться період вертикальних колювань тягарця, що висить на двох однакових пружинах, якщо послідовне з'єднання пружин замінити паралельним?

#### Розв'язання

Період колювань тягарця на пружині  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ , де  $k$  — жорсткість пружини, яка визначається відношенням сили, що зумовила видовження пружини, до цього видовження:  $k = \frac{F}{x}$ .

Якщо послідовно з'єднані дві однакові пружини, які розтягуються силою  $F_1 = F$ , то жорсткість системи  $k_1 = \frac{F_1}{x_1} = \frac{F}{2x} = \frac{k}{2}$ , оскільки довжина кожної з пружин збільшується на  $x$ . При паралельному з'єднанні однакових пружин сила  $F_2$ , потрібна для збільшення довжини обох пружин на  $x$ , має бути в два рази більша від  $F$ , отже,  $k_2 = \frac{F_2}{x} = \frac{2F}{x} = 2k$ .

У випадку послідовного з'єднання пружин  $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}}$ , а у випадку паралельного —  $T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{2k}}$ .

Звідси  $\frac{T_1}{T_2} = 2$ . Період зменшиться у два рази.

2. Матеріальна точка масою 5 г виконує гармонічні колювання частотою 0,5 Гц. Амплітуда колювань 0,03 м. Визначте: а) швидкість точки в момент часу, коли її зміщення дорівнює 1,5 см; б) максимальну силу, яка діє на точку; в) повну енергію точки, яка здійснює колювання.

#### Розв'язання

А. Рівняння зміщення точки, яка здійснює колювання, має вигляд

$$x = x_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Швидкість руху точки змінюється за гармонічним законом  $v = x_{\max} \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$ . Знаючи, що  $\varphi = 0$ , отримуємо  $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$ ;  $v = x_{\max} \omega_0 \cos \omega_0 t$ .

Щоб виразити швидкість через зміщення, потрібно виключити з цих рівнянь час. Для цього піднесемо ці рівняння до квадрата, перше рівняння поділимо на  $x_{\max}^2$ , друге —  $x_{\max}^2 \omega_0^2$  і додамо їх. Тоді отримаємо

$$\frac{x^2}{x_{\max}^2} + \frac{v^2}{x_{\max}^2 \omega_0^2} = 1 \quad \text{або} \quad \frac{x^2}{x_{\max}^2} + \frac{v^2}{4\pi^2 \nu^2 x_{\max}^2} = 1.$$

З отриманого рівняння визначимо  $v = \pm 2\pi\nu \sqrt{x_{\max}^2 - x^2}$ . Підставивши значення фізичних величин, одержимо  $v = \pm 0,082$  м/с. Знак «+» відповідає випадку, коли точка віддаляється від положення рівноваги, знак «-» відповідає руху точки до положення рівноваги.

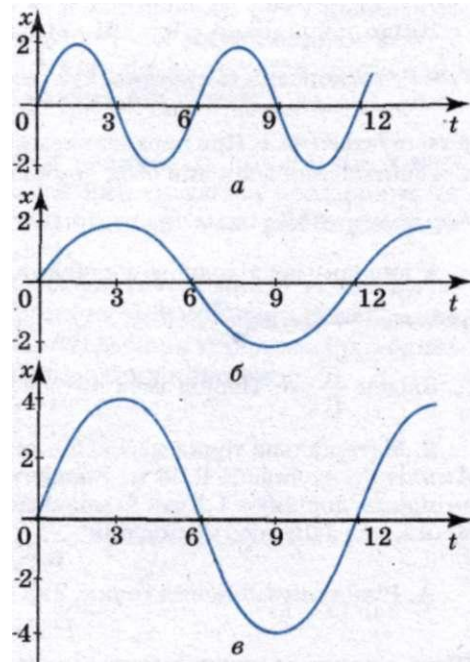
Б. Силу, яка діє на точку, визначимо за другим законом Ньютона  $F = ma$ . Прискорення точки, яка коливається, дорівнює  $a = -x_{\max} \omega_{\max}^2 \sin(\omega_0 t + \varphi) = -4\pi^2 \nu^2 x_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi)$ . Тоді силу, яка діє на точку, визначимо за формулою  $F = -4\pi^2 \nu^2 x_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi)$ , звідки  $F_{\max} = -4\pi^2 \nu^2 x_{\max}$ . Підставивши значення фізичних величин, отримаємо  $F_{\max} = 1,48 \cdot 10^{-3}$  Н.

В. Повна енергія точки, що коливається, дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергій, які має точка у довільний момент часу. У момент часу, коли кінетична енергія досягає максимального значення, потенціальна енергія дорівнює нулю. Тому повна енергія точки дорівнює максимальній кінетичній енергії  $W_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$ .

Максимальна швидкість визначається за формулою  $v_{\max} = 2\pi\nu x_{\max}$ , тоді повна енергія буде дорівнювати  $W = W_{\max} = 2\pi^2 m \nu^2 x_{\max}^2$ . Підставивши значення фізичних величин, отримаємо:  $W_x = 2,22 \cdot 10^{-5}$  Дж.

### Рівень А

208. Є камертони на 50,126 і 440 Гц. Визначте період коливань кожного камертона.
209. Яку амплітуду, період, частоту і початкову фазу мають гармонічні коливання, задані рівнянням  $x = \sin(628t + 2)$ ?
210. Маятник здійснює коливання з частотою 4 Гц. Визначте кількість коливань, які зробить маятник за 8 с, а також період коливань.
211. Визначте зміщення кульки за 0,05 с, яка здійснює коливання за законом  $x = 5 \sin 600t$ ?
212. Чим відрізняються один від одного коливальні рухи, графіки яких зображено на мал. 115?
213. Маятник має довжину 9,8 м. Який період коливань цього маятника, якщо його можна вважати математичним?
214. Маятник завдовжки 150 см за 300 с робить 125 коливань. Чому дорівнює прискорення вільного падіння?
215. Який період вільних коливань пружинного маятника, якщо маса вантажу 0,8 кг, а жорсткість пружини 20 Н/м?



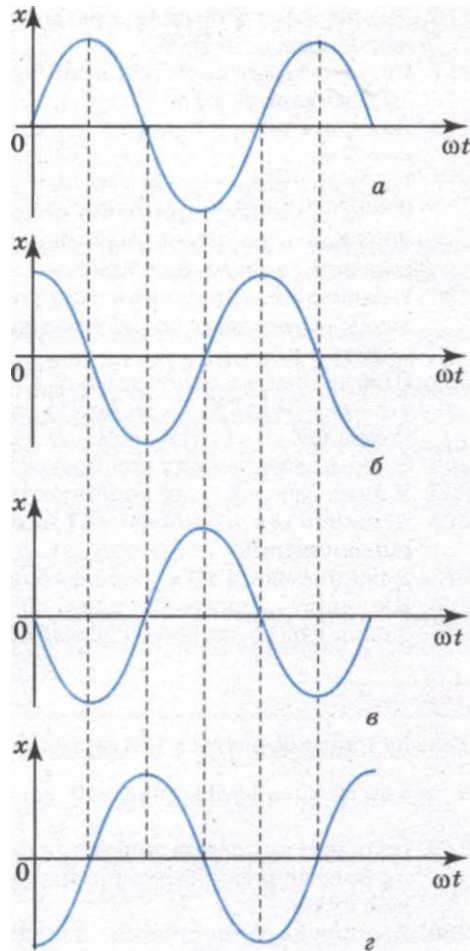
Мал. 115

216. Визначте частоту коливань вантажу масою 400 г, який підвішено до пружини жорсткістю 160 Н/м.
217. Визначте масу вантажу, який на пружині, що має жорсткість 250 Н/м, робить 20 коливань за 16 с.
218. Визначте період і частоту вільних коливань математичного маятника довжиною 5 м.
219. Пружина жорсткістю 110 Н/м під дією прикріпленого до неї вантажу масою 0,7 кг здійснює гармонічні коливання. Який період коливань цього пружинного маятника і його повна енергія, якщо максимальне зміщення вантажу від положення рівноваги 5 см?
220. Причеплена до пружини гири коливається вертикально з амплітудою 4 см. Визначте повну енергію коливань гирі, якщо коефіцієнт жорсткості пружини становить 1 кН/м.
221. Щоб допомогти водію вивести автомобіль, який застряг у багнюці, кілька чоловік «розгойдують» автомобіль, причому поштовхи, як правило, виконують за командою. Чи байдуже, через які інтервали часу подається команда?
222. У яких середовищах поширюються поздовжні хвилі? Чому?
223. У яких середовищах поширюються пружні поперечні хвилі і чому?
224. Довжина хвилі дорівнює 0,1 м, а швидкість її поширення 0,5 м/с. Визначте період коливань.
225. Довжина хвилі 10 м, період коливань 2,5 с. Яка швидкість поширення хвилі?
226. Швидкість поширення хвилі 20 м/с, її довжина 40 м. Яка частота коливань?
227. Хвиля з частотою 600 Гц поширюється зі швидкістю 320 м/с. Яка довжина хвилі?

## Рівень В

228. За 1 хв виконується 180 гармонічних коливань, амплітуда яких становить 7 см, а початкова фаза дорівнює  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi, 2\pi$ . Запишіть рівняння таких коливань.
229. Визначте зміщення точки при гармонічному коливанні через 0,25 періоду після його початку; через 0,6 періоду після його початку. Початкова фаза дорівнює нулю.
230. Амплітуда гармонічного коливання точки становить 4 см. Яке зміщення точки відповідає фазі  $0, 2\pi$ , коли початкова фаза дорівнює нулю?
231. Амплітуда гармонічного коливання точки дорівнює 10 см, а частота 20 Гц. Визначте швидкість і прискорення точки в момент часу  $\frac{1}{120}\text{с}; \frac{1}{80}\text{с}; \frac{1}{40}\text{с}$ .
232. Маленьке тіло робить коливання, що описуються рівнянням  $x = 2\sin(\omega t + 0,5)$ . Визначте амплітуду, період, початкову фазу коливань, а також максимальні значення швидкості і прискорення тіла.
233. Визначте за графіками (мал. 116, а—г) початкову фазу кожного коливального руху. Запишіть рівняння кожного руху, якщо  $x_{\max} = 5\text{ см}; v = 10\text{ Гц}$ .
234. Амплітуда коливань 10 см, а частота 0,5 Гц. Запишіть рівняння залежності  $x = x(t)$  і побудуйте його графік. Визначте фазу і зміщення через 1,5 с. Через який час зміщення буде 7,1 см?
235. Частинка здійснює гармонічні коливання за законом синуса з періодом 3 с, амплітудою 2 см і початковою фазою, що дорівнює 0. Запишіть рівняння коливань і побудуйте його графік. Встановіть, у які моменти часу протягом першого коливання точка може знаходитись на відстані 1 см від положення рівноваги.
236. Годинник, довжина маятника якого дорівнює 1 м, поспішає за добу на 15 хв. Як треба змінити довжину маятника, щоб годинник показував точний час?

237. До динамометра причепили вантаж, і покажчик опустився на 2,5 см. Після цього вантаж трохи відтягнули донизу і відпустили. Утворилися коливання навколо положення рівноваги. Яка частота коливань?
238. Вантаж масою 0,2 кг, що висить на пружині, здійснює коливання з амплітудою 5 см. Визначте період коливань вантажу, якщо для видовження пружини на 1 см потрібна сила 2 Н. Запишіть рівняння цього гармонічного коливання, якщо вантаж починає коливатися з крайнього положення.
239. Щоб відвести гойдалку з людиною, яка сидить на ній, на великий кут, необхідно прикласти значну силу. Чому розгойдати гойдалку до того ж відхилення значно легше?
240. Хлопчик несе на коромислі відра з водою, період власних коливань яких 0,8 с. При якій швидкості руху вода почне особливо сильно вихлюпуватись, якщо довжина кроку хлопчика дорівнює 60 см?
241. Повз спостерігача, що стоїть на березі річки, за 6 с пройшло 4 гребені хвиль. Відстань між першим і четвертим гребнем 12 м. Визначте період коливань частинок води, швидкість поширення та довжину хвилі.
242. Рибалка помітив, що за 10 с поплавок здійснив на хвилях 20 коливань, а відстань між сусідніми гребнями хвиль 1,2 м. Яка швидкість поширення хвиль?
243. Від падіння каменя на поверхні води виникли хвилі. Як далеко від спостерігача впав камінь, якщо хвиля дійшла до нього за 5 с, відстань між сусідніми гребнями 0,5 м, і за 5 с до спостерігача дійшло 20 хвиль?
244. Хлопчик, знаходячись на березі моря, визначив, що відстань між гребнями хвиль 12 м. Крім того, він підрахував, що за 75 с повз нього пройшло 16 гребнів. Визначте швидкість поширення хвиль.
245. Визначте відстань між сусідніми точками хвилі, що знаходяться в однакових фазах, якщо швидкість хвилі 330 м/с, а частота коливань 256 Гц.
246. По поверхні води поширюється хвиля зі швидкістю 2,4 м/с при частоті коливань 2 Гц. Яка різниця фаз у точках, що лежать на одному промені і віддалені одна від одної на 90 см?
247. Коли вітер попутний, звук поширюється зі швидкістю 380 м/с, а коли зустрічний — зі швидкістю 320 м/с. Яка швидкість вітру і швидкість звуку в тиху погоду?



Мал. 116

## § 25. КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР. ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ У КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Змінні електричні і магнітні поля не можуть існувати окремо одне від одного, оскільки в просторі, де існує змінне магнітне поле, збуджується електричне поле, і навпаки. Одночасні періодичні зміни зв'язаних між собою електричного і магнітного полів називають електромагнітними коливаннями. Таким чином, щоб одержати електромагнітні коливання, треба мати електричне коло, в якому енергія електричного поля могла б перетворюватися на енергію магнітного поля, і навпаки. Оскільки магнітне поле зосереджене переважно в котушках, а електричне — в конденсаторах, найпростіше коло для утворення електромагнітних коливань має складатися з конденсатора і котушки. Таке коло називають коливальним контуром. Активний опір провідників, з яких виготовлено коливальний контур, має бути малим, інакше електромагнітні коливання не виникатимуть у контурі.

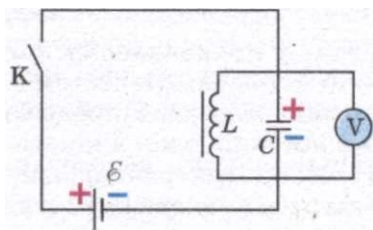
Найпростішою установкою, в якій досить просто можна створювати електромагнітні коливання, є електричне коло, до складу якого входить котушка індуктивністю  $L$  та конденсатор ємністю  $C$  (мал. 117).

Щоб можна було легко спостерігати за змінами напруги на обкладках конденсатора, до них приєднано вольтметр  $V$ . Коливання мають бути досить повільними. Тому в такій установці використовують котушку значної індуктивності і конденсатор великої ємності, вольтметр з нульовою поділкою посередині шкали.

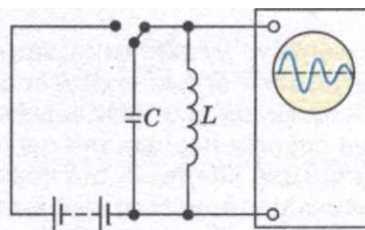
Якщо замкнути ключ, то конденсатор  $C$  зарядиться від джерела постійного струму  $\mathcal{E}$  і вольтметр покаже напругу на його обкладках. Після від'єднання джерела живлення від досліджуваного кола, вольтметр показує наявність коливань напруги, які швидко припиняються. Значення і знак напруги на обкладках конденсатора змінюються, що свідчить про періодичну перезарядку обкладок конденсатора.

Таким чином, можна зробити висновок, якщо систему вивести з стану рівноваги (зарядити конденсатор від стороннього джерела), то після від'єднання джерела в колі відбуватимуться коливання напруги  $U$  і зв'язаного з напругою простим співвідношенням заряду  $q = CU$ .

Якщо електромагнітні коливання можна одержати просто, то спостерігати їх значно складніше. Адже безпосередньо не видно ні перезарядки кон-



Мал. 117



Мал. 118



Мал. 119

денсатора, ні зростання сили струму в котушці, ні виникнення магнітного чи електричного поля. До того ж відбуваються електромагнітні коливання з дуже великою частотою, яка значно перевищує частоту механічних коливань.

Спостерігати і досліджувати електромагнітні коливання зручно за допомогою електронного осцилографа (мал. 118). Зарядимо конденсатор  $C$  від джерела постійного струму і замкнемо його на котушку індуктивності  $L$ , паралельно якій увімкнено електронний осцилограф. На екрані дістанемо криву залежності заряду (або сили струму в колі) від часу — осцилограму коливань заряду (або сили струму). Амплітуда цих коливань швидко зменшується, тобто коливання швидко затухають (мал. 119).

Розглянуті електромагнітні коливання отримали назву власних (вільних) коливань, оскільки вони здійснюються вільно, тобто без впливу зовнішньої сили. Частоту вільних коливань називають власною частотою коливального контуру. Власні коливання є затухаючими; амплітуда їх з часом зменшується. Причиною затухання є те, що енергія струму перетворюється у внутрішню енергію проводів (оскільки вони мають опір) і витрачається на випромінювання електромагнітних хвиль.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають коливальним контуром?
2. Намалуйте схему установки, в якій можна спостерігати електромагнітні коливання.
3. Який прилад дає можливість спостерігати електромагнітні коливання?

## § 26.

### ГАРМОНІЧНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. ЧАСТОТА ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ КОНТУРУ

Розглянемо механізм виникнення коливань у коливальному контурі. Щоб отримати вільні коливання в механічній коливальній системі, необхідно надати цій системі енергію від зовнішнього джерела. У процесі коливань ця енергія періодично перетворюється з потенціальної в кінетичну, і навпаки. Щоб коливальний контур вивести зі стану електричної рівноваги, цій коливальній системі необхідно також надати певну енергію. Розглянемо послідовні стадії коливального процесу в ідеалізованому контурі, опір якого нехтовно малий  $R \sim 0$ . Для виникнення в контурі коливань конденсатор

попередньо заряджають, надаючи його обкладкам заряди  $\pm q$ . Тоді у початковий момент часу  $t = 0$  (мал. 120, а) між обкладками конденсатора виникає електричне поле, енергія якого

$$W_e = \frac{q^2}{2C}.$$

Якщо конденсатор замкнути на котушку індуктивності, то він почне розряджатися й у контурі виникне зростаючий з часом струм  $I$ . Отже, енергія електричного поля конденсатора буде зменшуватися, а енергія магнітного поля котушки — зростати.

Вважаючи, що  $R \approx 0$ , то відповідно до закону збереження енергії, повна енергія контуру буде мати вигляд

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const},$$

тому що енергія на нагрівання провідників у такому коливальному контурі не витрачається. У момент часу  $t = \frac{T}{4}$ , коли конденсатор повністю розрядиться, енергія електричного поля зменшиться до нуля, а енергія магнітного поля, а отже, і сила струму досягне найбільшого значення (мал. 120, б). Починаючи з цього моменту часу сила струму у контурі буде зменшуватися, отже, почне слабшати магнітне поле котушки й індукований у ній струм, який тече (відповідно до правила Ленца) у тому ж напрямі, що й струм розрядки конденсатора. Конденсатор почне перезаряджатися, при цьому виникне електричне поле, яке намагатиметься послабити силу струму, який зрештою зменшиться до нуля, а заряд на обкладках конденсатора досягне максимуму (мал. 120, в). Далі ті ж процеси почнуть відбуватися в зворотному напрямі (мал. 120, г) і система до моменту часу  $t = T$  повернеться в початковий стан (мал. 120, а). Після цього розглянутий цикл розрядки і зарядки конденсатора почне повторюватися.

Якби втрат енергії не було, то в контурі відбувалися б періодичні незатухаючі коливання, тобто періодично змінювалися (коливалися) б заряд  $q$  на обкладках конденсатора, напруга  $U$  на конденсаторі і сила струму  $I$ , який тече через котушку індуктивності.

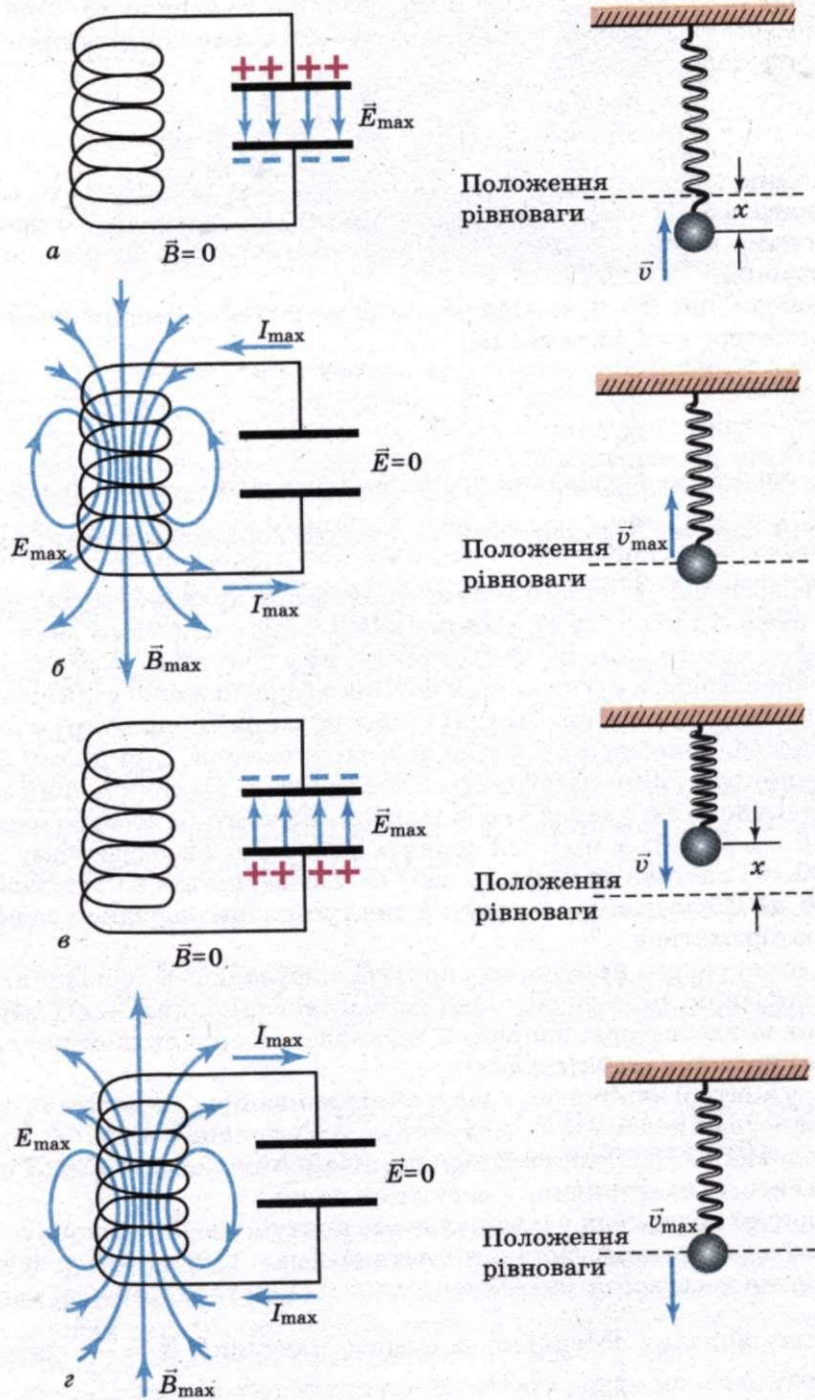
Отже, у контурі виникають електричні коливання з періодом  $T$ , причому протягом першої половини періоду струм тече в одному напрямі, протягом другої половини — у протилежному. Коливання супроводжуються перетвореннями енергій електричних і магнітних полів.

Електричні коливання у коливальному контурі можна порівняти з механічними коливаннями пружинного маятника (мал. 120), які супроводжуються взаємними перетвореннями потенціальної і кінетичної енергії маятника.

У даному випадку потенціальна енергія маятника  $E_n = \frac{kx^2}{2}$  аналогічна

енергії електричного поля конденсатора  $W_e = \frac{q^2}{2C}$ , кінетична енергія маят-





Мал. 120

ників  $E_k = \frac{mv^2}{2}$  — енергії магнітного поля котушки  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ , а швидкість руху маятників — силі струму в контурі.

Роль інерції маятника буде зводитися до самоіндукції котушки, а роль сили тертя, яке діє на маятник — до опору контуру.

Перейдемо тепер до кількісної теорії процесів у коливальному контурі.

Наше завдання насамперед полягатиме у визначенні періоду (або частоти) вільних електричних коливань. Дійсно, виходячи з аналогії між вільними механічними і електричними коливаннями, можна відразу записати вираз для частоти і періоду вільних електричних коливань. Оскільки у формулі циклічної частоти вільних коливань тягарця на пружині  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  — величина  $k$  аналогічна  $\frac{1}{C}$ ,  $m$  — індуктивності  $L$ , то і частота вільних електричних коливань повинна дорівнювати

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Для періоду вільних коливань у контурі можна записати

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Формула  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  називається **формулою Томсона** на честь англійського фізика, який її вперше вивів.

Отримані результати правильні. Проте вважати їх строго доведеними не можна. Треба показати, що рівняння, яке описує електричні коливання в контурі, з математичного боку не відрізняється від рівняння, яке описує вільні механічні коливання. Лише після цього можна з цілковитою певністю твердити, що механічні й електричні коливання підпорядковані одним й тим самим кількісним законам.

Як відомо, координата в механічних коливаннях, коли в початковий момент ( $t = 0$ ) відхилення від положення рівноваги максимальне, змінюється з часом за гармонічним законом:

$$x = x_{\max} \cos \omega_0 t.$$

За таким самим законом змінюється з часом заряд конденсатора:

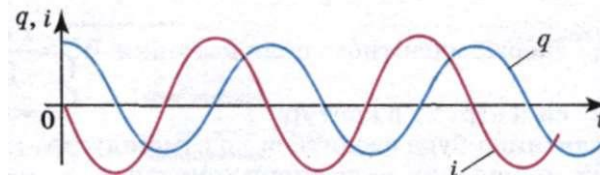
$$q = q_{\max} \cos \omega_0 t,$$

де  $q_{\max}$  — амплітуда коливань заряду.

Гармонічно коливається і сила струму:

$$i = I_{\max} \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right),$$

де  $I_{\max} = q_{\max} \omega_0$  — амплітуда коливань сили струму. Коливання сили струму зміщені за фазою на  $\frac{\pi}{2}$  щодо коливань заряду (мал. 121), і, подібно до коли-



Мал. 121

вань швидкості руху тягарця на пружині, випереджають за фазою на  $\frac{\pi}{2}$  коливання координати.

Дійсно, внаслідок енергетичних втрат коливання будуть згасаючими. Чим більший опір  $R$ , тим більшим буде період коливань. Коливання напруги будуть описуватись за таким законом:

$$u = U_{\max} \cos \omega_0 t.$$

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Проведіть аналогію між електромагнітними і механічними коливаннями.
2. Запишіть рівняння гармонічного коливання заряду, сили струму і напруги в коливальному контурі.
3. За якою формулою визначають власну частоту вільних електромагнітних коливань?

## § 27.

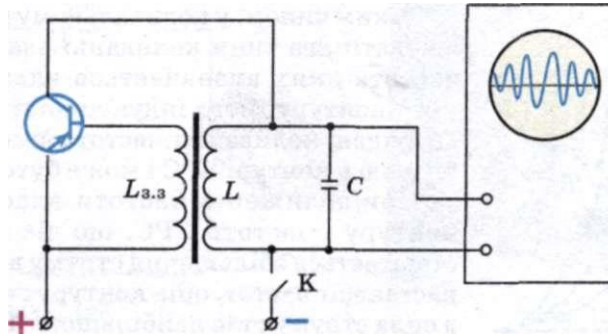
### ЗАТУХАЮЧІ ТА ВИМУШЕНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС

Вільні коливання, які ми вже розглянули, є певною ідеалізацією. Реальний коливальний контур завжди чинить певний опір електричному струму. Тому частина наданої контуру енергії безперервно перетворюється у внутрішню енергію проводів, а частина енергії випромінюється в навколишній простір. Це означає, що вільні електромагнітні коливання в контурі практично завжди є згасаючими. Чим більший опір контуру, тим швидше відбувається згасання. Якщо опір контуру дуже великий, коливання можуть і не виникнути — конденсатор розрядиться, а перезарядження його не відбудеться.

З метою технічного використання електромагнітних коливань необхідно, щоб ці коливання існували тривалий час, тобто потрібно зробити їх незгасаючими. Для цього енергію, яку втрачає контур, слід увесь час поповнювати від зовнішнього джерела.

Особливо важливі і широко застосовуються автоколивання — незгасаючі коливання, які підтримуються у коливальній системі завдяки постійному зовнішньому джерелу енергії, причому властивості цих коливань визначаються самою системою.

Електричні автоколивальні системи надзвичайно широко використовуються в сучасній техніці для отримання незгасаючих електромагнітних коливань високої частоти. Принцип дії цих систем значною мірою збігаєть-



Мал. 122

ся з принципом дії механічних автоколивальних систем. Електрична автоколивальна система містить коливальний контур, підсилювач коливань і джерело електричної енергії (батарею). Між коливальним контуром і підсилювачем має існувати зворотний зв'язок — коливання з контуру надходять у підсилювач, підсилюються за рахунок джерела енергії і повертаються назад у коливальний контур. Дуже важливо, щоб коливання, які надходять від підсилювача в контур, збігалися за фазою з коливаннями у самому контурі.

Існує багато автоколивальних систем як з електронними лампами, так і з транзисторами. На мал. 122 показано спрощену схему електричної автоколивальної системи — автогенератора електромагнітних коливань на транзисторі. Коливальний контур  $LC$  увімкнено до джерела постійної ЕРС послідовно з транзистором. В емітер — базове коло транзистора — увімкнута котушка  $L_{з.з}$ , індуктивно зв'язана з коливальним контуром. Цю котушку називають котушкою зворотного зв'язку. Паралельно коливальному контуру увімкнено електронний осцилограф для спостереження електромагнітних коливань. Генератор живиться від джерела постійної напруги.

Розглянуті вище коливання відбувалися з частотами, які визначаються параметрами самої коливальної системи. Щоб у реальній коливальній системі отримати незатухаючі коливання, треба компенсувати втрати енергії.

Коливання, що виникають під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється, називають **вимушеними електромагнітними коливаннями**.

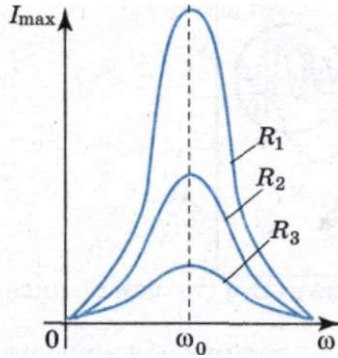
Для того, щоб у коливальному контурі виникали вимушені коливання, треба до контуру підвести зовнішню ЕРС, яка періодично змінюється за гармонічним законом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} \cos \omega_0 t.$$

Якщо в якому-небудь коливальному контурі весь час діє генератор змінного струму, то ЕРС генератора збуджуватиме в цьому контурі змінний електричний струм з частотою коливання ЕРС генератора.

Частота цих вимушених коливань взагалі не збігається з частотою власних (вільних) коливань контуру.

Якщо ця зовнішня змінна ЕРС має постійну амплітуду, то і вимушені коливання в контурі відбуватимуться з постійною амплітудою, тобто будуть незатухаючими.



Мал. 123

Таким чином, у коливальному контурі можуть існувати два типи коливань: власні коливання, частота яких визначається властивостями самого контуру, його індуктивністю і ємністю, та вимушені коливання, частота яких визначається діючою в контурі ЕРС і може бути довільною.

При зближенні частоти власних коливань контуру і частоти ЕРС, що діє в контурі, спостерігається збільшення струму в контурі, а коли настає збіг частот, опір контуру стає найменшим, а сила струму стає найбільшою. Такий випадок є особливо важливим, він називається резонансом.

**Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, коли частота їх наближається до частоти власних коливань системи, називається резонансом:**

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Залежність амплітуди сили струму від частоти для різних опорів показано на мал. 123. Одночасно із зростанням сили струму під час резонансу різко зростають напруги на конденсаторі і котушці індуктивності, які при малому активному опорі у багато разів перевищують зовнішню напругу.



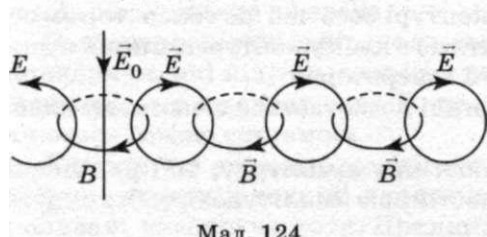
#### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. За яких умов в електричному колі виникають вимушені електричні коливання?
2. Що таке автоколивання?
3. За яких умов виникає електричний резонанс?
4. У чому відмінність автоколивань від вимушених коливань і вільних?

### § 28.

#### ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

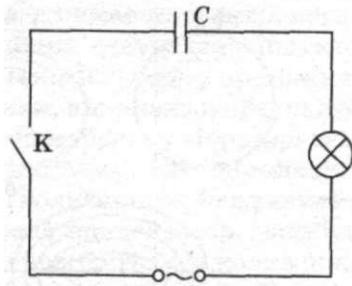
У 60-х роках XIX ст. Дж. Максвелл розробив теорію електромагнітного поля, за якою змінне електричне поле породжує змінне магнітне. Ці поля мають вихровий характер: силові лінії поля, яке породжує, концентрично охоплені силовими лініями поля, що породжується.



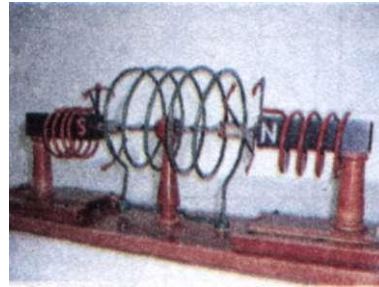
Мал. 124

Внаслідок цього утворюється система «переплетених» між собою електричних і магнітних полів. Деяке уявлення про характер змінного електромагнітного поля може дати мал. 124, який є ніби миттєвим знімком цього поля.

Пряма лінія  $\vec{E}_0$  відображає первинне змінне електричне поле, кола  $\vec{B}$  у горизонтальній площині — це вторинні



Мал. 125



Мал. 126

змінні магнітні поля, а кола  $\vec{E}$  у вертикальній площині — вторинні змінні електричні поля.

**Магнітне поле виникає навколо провідників, по яких проходять струми. Силіві лінії магнітного поля завжди замкнені, звідси випливає, що електричні струми, які породжують магнітне поле, також мають бути замкненими.**

Щоб переконатись у цьому, розглянемо випадок, коли в електричне коло ввімкнено конденсатор. Між обкладками конденсатора заряди переміщуватись не можуть. Це призводить до того, що лінії струму обриваються біля поверхні обкладок конденсатора, струм провідності, який проходить по провіднику, що з'єднує обкладки конденсатора, роз'єднується. Якщо напруга джерела струму змінна, то при замиканні ключа К (мал. 125) конденсатор поперемінно заряджається і розряджається, у колі проходить струм, лампочка, увімкнена в це коло, світиться. Це свідчить про те, що лінії струму замкнені.

Між обкладками конденсатора змінний електричний заряд створює змінне електричне поле, яке Максвелл назвав струмом зміщення.

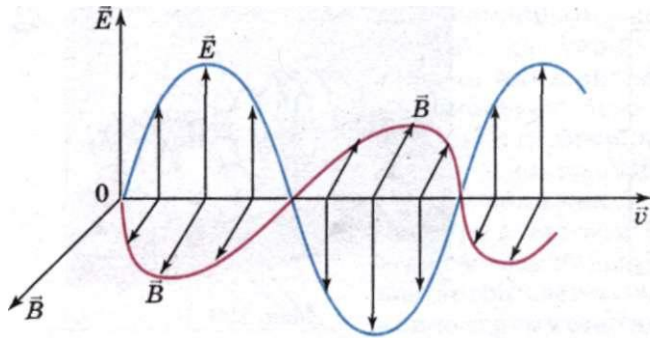
**Струм зміщення — змінне електричне поле, як і струм провідності, породжує магнітне поле, силіві лінії якого завжди замкнені.**

**Отже, електричне і магнітне поля взаємозв'язані. Зміна одного з них породжує друге. Ці поля — прояв єдиного електромагнітного поля.**

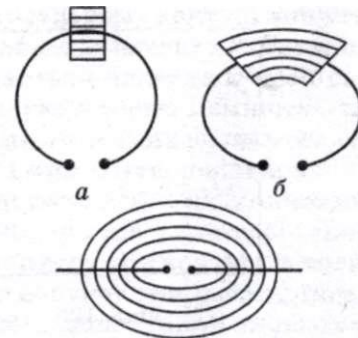
Взаємозв'язок електричного і магнітного полів обумовлює поширення електромагнітного поля в просторі. Уявімо собі, що по провіднику тече змінний електричний струм. Тоді навколо цього провідника існує змінне магнітне поле  $B$  (мал. 126). Це поле, у свою чергу, створює змінне електричне поле  $\vec{E}$  в сусідніх ділянках простору. Потім змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, яке знову викликає появу змінного електричного поля тощо. Отже, поширюючись на все нові ділянки простору, електромагнітне поле переміщається з областей, де воно щойно існувало. Швидкість поширення електромагнітного поля дорівнює приблизно 300 000 км/с.

Таким чином, електромагнітне поле може існувати самостійно, не будучи зв'язаним із зарядами і струмами. А це є переконливим доказом матеріальності електромагнітного поля. У матеріальності електромагнітного поля переконує і той факт, що воно має певну енергію.

**Поширення у просторі електромагнітного поля, в якому напруженість електричного й індукція магнітного полів змінюються періодично, називається електромагнітною хвилею.**



Мал. 127



Мал. 128

Вектори напруженості  $\vec{E}$  і магнітної індукції  $\vec{B}$  в електромагнітній хвилі у будь-якій точці простору завжди взаємно перпендикулярні, оскільки лінії напруженості електричного поля охоплюють лінії індукції магнітного поля.

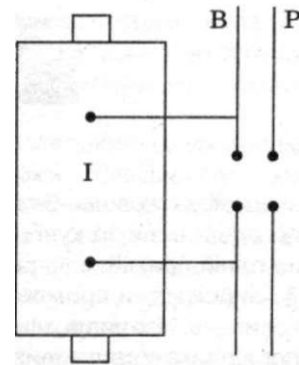
Крім того, вони перпендикулярні й до напрямку поширення хвиль. Отже, електромагнітні хвилі — поперечні. Гармонічна електромагнітна хвиля графічно зображається у вигляді двох синусоїд, які лежать у взаємно перпендикулярних площинах (мал. 127). Одна синусоїда відображає коливання вектора напруженості  $E$  електричного поля, а друга — вектора індукції  $B$  магнітного поля (обидва вектори коливаються в однаковій фазі).

Як уже зазначалось раніше, джерелом електромагнітних хвиль може бути будь-який електричний коливальний контур або провідник, по якому тече змінний електричний струм, оскільки для утворення електромагнітних хвиль необхідно створити в просторі змінне електричне поле (струм зміщення), або відповідно змінне магнітне поле. Випромінююча здатність джерела електромагнітних хвиль визначається його формою, розмірами і частотою коливань. Щоб випромінювання було помітним, необхідно збільшити об'єм простору, в якому створюється змінне електромагнітне поле. Тому для одержання електромагнітних хвиль не придатні закриті коливальні контури, оскільки в них електричне поле зосереджене між обкладками конденсатора, а магнітне — усередині котушки індуктивності.

Г. Герц у своїх дослідах, зменшуючи число витків котушки і площу пластин конденсатора, а також розсовуючи їх (мал. 128, *a*, *б*), здійснив перехід від закритого коливального контуру до відкритого коливального контуру (вібратор Герца), який складається з двох стержнів, розділених іскровим проміжком (мал. 128, *в*). Якщо в закритому коливальному контурі змінне електричне поле зосереджене усередині конденсатора (мал. 128, *a*), то у відкритому воно заповнює навколишній простір (мал. 128, *в*), що істотно підвищує інтенсивність електромагнітного випромінювання.

Колівання в такій системі підтримуються за рахунок джерела ЕРС, увімкненого до обкладок конденсатора, а іскровий проміжок застосовується для того, щоб збільшити різницю потенціалів, до якої в початковий момент часу заряджаються обкладки конденсатора.

Для отримання електромагнітних хвиль вібратор Герца  $B$  під'єднували до індуктора  $I$  (мал. 129). Коли напруга на іскровому проміжку досягала пробивного значення, виникала іскра, яка замикала обидві половини вібратора, і у вібраторі виникали вільні затухаючі коливання. При зникненні іскри контур розмикався і коливання припинялися. Потім індуктор знову заряджав конденсатор, виникала іскра й у контурі знову спостерігалися коливання і т.д. Для реєстрації електромагнітних хвиль Герц використовував інший вібратор, який назвав резонатором  $P$ , що мав таку ж частоту власних коливань, як і випромінювальний вібратор. Коли електромагнітні хвилі досягали резонатора, то в його зазорі виникала електрична іскра.



Мал. 129

Для одержання незатухаючих коливань необхідно створити автоколивальну систему, яка б забезпечувала подачу енергії з частотою, що дорівнює частоті власних коливань контуру. Тому в 20-х роках минулого сторіччя перейшли до генерування електромагнітних хвиль за допомогою електронних ламп. Лампові генератори дозволяли одержувати коливання заданої (практично будь-якої) потужності і синусоїдальної форми.

Приймання електромагнітних хвиль здійснюється за допомогою таких самих відкритих коливальних контурів — вібраторів або антен, подібних до випромінювального контуру. Під дією змінного електричного поля електромагнітної хвилі у приймальному контурі виникають електромагнітні коливання. Для їх якісного приймання необхідно, щоб приймальний коливальний контур був настроєний у резонанс з передавальним контуром, тобто щоб власна частота коливань контуру приймальної антени була близькою до частоти коливань контуру передавальної антени. Настроювання приймального контуру в резонанс здійснюється конденсатором змінної ємності або котушкою змінної індуктивності.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають електромагнітним полем? Чи можуть електричні і магнітні поля існувати відокремлено одне від одного?
2. Що називають електромагнітною хвилею?
3. Як орієнтовані вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  один відносно одного в електромагнітній хвилі?
4. Що є джерелом електромагнітних хвиль?
5. Як побудовано вібратор Герца, який принцип його дії?
6. Як здійснюється приймання електромагнітних хвиль?

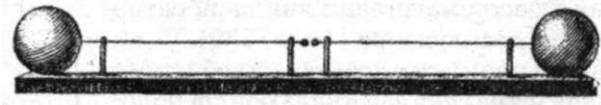


### Це цікаво знати

**Відкриття Герца.** Г. Герц народився в Гамбурзі 22 лютого 1857 року. Тут, у рідному місті, він здобув середню освіту. З жовтня 1878 року Герц почав слухати лекції **Гельмгольца і Кірхгофа**. Через два роки Герц виконав першу наукову працю і став асистентом у Гельмгольца. З 1883 року Герц працював викладачем теоретичної фізики в університеті міста Кіль. Тут Герц старанно вивчив електромагнітну теорію Максвелла.

У 1879 р. одна з європейських наукових академій оголосила премію за експериментальне доведення існування електромагнітних хвиль. На пропозицію Гельмгольца у 1886 р. Герц розпочав свої знамениті досліді. Він узяв два мідні





Мал. 130

стержні завтовшки 5 мм, на їх кінці насадив по одній маленькій (діаметром 3 см) і по одній великій кулі (діаметром 30 см). Ці стержні Герц закріпив горизонтально на одній прямій лінії, розмістивши маленькі кулі поблизу одна від одної, на відстані 7 мм (іскровий проміжок). Такий апарат Герц назвав **вібратором**, тобто джерелом коливань, або випромінювачем електромагнітних хвиль (мал. 130). Два прямолінійних провідника з'єднувалися з однією обмоткою індукційної котушки, в якій збуджувалася змінна ЕРС. Якщо значення амплітуди ЕРС, прикладеної до вібратора, досягало визначеного значення, то в іскровому проміжку вібратора виникала іскра і в провідниках виникали коливання електричного струму з дуже малим періодом. У проміжку між маленькими кулями виникали іскри, отримані за допомогою котушки Румкорфа. Внаслідок цього в навколишнє середовище випромінювались електромагнітні хвилі. Герц так підібрав розміри частин свого апарату, що час одного коливання в колі вібратора становив одну шестидесятимільйонну частку секунди. При цьому виникали хвилі завдовжки 5 м. Але як «зловити» цю електромагнітну хвилю? Як виявити її існування?

Учитель Герца, великий фізик Гельмгольц, зробив багато цінних досліджень у галузі науки про звук. Знайомство з цими працями допомогло Герцу розв'язати й другу частину завдання.

Звук, як і світло, відбивається від поверхні, на яку він падає. Цим пояснюється, наприклад, таке явище, як луна.

Герц знав також, що кілька звукових або світлових хвиль, поширюючись в одному і тому самому напрямі, взаємодіють між собою. Від складання кількох хвиль можна одержати одну хвилю. Це явище накладання хвиль називається **інтерференцією**. Якщо у двох хвиль збігаються їх гребені, то як результат накладання виходить хвиля, ще вища за першу.

У тому разі, коли в одному напрямі поширюються дві хвилі — одна рухається вперед, а друга, відбита, рухається назад, — можуть виникнути особливого роду **стоячі хвилі**. Такі хвилі легко отримати, якщо взяти довгу мотузку, прикріпити її за один кінець, а з другого надіслати поштовх. Хвиля, що виникне на мотузці, побіжить до упору і відіб'ється від нього. Якщо посылати по мотузці такі поштовхи один за одним, то внаслідок взаємодії прямих хвиль, що ідуть до упору, і зустрічних, відбитих хвиль, виникнуть стоячі хвилі.

У так званих **вузлах** взаємодіючі хвилі ніби знищують одна одну. Навпаки, в інших місцях, що називаються **видугами** виявляється найбільший результат взаємодії прямої і відбитої хвилі.

Пригадаємо ще одне явище. Якщо взяти два однакові камертони і примусити один з них звучати, то і другий камертон, розміщений поряд, також почне звучати, ніби відгукуючись. Це явище називається **резонансом**.

Виходячи з цих явищ, Герц розраховував, що приймачем — резонатором для електричних променів — може бути шматок дротини, зігнутої по колу діаметром у 70 см. В одному місці це дротяне кільце має бути перерізане — для утворення іскрового проміжку (мал. 131).

На відстані 13 м від випромінювача хвиль Герц установив вертикальну металеву стінку для відбивання електромагнітних хвиль. Потім він увімкнув джерело струму і почав досліджувати простір між місцем коливного розряду та металеву стінку. *Чому саме так зробив Герц?*

Він хотів виявити електромагнітну хвилю завдовжки 5 м, яка утворюється коливним розрядом від великих куль. На взятому проміжку цього цілком можна було досягти. Крім того, Герц намагався довести, що електромагнітні хвилі, як і звукові, при відбиванні взаємодіють між собою (пряма з відбитою) і при цьому виникають стоячі хвилі з вузлами і видугами. І дійсно, коли Герц переміщував свій резонатор уздовж згаданого напрямку поширення хвилі, то іскри виникали тільки в строго певних місцях резонатора. При переміщенні резонатора праворуч і ліворуч іскор вже не було помітно.

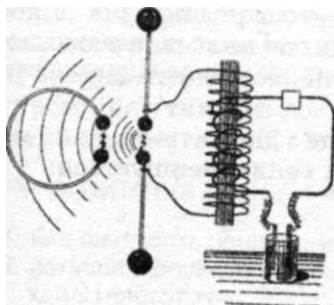
Біля вібратора Герца розміщували резонатор, який являв собою провідник, зігнутий у вигляді кола чи прямокутника, кінці якого теж утворювали іскровий проміжок. Спочатку суть дослідів Герца полягала в тому, що він спостерігав вплив іскри, що виникала у вібраторі, на резонатор. При цьому він помітив, що при появі іскри у вібраторі у резонаторі також виникає іскра.

Спочатку Герц думав, що він спостерігає випадок електромагнітної індукції, коли при зміні сили струму у вібраторі створюється струм у резонаторі. Але продовжуючи досліди, Герц помітив, що в кімнаті, де він працював, є місця, перебуваючи у яких резонатор не реагує на іскру вібратора. Тоді вчений доходить висновку, що спостережуване явище не можна пояснити електромагнітною індукцією. У кімнаті виникали стоячі електромагнітні хвилі — в одних місцях були вузли, а в інших — пучності.

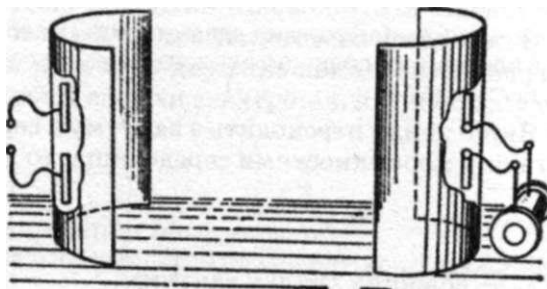
Герц, захоплений своїм відкриттям, писав: «Я думаю, що хвильова природа звуку в порожньому просторі спостерігається не так ясно, як хвильова природа цього електродинамічного процесу».

Цими надзвичайними дослідями Герц довів існування стоячих електромагнітних хвиль. Подальші експерименти Герца показали подібність властивостей світлових променів і так званих електричних променів (так спочатку Герц назвав електромагнітні хвилі). Свої досліди над електричними променями він виконував на обладнанні, подібному до того, на якому демонстрували властивості світлових променів.

У ряді дослідів Герц застосовував відбивні поверхні з металевих стінок, так звані дзеркала Герца, за допомогою яких досліджувалися властивості електромагнітних хвиль (мал. 132), при цьому електричні промені підлягали загальновідомому закону оптики (кут падіння дорівнює куту відбивання) і, відбиваючись, викликали в резонаторі іскру. Нарешті, Герц пропустив електричні промені через тригранну смоляну при-



Мал. 131



Мал. 132

зму, в цьому разі промені заломлювались. Він помітив, що електричні промені легко проходили крізь дерев'яні стіни й двері та взагалі через непровідники електрики (діелектрики). Електричні промені проходили і крізь дуже тонкі листочки металів.

Досліди Герца було відтворено у багатьох наукових лабораторіях. Таким чином було підтверджена теорія Максвелла.

### § 29. ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ, ДОВЖИНА, ЧАСТОТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ. ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

За теорією Максвелла, швидкість поширення електромагнітних хвиль — величина скінченна, вона визначається електричними і магнітними властивостями середовища, в якому поширюється електромагнітна хвиля:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}},$$

де  $\epsilon_0$  і  $\mu_0$  — електрична і магнітна сталі;  $\epsilon$  і  $\mu$  — відносні діелектрична і магнітна проникності середовища. Якщо електромагнітна хвиля поширюється у вакуумі, то  $\epsilon = 1$ ,  $\mu = 1$ .

Обчислимо швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює швидкості світла у вакуумі:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Відстань, на яку переміщується електромагнітна хвиля за час, що дорівнює одному періоду коливання, називають **довжиною хвилі**.

Якщо  $v$  — швидкість поширення електромагнітної хвилі в однорідному середовищі,  $T$  — її період,  $\nu$  — частота, а  $\lambda$  — довжина, то  $\lambda = \nu T$ , або  $\lambda = \frac{v}{\nu}$ .

Для вакууму  $\lambda = cT$ , або  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ .

Оскільки швидкість хвилі залежить від  $\epsilon$  і  $\mu$  середовища, тоді, якщо хвиля переходить з одного середовища в інше, то змінюються  $v$  і  $\lambda$ , а частота коливань залишається тією самою.

Якщо хвиля переходить з вакууму в середовище з діелектричною  $\epsilon$  і магнітною  $\mu$  проникностями середовища, то довжина хвилі зменшується:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

де  $\lambda_0$  — довжина хвилі у вакуумі.

Електромагнітні хвилі, які мають досить широкий діапазон частот (або довжин хвиль  $\lambda = cT$ , де  $c$  — швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі), від-

різняються одна від одної за способами їх генерації і реєстрації, а також за своїми властивостями. Тому електромагнітні хвилі поділяються на кілька видів: радіохвилі, світлові хвилі, рентгенівське і у-випромінювання (табл. 1). Слід зазначити, що межі між різними видами електромагнітних хвиль досить умовні.

Таблиця 1

Види електромагнітних хвиль

Випромінювання	Довжина хвилі, м	Частота, Гц	Джерело випромінювання
Радіохвилі	$10^3 - 10^4$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	Коливальний контур, вібратор Герца, ламповий генератор
Світлові хвилі: інфрачервоне випромінювання	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11} - 3,7 \cdot 10^{14}$	Лампи, нагріті тіла
видиме світло	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	Лазери
ультрафіолетове випромінювання	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	Лампи, Сонце
Рентгенівське випромінювання	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$	Рентгенівські трубки
Гамма-випромінювання	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	Космічне випромінювання

Радіохвилі поділяють за довжиною хвилі на довгі (понад 10 км), середні (сотні метрів), короткі (десятки метрів). Усі вони переважно використовуються у радіозв'язку. Ультракороткі радіохвилі поділяють на метрові, дециметрові та міліметрові. Перші використовують у телебаченні, другі і треті — у радіолокації. Діапазон радіохвиль частково перекривається з інфрачервоними променями, які широко застосовують у техніці. У цьому діапазоні працюють лазери.

Ультрафіолетові промені використовують для знезаражування приміщень у лікарнях, стимуляції хімічних реакцій, утворення потрібних генних мутацій та ін. Поверхня Землі захищена від шкідливих складових ультрафіолетових променів Сонця озоновим шаром. Його збереження — це одна з важливих екологічних проблем.

Рентгенівське випромінювання отримують під час гальмування електронів, які прискорюються напругою в десятки кіловольт. На відміну від світлового проміння видимого спектра й ультрафіолетового проміння, воно має значно меншу довжину хвилі. Причому довжина хвилі рентгенівського проміння є тим меншою, чим більша енергія електронів, які бомбардують перешкоду.

## ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка швидкість поширення електромагнітних хвиль у повітрі?
2. Запишіть формулу, що виражає зв'язок швидкості поширення хвилі з довжиною хвилі і частотою.
3. Що дозволяє об'єднати всі види електромагнітного випромінювання в одну шкалу електромагнітних хвиль?

## § 30.

**ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ**

Електромагнітні хвилі поглинаються, відбиваються і заломлюються, як і всі інші види хвиль. Це легко спостерігати.

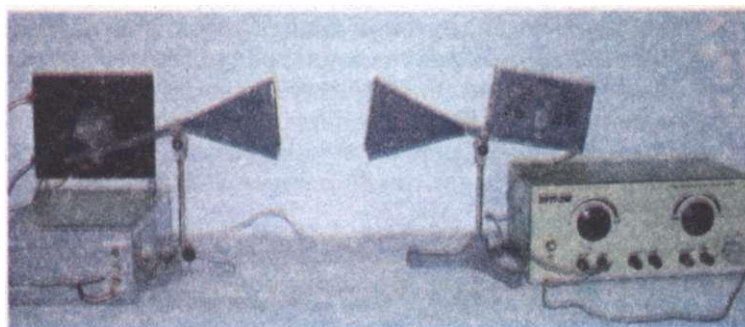
Сучасні радіотехнічні пристрої дають змогу провести наочні досліди з метою виявлення властивостей електромагнітних хвиль. При цьому найкраще користуватися хвилями сантиметрового діапазону, що їх випромінює спеціальний генератор надвисокої частоти (НВЧ).

Електромагнітні хвилі випромінює рупорна антена в напрямі осі рупора. Приймальна антена, яка має вигляд такого самого рупора, вловлює хвилі, що поширюються вздовж осі рупора. Загальний вигляд установки показано на мал. 133. Рупори розміщують один проти одного і, добившись того, щоб з гучномовця добре було чути звук, між рупорами розміщують різні діелектричні тіла. При цьому помічають зменшення гучності. Це свідчить про те, що електромагнітні хвилі поглинаються.

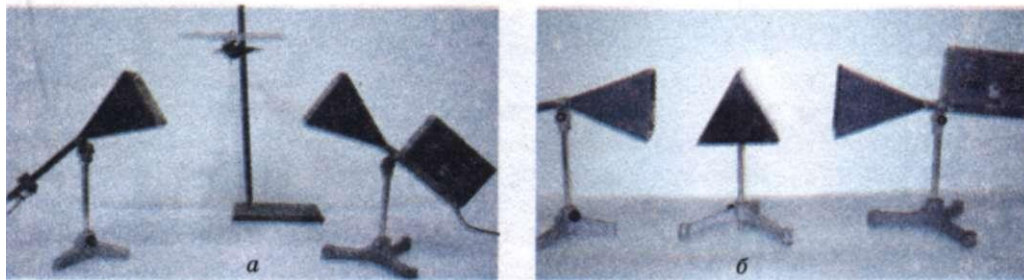
Якщо діелектрик замінити металевою пластинкою, то хвилі не досягнуть приймача внаслідок відбивання. Звуку не буде чути. Відбивання відбувається під кутом, що дорівнює куту падіння, як і для випадку світлових і механічних хвиль. Щоб переконатися в цьому, рупори розміщують під однаковими кутами до великого металевого листа (мал. 134, а). Звук зникає, якщо забрати лист або повернути його. Електромагнітні хвилі відбиваються.

Електромагнітні хвилі змінюють свій напрям (заломлюються) на межі діелектрика. Це можна виявити за допомогою великої трикутної призми з парафіну. Рупори встановлюють під кутом один до одного, як і тоді, коли демонстрували відбивання. Металевий лист замінюють призмою (мал. 134, б). Забираючи призму або повертаючи її, спостерігають зникнення звуку. Електромагнітні хвилі заломлюються.

Електромагнітні хвилі — поперечні. Це означає, що вектори  $E$  і  $B$  електромагнітного поля хвилі перпендикулярні до напрямку її поширення. Коливання напруженості електричного поля хвилі, яка виходить з рупора, відбуваються у певній площині, а коливання вектора магнітної індукції — в перпендикулярній до неї площині. Хвилі з певним напрямом коливань називаються поляризованими. На мал. 127 показано саме поляризовану



Мал. 133



Мал. 134

хвилю. Приймальний рупор з детектором приймає тільки поляризовану в певному напрямі хвилю. Це можна виявити, повернувши передавальний або приймальний рупор на  $90^\circ$ . Звук при цьому зникне.

Поляризацію спостерігають, розмішуючи між генератором і приймачем решітку з паралельних металевих стержнів (мал. 135). Решітку ставлять так, щоб стержні були горизонтальні або вертикальні. В одному з положень, коли електричний вектор паралельний стержням, у них збуджуються струми, внаслідок чого решітка відбиває хвилю подібно до суцільної металевої пластини. Якщо вектор  $E$  перпендикулярний до стержнів, то струми в них не збуджуються й електромагнітна хвиля проходить.

Ми описали не всі основні властивості електромагнітних хвиль. Повніші відомості одержимо під час вивчення оптики.

Сучасне суспільство не можна уявити без телебачення. Воно міцно ввійшло в наш побут, медицину, астрономію, системи автоматизованого керування та інші галузі діяльності людини.

Схема телебачення в основному збігається зі схемою радіомовлення. Відмінність у тому, що в передавачі коливання модулюються не тільки звуковими сигналами, а й сигналами зображення. Зображення предметів перетворюються в електричні сигнали за допомогою електронно-променевої трубки, які називають іконоскопами. Електричні коливання від іконоскопа надходять до радіо-передавача і модулюють випромінювану ним радіохвилю подібно до того, як змінний струм у колі мікрофона модулює радіохвилю при передаванні звуку.

У приймачі вакуумна електронно-променева трубка — кінескоп — одержаний сигнал перетворює у видиме зображення. Електронний пучок у приймачі рухається по екрану точно синхронно з рухом електронного пучка в передавачі. Телевізійні сигнали передаються в діапазоні ультракоротких хвиль (УКХ). Ці сигнали приймаються в межах прямої видимості. Щоб передавати телепередачі на великі відстані, застосовують ретранслятори (мал. 136). За допомогою супутників зв'язку можна приймати і передавати телепрограми практично з будь-якої точки земної кулі.



Мал. 135



Мал. 136

**Радіолокація** — це виявлення різних предметів і вимірювання відстані до них за допомогою радіохвиль.

В основу радіолокації покладено явище відбивання УКХ від предметів. Радіолокатор (радар) — це радіопередавач і радіоприймач, які мають спільну антену, що містить перемикач з приймання на передавання. Ця антена створює гостронаправлене випромінювання — радіопромінь — короткими імпульсами тривалістю  $10^{-6}$  с. Між двома послідовними імпульсами антена автоматично перемикається на приймання електромагнітної хвилі, відбитої від досліджуваного об'єкта.

У момент посилання радіосигналу датчик часу починає зміщувати електронний промінь. Радіосигнал надходить у антену, випромінюється у простір і одночасно створює на екрані електронно-променевої трубки відхилення електронного променя вздовж вертикалі. Радіосигнал, відбитий від предмета, приймає та сама антена, потім він проходить через приймач і на екрані електронно-променевої трубки дає вертикальне відхилення променя на деякій відстані від першого відхилення. Знаючи час руху променя по горизонталі, відстань між вертикальними відхиленнями можна проградуювати в кілометрах. Напрямок, в якому перебуває виявлений об'єкт, визначається положенням антени радіолокатора, за якого на екрані електронно-променевої трубки з'являється відбитий радіосигнал (мал. 137).



Мал. 137

Радіолокацію і її методи широко застосовують як для воєнних, так і для мирних цілей. За її допомогою розв'язують завдання повітряної і морської навігації, визначено відстань до Місяця і планет, спостерігають за метеоритами.

На відміну від радіолокації, яка досліджує тіла за допомогою відбитих ними радіохвиль, радіоастрономія досліджує небесні тіла за їх власним радіовипромінюванням. Радіоастрономічні спостереження здійснюють радіотелескопами, пристроями, що складаються з антенної системи і чутливого радіоприймача з підсилювачем. Найбільший телескоп у світі — РАТАН-600 (діаметр 600 м).

Джерела випромінювання в радіоастрономії — галактики, міжзоряне галактичне середовище, зорі, Сонце, планети, Місяць тощо.

**Радіовипромінювання зір** — це електромагнітне випромінювання їх у діапазоні радіохвиль.

Радіовипромінювання в основному відбувається від нейтрального водню на довжині хвилі 0,21 м, а також від йонізованого гарячого водню світлих туманностей. Крім того, галактики є джерелами нетеплового радіовипромінювання, причиною якого є гальмування електронів магнітним полем галактик. Таке випромінювання називають синхротронним.

У 1963 р. радіоастрономи відкрили нові зіркоподібні об'єкти — квазари (від англ. *quasar* — джерело радіовипромінювання), а у 1967 р. було відкрито нові космічні джерела електромагнітного імпульсного випромінювання — нейтронні зорі — пульсари.

Сучасні дослідження дали можливість не тільки виявити тисячі космічних радіоджерел (Сонце, нейтронні зорі, квазари і т. д.), а й дослідити їх спектри. Було відкрито спектральні лінії багатьох хімічних елементів неорганічних і органічних молекул, що дало можливість підняти завісу над процесами утворення зір і планетних систем. Відкриття фонового (реліктового) випромінювання було підтвердженням моделі «гарячого» Всесвіту.



### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Назвіть відомі вам властивості електромагнітних хвиль.
2. Яка схема лежить в основі телебачення?
3. Що називають радіолокацією?
4. Які радіохвилі (за довжиною і частотою) використовують у радіолокації?
5. Що досліджує радіоастрономія?

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. Коливальний контур, що складається з повітряного конденсатора з двома пластинами по  $200 \text{ см}^2$  кожна і котушки індуктивністю  $10^{-6} \text{ Гн}$ , резонує на довжині хвилі 40 м. Визначте відстань між пластинами конденсатора.

Розв'язання

Скориставшись формулою ємності плоского конденсатора  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ , визначи-

мо  $d = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C}$ . Невідому ємність  $C$  визначимо з формули Томсона  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ , де  $T$



виразимо через довжину хвилі  $\lambda$  і швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі  $c$ :  $T = \frac{\lambda}{c}$ .

Враховавши попередні співвідношення, отримаємо

$$d = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C} = \frac{4\pi^2 \epsilon\epsilon_0 L S}{T^2} = \frac{4\pi^2 \epsilon\epsilon_0 L S c^2}{\lambda^2}.$$

Підставляючи значення відомих фізичних величин, маємо  $d = 4 \cdot 10^{-4}$  м.

2. Різниця потенціалів на обкладках конденсатора в коливальному контурі змінюється за законом  $u = 80 \cos 10^4 \pi t$ , В. Ємність конденсатора дорівнює  $10^{-8}$  Ф. Визначте період коливань контуру, індуктивність контуру, довжину хвилі, що відповідає цьому контуру.

#### Розв'язання

У загальному вигляді закон зміни різниці потенціалів на обкладках конденсатора можна записати так:  $u = U_{\max} \cos \omega t$ . Порівнюючи з умовою задачі  $u = 80 \cos 10^4 \pi t$ , маємо  $\omega = 10^4 \pi$ . Тоді  $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{10^4 \pi}$ ;  $T = 2 \cdot 10^{-4}$  с. Індуктивність визначимо з формули

$$\text{Томсона: } T = 2\pi \sqrt{LC}, \quad L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}. \quad L = 0,1 \text{ Гн.}$$

А довжину хвилі, що відповідає цьому контуру, визначимо із співвідношення  $\lambda = cT$ ,  $\lambda = 6 \cdot 10^4$  м.

#### Рівень А

248. Коливальний контур містить конденсатор ємністю 800 пФ і котушку індуктивністю 2 мкГн. Який період власних коливань контуру?
249. Коливальний контур складається з лейденських банок загальною електроємністю  $6 \cdot 10^{-3}$  мкФ та котушки індуктивності в 1 мкГн. Визначте частоту електромагнітних коливань у контурі.
250. У радіотехніці застосовують струми частотою від  $1 \cdot 10^2$  до  $1 \cdot 10^9$  нГц. Обчисліть період цих струмів.
251. Заряд конденсатора коливального контуру змінюється за законом  $q = 2 \sin 2 \cdot 10^3 a > t$ , мкКл. Визначте частоту і період електромагнітних коливань у контурі. Яка амплітуда значення заряду конденсатора?
252. Сила струму в коливальному контурі змінюється за законом  $i = 0,25 \sin 10^5 \pi t$ , А. Визначте амплітудне значення сили струму та період електромагнітних коливань у контурі.
253. Напруга на конденсаторі коливального контуру змінюється за законом  $u = 50 \cos 10^5 \pi t$ , В. Визначте амплітудне значення сили струму та періоду коливань у контурі.
254. Як зміниться період вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо індуктивність котушки зменшити у 2 рази й у стільки ж разів збільшити ємність контуру?
255. Коли автомобіль проїжджає під залізобетонним мостом, його радіоприймач реєструє слабкий сигнал. Чому?
256. Чому для зв'язку з космічними станціями використовують ультракороткохвильове (УКХ) радіовипромінювання?
257. Чому радіолокатор випромінює радіохвилі не неперервно, а у вигляді коротких імпульсів?

258. Генератор УВЧ працює на частоті 150 МГц. Яка довжина хвилі електромагнітного випромінювання?
259. На якій частоті судна передають сигнал біди, коли за міжнародною угодою радіохвиля повинна мати довжину 600 м?
260. Ємність коливального контуру радіоприймача 20 пФ, а індуктивність його котушки 350 нГн. На яку довжину хвилі настроєний радіоприймач?
261. У момент, коли відстань між Землею і Марсом була найменшою, на Марс із Землі було послано радіосигнал. Цей сигнал, відбившись від поверхні Марса, повернувся назад через 0,37 с. Яка мінімальна відстань між Землею і Марсом?

**Рівень В**

262. Увімкнений у коливальний контур повітряний конденсатор заповнений парафіном, діелектрична проникність якого дорівнює 2. У скільки разів змінилась частота вільних електромагнітних коливань у контурі?
263. Яка причина затухання вільних електромагнітних коливань, збуджених у коливальному контурі?
264. Як зміниться частота вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо ємність конденсатора збільшити в 10 разів, а індуктивність котушки зменшити у 5 разів?
265. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 10 мГн і плоского конденсатора з обкладками площею  $5 \text{ см}^2$  кожна, розділених парафіновим папером завтовшки 100 мкм. Яка частота вільних електромагнітних коливань у контурі? Діелектрична проникність парафінового паперу дорівнює 2,2.
266. У коливальному контурі ємність конденсатора 4 мкФ, індуктивність котушки 1,6 Гн. Конденсатор зарядили до напруги 100 В. Знайти максимальну енергію електричного поля конденсатора та амплітудне значення сили струму в контурі під час вільних електромагнітних коливань.
267. Напруга на конденсаторі коливального контуру під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом  $u = 50 \cos 10^3 \cos \omega t$ , В. Ємність конденсатора 1 мкФ. Яке амплітудне значення заряду конденсатора? Який період коливань у контурі? Яка індуктивність котушки?
268. Сила струму в коливальному контурі під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом  $i = 0,2 \sin 10^3 \cos \omega t$ , А. Індуктивність котушки 0,15 Гн. Визначте період коливань у контурі, ємність конденсатора та амплітудне значення напруги на конденсаторі.
269. У коливальному контурі індуктивність котушки становить 0,2 Гн, а амплітуда сили струму дорівнює 40 мА. Визначте енергію електричного поля конденсатора і магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму в 2 рази менше, ніж амплітудне значення.
270. Чому електромережа змінного струму практично не випромінює електромагнітних хвиль (випромінювання можна вловити лише безпосередньо біля проводів мережі)?
271. Ручним настроюванням радіоприймача змінюють площу перекривання пластин конденсатора змінної ємності у його коливальному контурі. Як змінюється площа перекривання пластин при переході на приймання станції, що здійснює передачу на довших хвилях?
272. У якому діапазоні довжин хвиль працює радіопередавач, коли ємність його коливального контуру можна змінювати від 60 до 240 пФ, а індуктивність становить 50 мкГн?
273. Котушка коливального контуру радіоприймача має індуктивність 200 мкГн. Приймач настроєний на хвилю довжиною 250 м. Яка ємність конденсатора коливального контуру радіоприймача?

274. Коливальний контур радіоприймача настроєний на довжину хвилі 300 м. Яка індуктивність коливального контуру, якщо його ємність 500 пФ?
275. Космонавт із космічного корабля послав два радіосигнали з перервою 4 год. На Землі сигнали було прийнято з перервою 14401 с. З якою середньою швидкістю космонавт віддаляється від Землі?
276. Радіолокатор працює на хвилі завдовжки 20 см і випромінює імпульси тривалістю 20 нс кожний. Максимальна дальність виявлення цілі локатором 60 км. Скільки імпульсів упродовж 1 с випромінює локатор? Скільки електромагнітних коливань в одному імпульсі?

### ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

#### Контрольні запитання

1. Чи змінюється напрям сили пружності під час невеликих вертикальних коливань пружинного маятника? Поясніть.
2. Математичний маятник здійснює гармонічні коливання в якійсь інерціальній системі відліку (ІСВ). Чи будуть ці коливання гармонічними у будь-якій іншій ІСВ?
3. Обґрунтуйте твердження: затухаючі коливання не гармонічні.
4. За рахунок яких сил — зовнішніх чи внутрішніх — відбувається коливання системи під час резонансу? Чи одних і других?
5. У які моменти першого півперіоду коливань у контурі ЕРС самоіндукції в ньому досягає максимальних значень?
6. Виходячи з аналогії механічних і електромагнітних коливань, назвіть електричну величину, еквівалентну силі пружності пружинного маятника.
7. Конденсатор електричного контуру зарядили від джерела більшої напруги. Що зміниться в коливаннях аналогічної механічної системи?
8. У яких середовищах можливе поширення електромагнітних хвиль?
9. Яка характерна для електромагнітних хвиль величина залишається незмінною при проходженні світла через середовище?



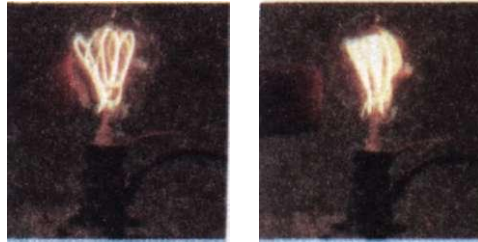
#### Що я знаю і вмю робити

Я знаю, якими фізичними величинами описуються коливання

1. Яку амплітуду, період, частоту і початкову фазу мають гармонічні коливання, задані рівнянням  $x = \sin(628t + 2)$ ?
2. Яка довжина математичного маятника, період коливань якого 1 с?
3. Заряд конденсатора коливального контуру змінюється за законом  $q = 2\sin 2 \cdot 10^5 a > f$ , мкКл. Визначте частоту і період електромагнітних коливань у контурі. Яка амплітуда значення заряду конденсатора?
4. Сила струму у відкритому коливальному контурі змінюється із часом за законом  $i = 100\cos 6 \cdot 10^5 f$ , мА. Яка довжина хвилі його випромінювання?

Я вмю пояснювати фізичні явища і процеси

5. Як слід змінити індуктивність котушки коливального контуру для збільшення періоду вільних електромагнітних коливань?
6. У чому відмінність поширення радіохвиль на Місяці й на Землі?
7. Де зосереджена енергія електричного поля під час електромагнітних коливань у коливальному контурі?



Мал. 138

Я знаю, що таке коливальний контур і для чого він призначений

8. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 400 пФ і котушки індуктивністю 10 мГн. Визначте амплітудне значення сили струму під час вільних електромагнітних коливань, якщо амплітудне значення напруги дорівнює 500 В.

9. Параметри двох коливальних контурів такі:  $C_1 = 160$  пФ,  $L_1 = 5$  мГн і  $C_2 = 100$  пФ,  $L_2 = 4$  мГн. На скільки слід змінити ємність  $C_2$ , щоб частота вільних електромагнітних коливань у них стала однаковою?

Я знаю, що таке радіозв'язок і радіолокація

10. Телевізійний ретранслятор встановлено на супутнику, який рухається по коловій орбіті на висоті 36000 км над поверхнею Землі. Супутник розташований на одній вертикалі з приймальною антеною, яка, у свою чергу, розміщена поблизу антени передавача. За який інтервал часу сигнал поширюється від телецентру до телевізора?

11. Радіолокатор працює на хвилі довжиною 15 см. Він випромінює щосекунди 4000 імпульсів, кожен з яких містить 4000 електромагнітних коливань. Яка тривалість імпульсу? Яка найбільша дальність локаційної розвідки?

Я знаю, що таке електромагнітні коливання

12. Чому спіраль електричної лампи (мал. 138) здійснює коливання?

### ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

#### Варіант I

- Математичний маятник має період коливань 2ш с. Визначте його довжину.  
А. 1 м. Б. 2 м. В. 5 м. Г. 9,8 м. Д. 11,2 м.
- Під час вітру гілка дерева здійснює гармонічні коливання з періодом 2 с. Амплітуда коливань 10 см. Визначте зміщення гілки через 0,2 с після її проходження через положення рівноваги. Початок коливань збігається з положенням рівноваги.  
А. 0,059 м. Б. 0,5 м. В. 1 м. Г. 2 м. Д. 1,2 м.
- Як зміниться хід (період і частота) годинника з маятником на металевому стержні при значному підвищенні температури?  
А. Збільшиться період, зменшиться частота. Б. Збільшиться період і частота. В. Зменшиться період і частота. Г. Зменшиться період, збільшиться частота. Д. Правильної відповіді немає.

4. Рівняння коливань тягарця на пружині має вигляд  $x = 0,1 \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

Визначте амплітуду, початкову фазу, власну частоту, період коливань.

А. 0,1 м;  $\omega/2$ ; 1 Гц; 1 с. Б. 0,2 м;  $\omega/2$ ; 1 Гц; 1 с. В. 0,1 м;  $\omega/4$ ;  $2\omega$  Гц; 2 с.  
Г. 0,15 м;  $\omega/3$ ; 1 Гц; 1 с. Д. 0,1 м;  $\omega/3$ ; 1 Гц; 1 с.

5. Визначте максимальне значення швидкості і прискорення, якщо рівняння коливань має вигляд:  $x = 0,2 \cos\left(3t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

А. 0,6 м/с; 0,2 м/с<sup>2</sup>. Б. 0,2 м/с; 1,8 м/с<sup>2</sup>. В. 0,6 м/с; 1,8 м/с<sup>2</sup>. Г. 1,8 м/с;  
1,8 м/с<sup>2</sup>. Д. 0,6 м/с; 2 м/с<sup>2</sup>.

6. Запишіть закон зміни прискорення, якщо координата змінюється за законом  $x = 1 \cos\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$ .

А.  $a = -100 \cos\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$ . Б.  $a = -10 \cos\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$ . В.  $a = -100 \cos\left(10t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

Г.  $a = -10 \sin\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$ . Д.  $a = \sin\left(10t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

7. Жорсткість пружини 100 Н/м, маса тягарця 1 кг. Яка повна енергія коливальної системи, якщо максимальне зміщення дорівнює 10 см?

А. 1 Дж. Б. 0,5 Дж. В. 2 Дж. Г. 1,5 Дж. Д. 0,25 Дж.

8. Як зміниться частота і період електромагнітних коливань, якщо індуктивність збільшиться у 2 рази, а ємність зменшиться у 2 рази?

А. Збільшиться у 2 рази, зменшиться у 2 рази.

Б. Збільшиться у 4 рази, збільшиться у 2 рази.

В. Залишиться незмінною, зменшиться у 2 рази.

Г. Залишаться незмінними.

Д. Збільшиться у 2 рази, збільшиться у 2 рази.

9. Сила струму в котушці індуктивності змінюється за законом  $i = 0,01 \cos\left(6\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ . Визначте період коливань у цьому контурі.

А. 6ω с. Б. 1 с. В. 0,33 с. Г. 0,66 с. Д. ω с.

10. Циклічна частота коливань, які виникають у коливальному контурі, 10<sup>6</sup> Гц. Визначте індуктивність котушки, якщо ємність конденсатора 1 мкФ.

А. 10<sup>6</sup> Гн. Б. 1 мкГн. В. 10<sup>-5</sup> Гн. Г. 10<sup>-4</sup> Гн. Д. 1 Гн.

11. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А.  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ . 1. Закон Ома для змінного струму.

Б.  $\omega = \frac{1}{LC}$ . 2. Період коливань.

В.  $W = \frac{LI^2}{2}$ . 3. Циклічна частота коливань.

Г.  $W = \frac{q^2}{2C}$ .

4. Енергія магнітного поля.

Д.  $I_D = \frac{U_D}{Z}$ .

5. Енергія електричного поля.

12. В один ящик поклали реостат, у другий — конденсатор, а в третій — котушку індуктивності. Виводи приєднали до зовнішніх затискачів. Як, не заглядаючи в ящик, довідатись, де знаходиться реостат? Використовуються джерела постійної та змінної напруги і лампа розжарювання.

- А. Лампа світиться лише при змінній напрузі.  
 Б. Розжарення лампи однакове при постійній та змінній напрузі.  
 В. Лампа світиться лише при постійній напрузі.  
 Г. Лампа при постійній напрузі не світиться.

13. Миттєве значення ЕРС  $\varepsilon = 100 \sin 800\pi t$ , В. Чому дорівнює амплітуда, частота, період і фаза коливань, якщо  $E = 50$  В?

А.  $\varepsilon_{\max} = 100$  В,  $\nu = 800$  Гц,  $T = 1/800$  с,  $\varphi = 8\pi t$ .

Б.  $\varepsilon_{\max} = 50$  В,  $\nu = 400$  Гц,  $T = 1/400$  с,  $\varphi = \pi t$ .

В.  $\varepsilon_{\max} = 100$  В,  $\nu = 400$  Гц,  $T = 1/400$  с,  $\varphi = \frac{\pi t}{6}$ .

Г.  $\varepsilon_{\max} = 50$  В,  $\nu = 800$  Гц,  $T = 1/800$  с,  $\varphi = \frac{\pi t}{12}$ .

14. Незатухаючі вільні коливання характеризуються такими фізичними величинами, як: 1) зміщення, 2) амплітуда, 3) період, 4) частота. Які з цих величин стали?

- А. 1 і 2. Б. 2, 3 і 4. В. 1, 2, 3 і 4. Г. 1 і 4. Д. 3 і 4.

15. Можна встановити режим резонансу в колі змінного струму, не змінюючи індуктивність та ємність у ньому. Для цього потрібно встановити таку частоту струму, яка задовольняє рівняння

А.  $\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Б.  $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . В.  $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L}{C}}}$ . Г.  $\nu = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$ . Д.  $\nu = \sqrt{LC}$ .

16. Усім добре відомі параболічні антени радіотелескопів та станцій зв'язку із супутниками. Ці великі споруди досягають ста метрів у діаметрі. А яку властивість електромагнітних хвиль покладено в основу фокусування радіохвиль такою антеною?

- А. Поглинання в діелектрику.  
 Б. Відбивання від провідника.  
 В. Заломлення на межі двох середовищ.  
 Г. Поляризація при проходженні крізь речовину.

17. Антена (диполь), що випромінює електромагнітні хвилі, являє собою вертикально натягнутий дріт. Як мають бути розміщені приймальні антени, щоб найкраще приймати сигнал, який передається?

- А. Вертикально. Б. Горизонтально. В. Орієнтація не має значення.  
 Г. Правильної відповіді немає.

## Варіант II

1. Маса тягарця 100 г, а рівняння його коливального руху

$$x = 0,25 \sin\left(10t + \frac{\pi}{6}\right).$$

Визначте жорсткість пружини і зміщення в момент часу  $t = 0$  с.

- А. 100 Н/м; 0,125 м. Б. 10 Н/м; 0,125 м. В. 10 Н/м; 0,25 м. Г. 100 Н/м; 0,25 м. Д. 25 Н/м; 0,1 м.

2. У скільки разів зміниться частота коливань математичного маятника, якщо його довжину збільшити у 2 рази?

- А. Збільшиться у 2 рази. Б. Зменшиться у 2 рази. В. Збільшиться в 1,4 рази. Г. Зменшиться в 1,4 рази. Д. Залишиться без змін.

3. Під час виконання лабораторної роботи з визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника учень зафіксував, що маятник довжиною 1 м за 200 с зробив 100 коливань. Визначте, яке значення прискорення вільного падіння отримав при цьому учень.

- А. 9,86 м/с. Б. 9,86 м/с<sup>2</sup>. В. 9,83 м/с<sup>2</sup>. Г. 10 м/с<sup>2</sup>. Д. 9,79 м/с<sup>2</sup>.

4. Як зміниться період коливань секундного маятника годинника, якщо годинник за допомогою космічного корабля перемістити на Місяць?

- А. Не зміниться. Б. Період зменшиться. В. Період збільшиться. Г. Правильної відповіді немає.

5. Запишіть закон зміни швидкості, якщо координата змінюється за законом  $x = 0,3 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

- А.  $v = 1,5 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$ . Б.  $v = 1,5 \cos\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$ . В.  $v = 0,5 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

- Г.  $v = 1,5 \sin\left(5t - \frac{\pi}{2}\right)$ . Д.  $v = 0,5 \cos\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

6. Рівняння руху тягарця на пружині  $\vec{x} = 0,1 \sin^4 t + \hat{j}$ , маса  $m = 1$  кг. Визначте повну енергію коливальної системи.

- А. 0,16 Дж. Б. 0,8 Дж. В. 0,08 Дж. Г. 1,6 Дж. Д. 0,24 Дж.

7. Яка частота і період коливань у коливальному контурі, якщо індуктивність його котушки 0,1 Гн, а ємність конденсатора  $10^{-5}$  Ф?

- А. 0,15 кГц; 6,28 мс. Б. 2 кГц; 3,14 мс. В.  $5 \cdot 10^3$  Гц;  $0,2 \cdot 10^{-3}$  мс. Г.  $6 \cdot 10^3$  Гц;  $0,3 \cdot 10^{-2}$  мс. Д. 1,5 кГц; 6,28 мс.

8. Заряд на конденсаторі коливального контуру змінюється за законом  $q = 10^{-5} \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ . Визначте закон зміни струму в котушці.

- А.  $i = 3,14 \cdot 10^{-5} \cos\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ . Б.  $i = 10^{-5} \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ . В.  $i = 6,28 \cdot 10^{-5} \cos\left(2\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ .

- Г.  $i = 6,28 \cdot 10^{-5} \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ . Д.  $i = 6,28 \cdot 10^{-5} \cos\left(2\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ .

9. Визначте власну частоту коливань у контурі, в якому заряд змінюється за законом  $q = 10^{-6} \sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ .

- А. 300 Гц. Б. 3 Гц. В. 2,5 Гц. Г. 1,5 Гц. Д. 3,5 Гц.

10. Визначте період зміни струму в колі при резонансі, якщо  $L = 1$  Гн,  $C = 10^{-6}$  Ф.

- А. 6,28 с. Б. 6,28 см. В. 628 с. Г. 0,628 с. Д. 5 с.

11. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і фізичними величинами.

- |                    |           |
|--------------------|-----------|
| А. Електроємність. | 1. Герц.  |
| Б. Індуктивність.  | 2. Фарад. |
| В. Сила струму.    | 3. Генрі. |
| Г. Заряд.          | 4. Ампер. |
| Д. Частота.        | 5. Кулон. |

12. Як відомо, графік залежності ЕРС від часу при рівномірному обертанні рамки в однорідному магнітному полі є синусоїдою. Як зміниться графік, якщо частота обертання рамки збільшиться у 2 рази?

- А. Період та амплітудне значення ЕРС зменшаться у 2 рази.  
 Б. Період та амплітудне значення не зміняться.  
 В. Період зменшиться у 2 рази, амплітудне значення збільшиться у 2 рази.  
 Г. Період збільшиться у 2 рази, амплітудне значення зменшиться у 2 рази.  
 Д. Правильної відповіді немає.

13. Яка характерна для електромагнітних хвиль величина залишається незмінною при проходженні світла через середовище?

- А. Частота хвилі.  
 Б. Довжина хвилі.  
 В. Швидкість поширення хвилі.  
 Г. Всі величини суттєво змінюються.

14. Через яку частку періоду після того, як конденсатор почав розряджатись, енергія в контурі розподілиться порівну між конденсатором і котушкою?

- А. Через  $1/2 T$ .  
 Б. Через  $1/4 T$ .  
 В. Через  $1/8 T$ .  
 Г. через  $2/3 T$ .  
 Д. Правильної відповіді немає.

15. У колі змінного струму частотою 50 Гц послідовно ввімкнено котушку і конденсатор  $C$ . Чому має дорівнювати добуток  $LC$ , щоб режим резонансу?

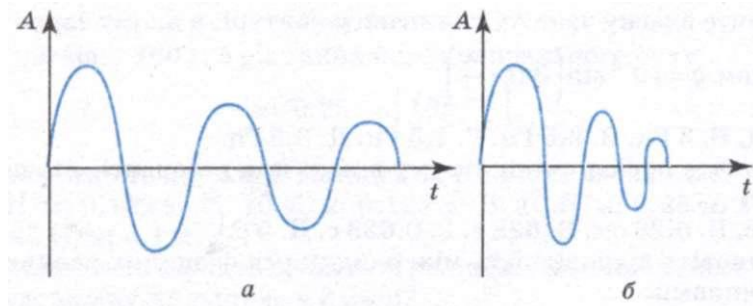
- А.  $1 \cdot 10^{-5}$  Гн · Ф.  
 Б.  $3 \cdot 10^{-3}$  Гн · Ф.  
 В. 314 Гн · Ф.  
 Г.  $2 \cdot 10^{-2}$  Гн · Ф.

Д. Правильної відповіді немає.

16. Дано графіки (мал. 139, а, б) затухаючих коливань. Який з них відповідає дійсності і чому?

- А. Обидва графіки вірні, тому що змінюються  $i_A$  і  $i_B$ .





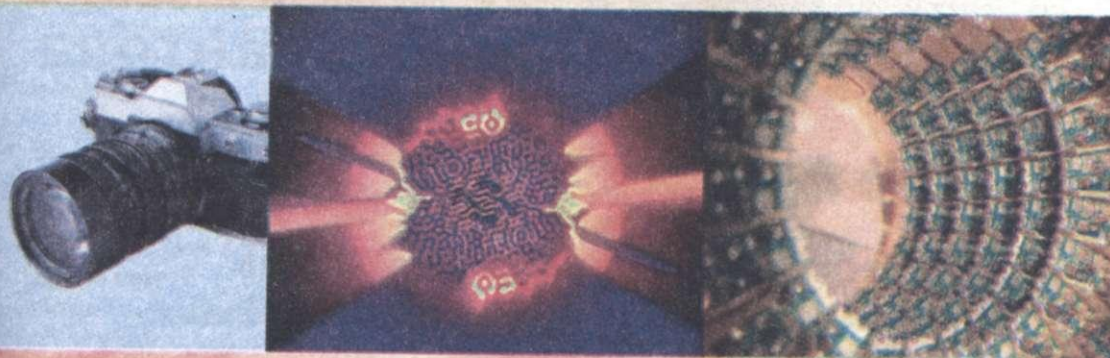
Мал. 139

- Б. Правильний графік *б*, тому що змінюється  $A$ .
- В. Правильний графік *а*, тому що змінюється  $A$ , а  $t$  — стала.
- Г. Обидва графіки неправильні.

17. Електричне коло складається з послідовно з'єднаних конденсатора  $C$ , котушки індуктивності  $L$  та вимикача, що дозволяє замкнути коло. Конденсатор зарядили до напруги  $U$ . Що буде відбуватись у колі, якщо вимикач замкнути?

- А. Конденсатор плавно розрядиться.
- Б. Виникнуть незатухаючі електромагнітні коливання.
- В. Виникнуть електромагнітні коливання, амплітуда і період яких поступово зменшуються.
- Г. Виникнуть електромагнітні коливання, амплітуда яких поступово зменшується, а період залишається сталим.
- Д. Правильної відповіді немає.

# ОПТИКА І КВАНТОВА ФІЗИКА





## Розділ 4 Хвильова і квантова оптика

- Розвиток поглядів на природу світла
- Поширення світла в різних середовищах. Явища на межі двох середовищ
- Інтерференція світла
- Дифракція світла
- Поляризація світла. Поперечність світлових хвиль і електромагнітна теорія світла
- Дисперсія світла
- Розвиток квантової фізики. Гіпотеза Планка
- Фотон. Енергія, маса, імпульс фотона. Фотоелектричний ефект
- Застосування фотоефекту
- Люмінесценція
- Квантові генератори та їх застосування
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла

### § 31. РОЗВИТОК ПОГЛЯДІВ НА ПРИРОДУ СВІТЛА

Ви добре знаєте ще з 7 класу про те, що від джерела світла, наприклад від лампочки або свічки, світло поширюється в усі боки й падає на навколишні предмети, зокрема, нагріваючи їх. Потрапляючи в око, світло спричиняє зорове відчуття — ми бачимо те, що оточує нас. Можна сказати, що під час поширення світла передається дія від одного тіла — джерела світла — до іншого — приймача.

Взагалі ж одне тіло може діяти на інше двома різними способами: або переносити речовину від джерела до приймача, або ж змінювати стан середовища між тілами (у даному випадку речовина не переноситься).

Можна, наприклад, змусити задзвонити дзвінок, що перебуває на деякій відстані, вціливши в нього кулькою (мал. 140, а). При цьому відбувається перенесення речовини. Але можна діяти інакше: прив'язати шнур до осердя дзвінка і змусити дзвінок звучати, посилаючи по шнуру хвилі, які розгойдуватимуть його осердя (мал. 140, б). У цьому випадку речовина не переноситься. По шнуру буде поширюватися хвиля, змінюючи його стан (форму). Отже, дія від одного тіла до другого може передаватися хвилями.

Відповідно до двох можливих способів передавання дії від джерела до приймача виникли й почали розвиватися дві зовсім різні теорії про те, що таке світло і яка його природа. Причому виникли вони майже одночасно в XVII ст.

Одна теорія пов'язана з ім'ям І. Ньютона, а друга — з ім'ям К. Гюйгенса.

І. Ньютон дотримувався так званої **корпускулярної теорії світла**, згідно з якою **світло — це потік частинок**, що вилітають від джерела, прямуючи в усі боки (перенесення речовини).

За **хвильовою теорією К. Гюйгенса**, **світло — це хвилі**, що поширюються в особливому, гіпотетичному середовищі — ефірі, який заповнює увесь простір і проникає всередину всіх тіл.

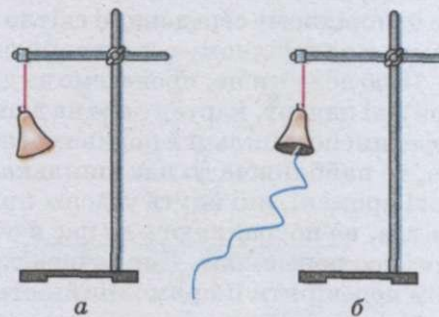
Обидві теорії тривалий час існували паралельно. Жодна з них не могла перемогти. Лише авторитет І. Ньютона змушував більшість учених віддавати перевагу корпускулярній теорії. Відомі на той час із дослідів закони поширення світла більш або менш успішно пояснювалися обома теоріями.

На основі корпускулярної теорії було важко пояснити, чому світлові пучки, перетинаючись у просторі, ніяк не діють один на одного. Адже світлові частинки повинні стикатися й розсіюватися.

Хвильова ж теорія це легко пояснювала. Хвилі, наприклад, на поверхні води вільно проходять одна крізь одну і не впливають одна на одну.

Проте за хвильовою теорією важко пояснити прямолінійне поширення світла, яке обумовлює утворення за предметами різких тіней. За корпускулярною ж теорією прямолінійне поширення світла — це просто наслідок закону інерції.

Таке непевне уявлення щодо природи світла тривало до початку XIX ст.,



Мал. 140

до того часу, поки не були відкриті явища дифракції (огинання світлом перешкод) та інтерференції світла (посилення або послаблення освітленості від накладання світлових пучків). Ці явища властиві тільки хвильовому руху. Пояснити їх за корпускулярною теорією не можна. Тому здавалося, що хвильова теорія остаточно перемогла.

Така впевненість особливо зросла після того, як Дж. Максвелл у другій половині XIX ст. показав, що світло є окремим випадком електромагнітних хвиль. Праці Максвелла заклали основи електромагнітної теорії світла.

Після того як Г. Герц експериментально виявив електромагнітні хвилі, ніяких сумнівів у тому, що під час поширення світло поводить себе як хвиля, не лишилося.

Проте на початку XX ст. уявлення про природу світла почали докорінно змінюватися. Несподівано з'ясувалося, що відкинута корпускулярна теорія все ж таки має під собою основу.

**Під час випромінювання і поглинання світло поводить себе подібно до потоку частинок.**

Було виявлено переривчасті, або, як кажуть, квантові властивості світла. Виникла незвичайна ситуація: явища інтерференції і дифракції, як і раніше, можна було пояснити, вважаючи світло хвилею, а явища випромінювання і поглинання — вважаючи світло потоком частинок. Ці два, здавалось би, несумісних одне з одним уявлення про природу світла в 30-х роках XX ст. вдалося несуперечливо об'єднати у новій видатній фізичній теорії — квантовій електродинаміці.

Пізніше з'ясувалося, що двоїстість властивостей характерна не тільки для світла, а й для будь-якої іншої форми матерії.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

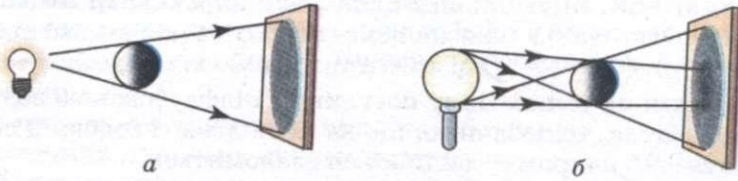
1. Які існують теорії світла і що вони пояснюють?
2. Хто є засновниками цих теорій?

## **§ 32. ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ. ЯВИЩА НА МЕЖІ ДВОХ СЕРЕДОВИЩ**

**1. Прямолінійне поширення світла.** Як показують спостереження, в оптично однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Іншими словами, в однорідному середовищі світлові промені — прямі лінії.

Щоб довести це, проведемо за допомогою лінійки відрізок прямої лінії на аркуші паперу, картону або на дошці. Увіткнемо біля кінців відрізка і в його середині по шпильці й подивимося вздовж накресленої лінії. Якщо лінія пряма, то найближча до нас шпилька закриватиме решту. Це означає, що світлові промені, які йдуть уздовж прямої від дальшої шпильки як від джерела світла, не потрапляють до нас в очі, тому що на їх шляху зустрічається непрозора перешкода. Дивлячись уздовж накресленої лінії, можна таким чином перевірити її прямолінійність.

Прямолінійністю поширення світла пояснюється утворення тіні, тобто ділянки, до якої не надходить світлова енергія. Якщо розміри джерела малі



Мал. 141

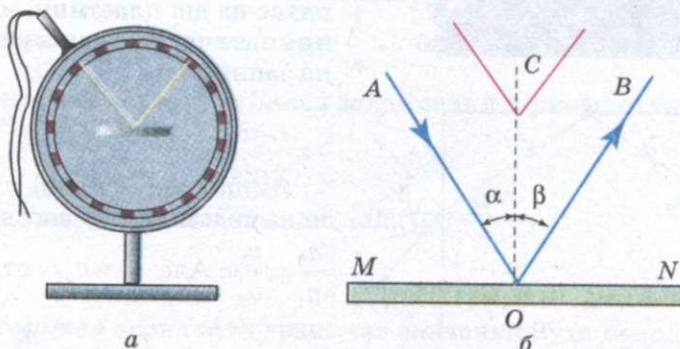
(світна точка), то спостерігається різко окреслена тінь (мал. 141, а). Якщо ж розміри джерела великі, то утворюються нерізкі тіні (мал. 141, б).

Справа в тому, що від кожної точки джерела світло поширюється прямолінійно, і предмет, освітлений вже двома світними точками, утворить дві тіні, які не суміщаються, й накладання яких дає нерівномірну тінь. Повна тінь від подовженого джерела утворюється лише на тих ділянках екрана, куди світло не потрапляє зовсім. По краях повної тіні проходить світліша ділянка. Це — **напівтінь**. У міру віддалення від повної тіні напівтінь стає все світлішою. Із повної тіні око зовсім не побачить джерело світла, а з напівтіні воно побачить лише частину його поверхні. У багатьох випадках тіні взагалі немає. Наприклад, у похмурий день не можна побачити тіні від стовпів, будинків та інших предметів. Під час хірургічних операцій операційне поле освітлюють безтіньовими лампами.

Внаслідок того, що в оптично однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно, ми можемо спостерігати фази Місяця, сонячні й місячні затемнення.

## 2. Відбивання і заломлення світла.

Якщо за допомогою приладу (мал. 142, а) направити на дзеркальну поверхню в точку  $O$  пучок світла так, щоб промінь світла  $OA$  (мал. 142, б) лежав у площині приладу, то, дійшовши до поверхні, промінь світла змінить напрям свого поширення, тобто відбудеться відбивання світла. Завдяки досліді побачимо, що відбитий промінь  $OB$  також лежить у площині приладу. Якщо змінювати напрям падаючого променя, пересуваючи джерело світла, то при цьому буде змінюватися і напрям відбитого променя. Але обидва промені завжди будуть лежати в площині приладу. Можна провести перпендикуляр  $OC$  до поверхні, на яку падає промінь, і сформулювати закони відбивання світла:



Мал. 142

**промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до межі двох середовищ, проведений у точці падіння променя, лежать в одній площині. Кут відбивання  $\beta$  дорівнює куту падіння  $\alpha$ .**

Якщо направити на тонкостінну посудину з підфарбованою водою (мал. 143, а) промінь світла, то побачимо, що на межі двох середовищ світловий промінь змінить свій напрям — відіб'ється і заломиться.

Якщо виконати креслення (мал. 143, б), то побачимо, що кут відбивання  $\beta$  дорівнює куту падіння  $\alpha$ , а при переході променя із повітря у воду кут заломлення  $\gamma$  менший за кут падіння  $\alpha$ . Крім того, бачимо, що падаючий і заломлений промені лежать в одній площині з перпендикуляром, проведеним до межі двох середовищ у точці падіння променя. При переході променя із води в повітря кут заломлення  $\gamma_0$  більший за кут падіння променя  $\alpha_0$ .

Отже, закони заломлення світла можна сформулювати так:

**промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі двох оптичних середовищ, проведений у точці падіння променя, лежать в одній площині.**

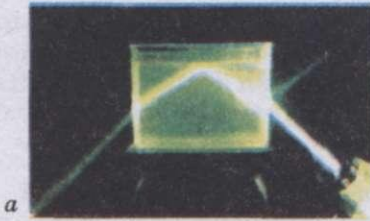
**Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для даних двох оптичних середовищ.**

Цю величину називають **відносним показником заломлення** другого середовища відносно першого. Він визначається відношенням швидкості поширення світла в першому середовищі до швидкості світла в другому середовищі. Враховуючи розглянуте вище, запишемо:

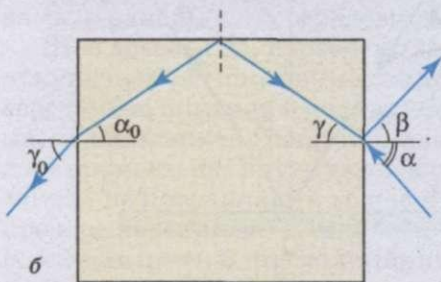
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}.$$

Якщо першим середовищем є вакуум, то показник заломлення другого середовища називається **абсолютним показником заломлення**:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v} = n.$$



а



б

Мал. 143

Тепер визначимо співвідношення між відносним показником заломлення двох середовищ і їх абсолютними показниками заломлення. Нехай у вакуумі світло падає на дві пластини, виготовлені з різних оптично прозорих речовин. Тоді можна записати

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

Якщо ліві й праві частини цих рівнянь поділити одна на одну, то отримаємо

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad \text{Але } \frac{v_1}{v_2} = n_{21}, \quad \text{отже,}$$

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Таким чином, відносний показник заломлення двох оптично прозорих речовин визначається відношенням їх абсолютних показників заломлення.

**3. Хід променів у трикутній призмі.** У багатьох оптичних приладах використовується трикутна призма, виготовлена зі скла або інших прозорих матеріалів. Така призма — найважливіша деталь **спектроскопів** — приладів для дослідження кольорового складу світла. Її використовують у біноклях, перископах та багатьох інших приладах.

На мал. 144 зображено переріз скляної призми площиною, перпендикулярною до її бічних ребер. Промінь у призмі заломлюється двічі: на грані  $OA$  і на грані  $OB$ . Кут  $\varphi$  між цими гранями називають **заломним кутом призми**. Кут відхилення променя  $\theta$  залежить від заломного кута призми  $\varphi$ , від показника заломлення  $n$  матеріалу призми і від кута падіння  $\alpha$ .

**4. Повне внутрішнє відбивання.** Помістимо в посудину з водою спеціальне джерело світла, від якого в різні боки поширюються промені (мал. 145). Промінь, падаючий перпендикулярно до межі вода—повітря, не заломлюється. Промені, що падають під різними кутами до поверхні води, заломлюються по-різному. Але є промені, які взагалі не переходять з води у повітря, а повністю відбиваються від її поверхні.

Явище, коли промені світла не виходять із середовища і повністю відбиваються всередину, називається **повним внутрішнім відбиванням**.

Повністю світло відбивається від межі оптично більш густого середовища з оптично менш густим середовищем, коли кут падіння  $\alpha$  дорівнює  $\alpha_0$  або більший за нього. Тому кут падіння  $\alpha_0$ , якому відповідає кут заломлення, що дорівнює  $90^\circ$ , називають **граничним кутом повного відбивання**.

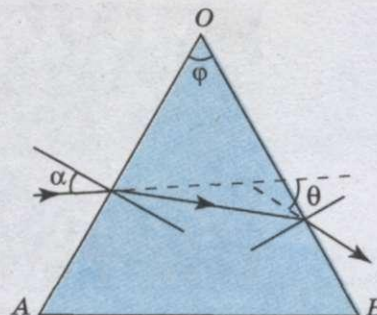
Якщо  $n$  — показник заломлення води відносно повітря ( $n > 1$ ), то показник заломлення повітря відносно води буде  $\frac{1}{n}$ . У цьому випадку вода є першим середовищем, а повітря — другим. Закон заломлення записуємо так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{1}{n}.$$

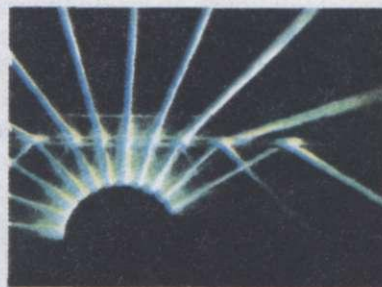
Якщо  $\sin \gamma = 1$ , то формула набуває вигляду

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}.$$

З цієї рівності можна визначити граничне значення кута повного відбивання  $\alpha_0$ . Для води ( $n = 1,33$ ) він дорівнює  $48^\circ 35'$ , для скла ( $n = 1,5$ ) —  $41^\circ 50'$ , для алмазу ( $n = 2,4$ ) —  $24^\circ 40'$ . В усіх випадках другим середовищем є повітря.



Мал. 144



Мал. 145





Мал. 146

Повне внутрішнє відбивання використовують у волоконній оптиці для передавання світла і зображення по пучках прозорих гнучких волокон — **світловодів** (мал. 146).

Якість зображення, що передається по світловоду, залежить від діаметра волокон і щільності їх укладання. Сьогодні є світлопроводи, діаметр волокон яких 1 нм, а число волокон досягає декількох десятків тисяч.

Волоконна оптика знайшла широке застосування в сучасній техніці й медицині. Так, для огляду внутрішніх органів хворого (шлунку, кишечника та ін.) застосовують волоконний гастроскоп, що складається з тонкого подвійного, дуже гнучкого світловода, який вводиться через стравохід або товсту кишку всередину порожнини, що оглядається. Через один із введених світловодів порожнина освітлюється, а через інший світловод оглядається або фотографується.

По світловодах, як по проводах, можна передавати будь-яку інформацію. Це дозволило створити автономні системи зв'язку, наприклад, на кораблях, в яких сигнали передаються по світловодах.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які явища можуть відбуватися на межі двох середовищ?
2. Сформулюйте закони відбивання і заломлення світла.
3. Яка особливість поширення світла у тригранній призмі?
4. Обчисліть граничні кути для води і алмазу.
5. У воду опустили алмаз і такої ж форми скло. Що буде помітним у воді — алмаз або скло? Чому?
6. Що таке світловоди і де вони використовуються?



### Це цікаво знати

**Відкриття явища подвійного променезаломлення світла.** У 1669 р. датський фізик **Е. Бартолін** (1625—1698) зробив два важливих відкриття, що були покладені в основу фізичної кристалографії. Так, в кристалах ісландського шпату вчений відкрив явище подвійного променезаломлення, а також встановив наявність у кристалах площин спайності. Результати своїх робіт Бартолін опублікував у Лейпцизі, Копенгагені, Лондоні. Але до цих важливих наукових відкриттів Англійське королівське товариство поставилось з недовірою, вважаючи їх випадковими. Тому вони були надовго забуті. Лише через 20 з лишнім років, у 1691 р. **К. Гюйгенс** (1628—1695) підтвердив правильність відкриття Бартоліна, спостерігаючи явище подвійного променезаломлення у кристалах кварцу (мал. 147).

Сьогодні відомо, що не лише ісландський шпат і кварц роздвоюють світло, а й багато інших кристалів мають цю властивість. Причиною подвійного променезаломлення є анізотропія швидкості світла в кристалах. До цих самих відкриттів Бартоліна і Гюйгенса прийшов І. Ньютон (1643—1727). Але довгий час дані експериментальні факти розцінювалися

як курйози, що притаманні тільки цим двом мінералам (ісландському шпату та кварцу).

Лише у 1801 р. **Р. Гаюї** у «Курсі мінералогії» наводить список мінералів, в яких спостерігається явище подвійного променезаломлення світла. Цей перелік він отримав за результатами власних досліджень. У праці також вперше було описано оптично ізотропні кристали, що мають ці властивості. Досліди Гаюї зводилися до того, що він розглядав крізь грані кристала (або крізь призму, виточену з нього) тонку голку для шиття. При цьому дослідник змінював положення голки. У випадку достатньо вираженого явища подвійного променезаломлення голка мала подвійне зображення. Вчений вже тоді помітив, що оптично ізотропні кристали повинні належати до однієї групи, яка сьогодні називається кубічною (правильною) сингонією. Розуміючи важливість урахування оптичних властивостей мінералів, Гаюї запропонував користуватися ними для визначення дорогіших каменів.



Мал. 147

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

Паралельний пучок світла падає на плоскопаралельну скляну пластинку під кутом  $\alpha$ , синус якого дорівнює 0,8. Пучок, що вийшов з пластинки, зміщений щодо продовження падаючого пучка на відстань 2 см. Яка товщина пластинки  $l$ , якщо показник заломлення скла становить 1,7?

#### Розв'язання

Товщину пластинки визначимо із трикутника  $ABC$  (мал. 148):  $l = AC \cos \beta$ .

З формули  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ , маємо  $\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}$ ;  $\sin \beta = 0,472$ ;  $\beta = 28^\circ 6'$  і  $\cos \beta = 0,882$ .

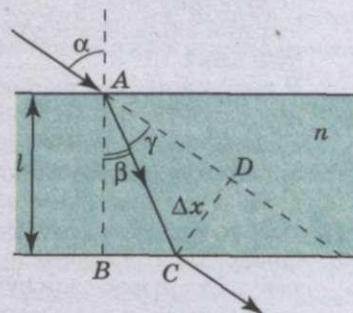
З трикутника  $ADC$  визначаємо

$$AC = \frac{\Delta x}{\sin \gamma} = \frac{\Delta x}{\sin(\alpha - \beta)}, \text{ тому що } \gamma = \alpha - \beta.$$

Оскільки  $\sin \alpha = 0,8$ , то  $\alpha = 53^\circ 12'$ .

$$\text{Остаточно маємо } l = \frac{\Delta x}{\sin(\alpha - \beta)} \cos \beta.$$

Підставивши значення відомих величин, отримуємо  $l = 4,2$  см.



Мал. 148

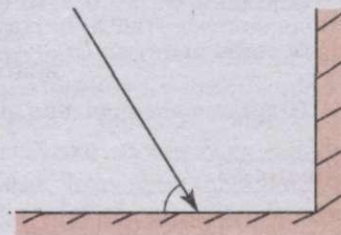
#### Рівень А

277. Наведіть приклади, які підтверджують прямолінійне поширення світла.  
278. Кутова висота Сонця над горизонтом  $20^\circ$ . Як треба розташувати плоске дзеркало, щоб відбиті промені напрямити вертикально вгору?

279. Кут падіння пучка світла на плоске дзеркало дорівнює  $20^\circ$ . На скільки зміниться кут між падаючим і відбитим пучками, якщо кут падіння пучка збільшити до  $35^\circ$ ?
280. Промінь світла переходить із повітря у скло. Кут заломлення дорівнює  $27^\circ$ . Який кут падіння променя? Показник заломлення скла становить 1,7.
281. Кут падіння променя з повітря на поверхню води становить  $60^\circ$ , а кут заломлення —  $40^\circ$ . Який показник заломлення води? Який кут падіння променя, якщо кут заломлення дорівнює  $45^\circ$ ?
282. Промінь переходить із води у скло. Кут заломлення дорівнює  $45^\circ$ . Визначте кут падіння. Показник заломлення скла становить 1,5, а води — 1,33.
283. Людина стоїть на відстані 5 м від плоского дзеркала. На якій відстані від себе вона побачить своє відображення? Як зміниться відстань, якщо дзеркало відсунути від людини на 2 м?
284. Яке зображення прибережних дерев можна бачити в озері — пряме чи обернене?
285. Перед вертикально поставленим дзеркалом стоїть олівець. Побудуйте його зображення.
286. Визначте граничний кут повного відбивання для алмазу та плексигласу.
287. Граничний кут повного відбивання для спирту  $47^\circ$ . Визначте показник заломлення спирту.

## Рівень В

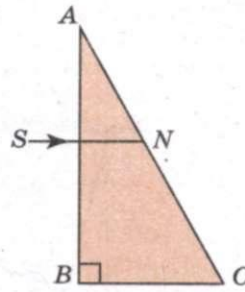
288. Людина дивиться в дзеркало, що висить вертикально. Чи змінюватимуться лінійні розміри тієї частини тіла людини, яку видно в дзеркалі, у міру віддалення її від дзеркала? Відповідь проілюструйте побудовою.
289. За якої умови кут заломлення більший від кута падіння? Яких номінальних значень можуть досягти кут падіння і кут заломлення у цьому випадку?
290. У кімнаті висить вертикальне дзеркало, верхній край якого розміщено на рівні тімені людини, зріст якої 182 см. Якою повинна бути мінімальна довжина дзеркала, щоб людина бачила себе в ньому на повний зріст?
291. Вузкий пучок світла падає на двогранний дзеркальний прямий кут у площині, перпендикулярній до ребра кута (мал. 149). Кут падіння пучка  $60^\circ$ , а точка падіння віддалена від ребра на 10 см. Яка відстань між падаючим і відбитим пучками?
292. У тарілку налито шар води завтовшки 3,8 см. На дні тарілки лежить плоске дзеркало. На поверхню води падає вузький пучок світла так, що кут падіння дорівнює  $30^\circ$ . На якій відстані від місця входу пучка світла у воду він, відбившись від дзеркала, знову вийде на її поверхню? Показник заломлення води становить 1,33.
293. Хлопчик намагається влучити палицею в камінь, який лежить на дні струмка глибиною 40 см. Хлопчик прицілюється палицею вздовж напряму зору, який утворює з поверхнею води кут  $60^\circ$ . На якій відстані від каменя палиця увіткнеться в дно? Показник заломлення води дорівнює  $4/3$ .
294. Промінь падає під кутом  $30^\circ$  до поверхні скляної пластини завтовшки 2 см. Визначте бічне зміщення променя після проходження пластини. Показник заломлення скла дорівнює 1,5.
295. Яку фокусну відстань має плоске дзеркало?
296. Знайдіть побудовою зображення світної точки, що утворюється в двох плоских дзеркалах, розміщених одне відносно одного під кутом  $120^\circ$ .
297. Перед вертикально поставленим дзеркалом стоїть олівець. Побудуйте його зображення при умо-



Мал. 149

ві, що дзеркало, нахилене до площини, розмісти-  
ли під кутом  $45^\circ$ .

298. Де треба розташувати лампочку в автомобільній фарі, щоб можна було напрямити світловий потік якомога далі? Близько вниз? Близько вгору?
299. Під яким кутом до горизонту аквалангіст, перебуваючи у воді, бачить Сонце, що сідає за горизонт?
300. Промінь  $SN$  падає на прямокутну скляну призму  $BAC$  (мал. 150) перпендикулярно до грані  $AB$ . Заломиться промінь на грані  $AC$  в точці його падіння  $N$  чи зазнає повного відбивання, якщо кут  $A$  дорівнює  $30^\circ$ ?



Мал. 150

### § 33. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

Перед тим, як розпочати розгляд явища інтерференції світла, з'ясуємо спочатку, що це за явище.

Попередньо ми мали справу з однією хвилею, що поширюється від джерела. Але дуже часто в середовищі одночасно поширюється кілька різних хвиль. *Що ж відбувається в місцях, де хвилі накладаються одна на одну?*

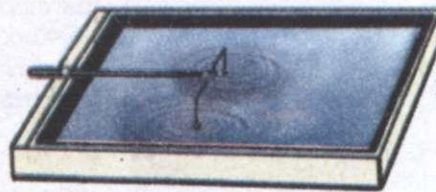
Якщо дві хвилі зустрічаються в одному місці гребенями, то в цьому місці збурення води посилюється. Якщо ж, навпаки, гребінь однієї хвилі зустрічається із западиною іншої, то поверхня води не збурюватиметься.

У кожній точці середовища коливання, спричинені двома хвилями, додаються. Результуюче зміщення будь-якої частинки середовища — це сума зміщень, які б створювала кожна з хвиль, поширюючись без іншої.

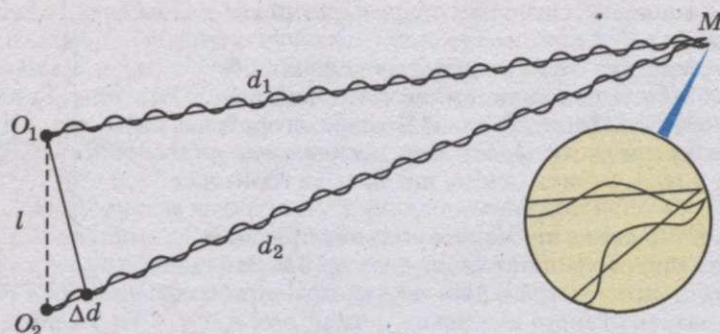
**Додавання у просторі двох (або кількох) хвиль, коли відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результуючих коливань у різних точках простору, називається інтерференцією.**

З'ясуємо, за яких умов можлива інтерференція хвиль. Для цього розглянемо детальніше накладання хвиль на поверхні води. Наприклад, можна одночасно збудити дві колові хвилі у ванні за допомогою двох кульок, прикріплених до стержня, який гармонічно коливається (мал. 151). Тоді у будь-якій точці  $M$  на поверхні води (мал. 152) додаватимуться коливання, спричинені двома хвилями (від джерел  $O_1$  і  $O_2$ ). Амплітуди ж коливань, які збудили у точці  $M$  обидві ці хвилі, будуть розрізнятися, тому що хвилі проходять різні шляхи  $d_1$  і  $d_2$ . Проте, якщо відстань  $l$  між джерелами значно менша від цих шляхів ( $l \ll d_1$  і  $l \ll d_2$ ), то обидві амплітуди можна вважати практично однаковими.

Результат додавання хвиль, які приходять у точку  $M$ , залежатиме від різниці фаз між ними. Якщо хвилі проходять різні відстані  $d_1$  і  $d_2$ , то вони мають різницю ходу  $\Delta d = d_2 - d_1$ . Коли різниця ходу дорівнює довжині хвилі  $\lambda$ , це озна-



Мал. 151



Мал. 152

чає, що друга хвиля запізнюється порівняно з першою на один період (якраз за період хвиля проходить шлях, що дорівнює довжині хвилі). Отже, в цьому випадку гребені (або западини) обох хвиль збігатимуться.

На мал. 153 зображено залежність від часу зміщень  $x_1$  і  $x_2$ , спричинених двома хвилями, коли  $\Delta d = \lambda$ . Різниця фаз коливань дорівнює нулю (або  $2\pi$ , оскільки період синуса дорівнює  $2\pi$ ). Внаслідок додавання цих коливань виникає результуюче коливання  $x$  із подвоєною амплітудою.

**Амплітуда коливань середовища в даній точці буде максимальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює цілому числу довжин хвиль:**

$$\Delta d = k\lambda,$$

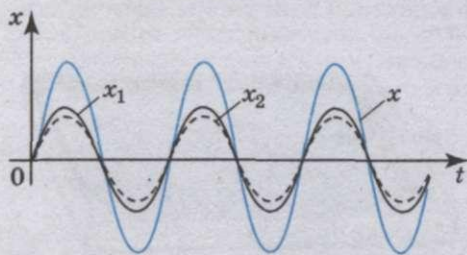
де  $k = 0, 1, 2, \dots$

Ця умова називається умовою максимумів.

А що буде, коли на відрізку  $\Delta d$  вміщується половина довжини хвилі? Очевидно, що друга хвиля відставатиме від першої на половину періоду. Різниця фаз дорівнюватиме  $\pi$ , тобто коливання відбуватимуться в протифазі. Внаслідок додавання цих коливань амплітуда результуючого коливання дорівнює нулю і у розглядуваній точці коливання відсутні (мал. 154). Те саме спостерігається, якщо на відрізку вміщується будь-яке непарне число півхвиль.

**Амплітуда коливань середовища в даній точці буде мінімальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює непарному числу півхвиль:**

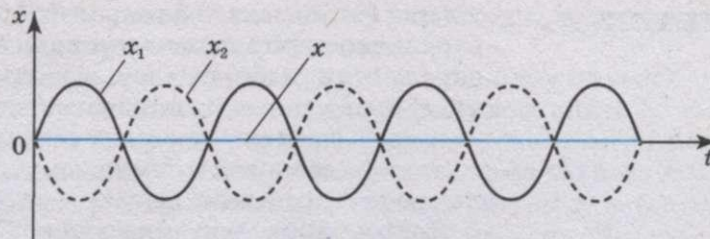
$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}.$$



Мал. 153

Якщо різниця ходу  $\Delta d = d_2 - d_1$  має проміжне значення між  $\lambda$  і  $\frac{\lambda}{2}$ , то й

амплітуда результуючого коливання набуває деякого проміжного значення між подвоєною амплітудою і нулем. Але найважливішим є те, що амплітуда коливань у будь-якій точці не змінюється з



Мал. 154

часом. На поверхні води виникає певний розподіл амплітуд коливань, який називають **інтерференційною картиною** (мал. 155).

Щоб отримати стійку інтерференційну картину, джерела хвиль повинні мати однакову частоту, і фази їх коливань повинні збігатися або розрізнятися на деяку сталу (незалежну від часу) величину. Різниця фаз коливань обох джерел має лишатися незмінною. Джерела, які відповідають цим умовам, називаються **когерентними**. Когерентними називають і утворені ними хвилі.

Тільки після додавання когерентних хвиль спостерігається стійка інтерференційна картина.

Якщо ж різниця фаз коливань джерел непостійна, то різниця фаз коливань, збуджуваних двома хвилями в будь-якій точці середовища, змінюватиметься. Тому й амплітуда результуючих коливань змінюється з часом. Внаслідок цього максимуми і мінімуми переміщуються в просторі, інтерференційна картина стає розмитою.

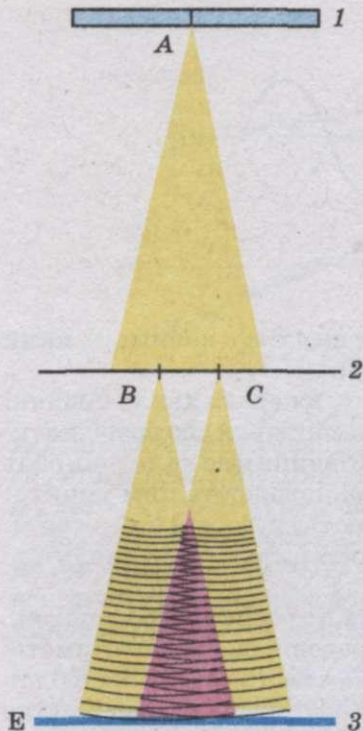
Інтерференція властива хвильовим процесам будь-якої природи. Можна, зокрема, спостерігати інтерференцію звуку. Велике значення інтерференції полягає в тому, що коли в процесі вивчення якогось явища буде виявлено **інтерференцію**, це означатиме, що маємо справу з хвильовим рухом.

Поширюючись у просторі, хвилі переносять енергію. *Що ж відбувається з цією енергією тоді, коли хвилі гасять одна одну?* Може вона перетворюється в інші форми і в мінімумах інтерференційної картини виділяється теплота? Нічого подібного. Мінімум у даній точці інтерференційної картини означає, що енергія сюди не надходить зовсім. **Внаслідок інтерференції енергія перерозподіляється у просторі.** Вона розподіляється нерівномірно на усіх ділянках середовища, а концентрується в максимумах і тому зовсім не надходить у мінімуми.

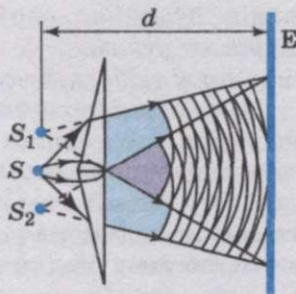
У 1802 р. англійський фізик **Т. Юнг** поставив дослід, в якому спостерігав інтерференцію світла. Дослід проходив в добре затемненій кімнаті. Схему дослідів наведено на мал. 156. Світло від Сонця падало на ширму 1, в якій було зроблено отвір *A* у вигляді щілини. Світло від освітленої щілини падало на ширму 2, в якій зробили дві вузькі щілини *B* і *C*. Оскільки щілини *B* і *C* були розташовані симетрично щілині *A*, то світло від щілини *A* до них доходило одночасно, отже, і щілини *B* і *C* були когерентними джерелами світла,



Мал. 155



Мал. 156



Мал. 157

від них світло падало на екран 3. При цьому на екрані спостерігалася наступна картина: краї екрану були слабо освітлені, а в середині екрану, де пучки світла від щілин накладалися один на одного, спостерігалася чергування декількох світлих (веселкових) і темних смуг, що свідчило про інтерференцію світла.

Таким чином, завдяки досліді Юнга можна говорити про те, що світло має хвильові властивості.

Проте, якщо у досліді Юнга замість двох щілин, що освітлюються одним і тим же джерелом світла, взяти два незалежні джерела світла (наприклад, дві лампи розжарення), то явище інтерференції не спостерігатиметься. Чому?

Ви вже знаєте, що інтерферують тільки когерентні хвилі. При інтерференції двох когерентних хвиль з однаковими амплітудами  $x_{\max}$  амплітуда результуючих коливань буде максимальною і дорівнюватиме  $2x_{\max}$  у точках, різниця фаз в яких становить нуль або різниця ходу до яких — парне число півхвиль. У тих точках, в яких різниця фаз або різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль, хвилі гасять одна одну і амплітуда результуючої хвилі дорівнює нулю.

Хвилі, що випромінюються звичайними джерелами, не є когерентні: у них різні початкові фази. Тому в кожній точці простору амплітуда результуючої хвилі хаотично і швидко змінюється. Оскільки нашому оку властива інерційність і воно реєструє лише середні значення амплітуд, то інтерференційна картина в цьому випадку не спостерігається.

Французький фізик **О. Френель** запропонував дотепний спосіб отримання двох когерентних систем світлових хвиль від одного джерела світла. Суть запропонованого Френелем способу полягає у розділенні однієї світлової хвилі на дві когерентні. При накладенні цих хвиль

Френель спостерігав їх інтерференцію.

В одному зі своїх дослідів Френель розділяв світлову хвилю від джерела  $S$  (мал. 157) за допомогою двох тонких скляних призм, склеєних основами. Таку призму називають **біпризмою Френеля**. Основу біпризми розташовують паралельно яскраво освітленій щілині. Як і в досліді Юнга, інтерференційна картина спостерігалася на екрані  $E$ .

Якщо щілину освітлювати монохроматичним (одноколірним) світлом, то всі світлі смуги інтерференційної картини будуть мати такий же колір. Якщо ж щілину освітлювати білим світлом, то інтерференційна картина буде різно-

колірною. А саме, у кожній світлій смузі спостерігатиметься плавний перехід кольорів від червоного до фіолетового.

Якщо ми отримаємо на дротяному каркасі плівку мильного розчину і направимо на нього світловий пучок від проекційного апарата, то побачимо на плівці кольорове забарвлення. Коли на шляху світлового пучка поставити червоний світлофільтр, то замість кольорових смуг ми побачимо одноколірні червоні смуги, розділені темними смугами. Картина нагадує інтерференційні смуги, отримані за допомогою дзеркал Френеля. Якщо червоний світлофільтр замінити зеленим, то світлі смуги будуть зеленими. Це наводить на думку, що спостережуване явище є результатом інтерференції світла.

*Які ж два світлові пучки інтерферують в цьому випадку?* Очевидно, що при падінні світла на плівку воно відбивається від передньої і задньої поверхонь цієї плівки. При цьому між пучками, відбитими від передньої і задньої поверхонь, виникає різниця ходу, яка залежить від товщини плівки і матеріалу, з яким плівка стикається.

Якщо різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль, то відбудеться підсилення відбитої хвилі, а якщо різниця ходу дорівнює половині хвилі або непарному числу півхвиль, то відбудеться послаблення відбитої хвилі.

Явище інтерференції світла знаходить широке застосування в сучасній техніці. Одним із таких застосувань є створення «просвітленої» оптики. Відполірована поверхня скла відбиває приблизно 4% світла, що падає на неї. Сучасні оптичні прилади складаються з великого числа деталей, виготовлених із скла. Проходячи через кожну з цих деталей, світло ослабляється на 4%. Загальні втрати світла в об'єктиві фотоапарата становлять приблизно 25%, в призматичному біноклі і мікроскопі — 50%.

Для зменшення світлових втрат в оптичних приладах всі скляні деталі, через які проходить світло, покривають плівкою товщиною в чверть світлової хвилі, показник заломлення якої менший за показник заломлення скла.

Явище інтерференції використовують для контролю якості оброблюваної поверхні.

## ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке інтерференція?
2. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини.
3. Які хвилі називаються когерентними?
4. Намалуйте схему досліду Юнга і поясніть його результати.
5. Намалуйте схему досліду Френеля і поясніть його хід і результати.
6. На дротяному каркасі отримана мильна плівка товщиною  $\frac{\lambda}{4}$ . Поясніть, як і яка інтерференційна картина утворюється в цьому випадку.
7. З якою метою лінзи оптичних приладів покривають спеціальною плівкою?
8. Використовуючи літературні джерела або Інтернет-ресурси, з'ясуйте, як контролюють якість поверхонь деталей за допомогою інтерферометрів.



### § 34. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

Ви ознайомилися з хвилями, які поширюються в однорідному середовищі. Тепер подивимося, що відбувається з хвилями, коли їх напрямляють на перешкоду, наприклад на тверду стінку.

Загальний принцип, який описує хвильові явища, вперше сформулював сучасник Ньютона голландський учений К. Гюйгенс. За принципом Гюйгенса кожна точка середовища, до якої дійшло збурення, сама стає джерелом вторинних хвиль. Для того щоб, знаючи положення хвильової поверхні в момент часу  $t$ , знайти її положення в наступний момент часу  $t + \Delta t$ , треба кожному точку хвильової поверхні розглядати як джерело вторинних хвиль.

Поверхня, дотична до всіх вторинних хвиль, є хвильовою поверхнею в наступний момент часу (мал. 158). Цей принцип однаково придатний для опису поширення будь-яких хвиль.

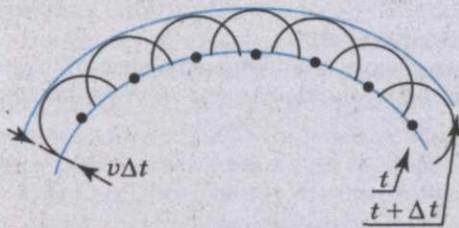
Огинати перешкоди можуть будь-які хвилі.

**Відхилення від прямолінійного поширення хвиль, огинання хвилями перешкод називається дифракцією (з лат. *diffractus* — розламаний).**

Дифракційні явища легко спостерігати тоді, коли розміри перешкоди порівнянні з довжиною хвилі. Проте довжина світлової хвилі дуже мала, тому огинання перешкод дуже незначне і спостерігати його можна лише за спеціальних умов.

Для спостереження дифракції світла необхідно брати або дуже маленькі перешкоди, або проводити спостереження на дуже великих відстанях, щоб були помітні невеликі відхилення світлових хвиль від прямолінійного поширення біля країв перешкод. Крім того, приміщення, в якому відбуваються досліди зі спостереження дифракції світла, повинне бути добре затемнене, оскільки дифракційні картини мають незначну освітленість.

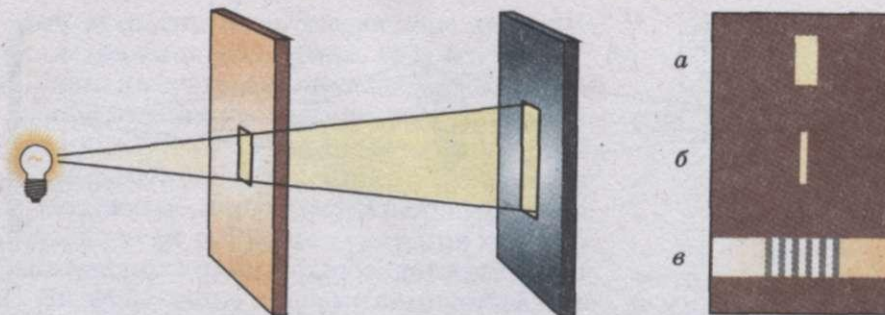
У добре затемненому приміщенні перед яскравим точковим джерелом світла, розміщеним у пристрої з отвором 10—12 мм, поставимо непрозору ширму з прямокутною щілиною, ширину якої можна змінювати (мал. 159, *a—e*). При ширині щілини 1—2 мм на екрані видно яскраву світлу смужку з чітко окресленими краями (мал. 159, *a*). Поступово зменшуючи ширину щілини, помічаємо, що чіткість країв яскравої смужки на екрані поступово порушується: смужка стає ширшою, її освітленість зменшується і зникає до країв. При подальшому зменшенні ширини щілини справа і зліва від освітленої смужки з'являються слабо помітні кольорові смуги (на мал. 159, *e* вони показані чорно-білими, а на мал. 160, *a* — кольоровими).



Мал. 158

Якщо перед джерелом світла поставити світлофільтр, то кольорові смуги стають одноколірними (мал. 160, *b, e*).

Дослід з дифракції світла на щілині можна продемонструвати інакше. У добре затемненому довгому приміщенні встановимо точкове джерело світла. Приблизно на відстані 15 м від джерела поставимо непрозору для світла ширму, в якій зробимо щілину



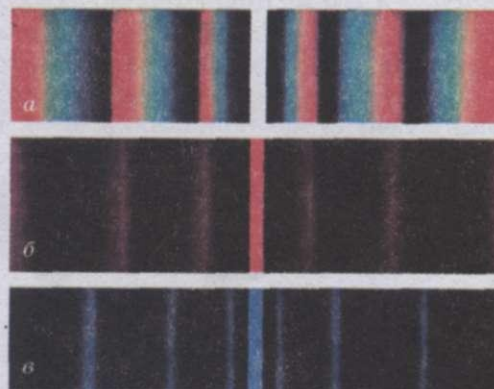
Мал. 159

завширшки 2—3 мм. Якщо позаду щілини на відстані 10—15 см поставити екран, то на ньому буде видно чітку освітлену смужку. Віддаляючи поступово екран від щілини, помічаємо, що чіткість контурів світлої смужки поступово послаблюється, її освітленість стає меншою і нерівномірною: в середині — більшою, а біля країв — меншою. На відстані 15—20 м від щілини на екрані справа і зліва від освітленої смужки, як і в попередньому досліді, з'являються слабо помітні кольорові смуги, які тим краще помітні, чим потужніше джерело світла. Якщо перед джерелом світла поставити світлофільтр, то кольорові смуги стають одноколірними.

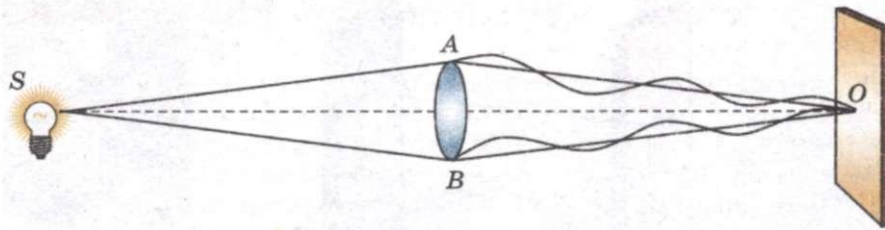
Нехай невеликий плоский диск освітлюється точковим джерелом світла (точковим називають джерело світла, у якого розміри поверхні, що світиться, значно менші за відстані від джерела до предмета і від предмета до екрану), розташованим на осі, проведеній перпендикулярно до центра диска (мал. 161). Як тільки світло від джерела дійде до країв диска, кожна точка, що знаходиться біля краю диска, за принципом Гюйгенса—Френеля стане самостійним центром коливань і випромінюватиме вторинні хвилі. Оскільки відстані від джерела світла до країв диска однакові, то всі вторинні хвилі, що поширюються від країв диска, матимуть однакові фази.

Та частина вторинних хвиль, яка поширюється симетрично падаючій хвилі (на мал. 161 вони позначені променями  $AO$  і  $BO$ ), приходить в точку  $O$  на екрані в одній фазі, і, інтерферуючи, хвилі підсилюють одна одну. У центрі тіні  $O$  повинна спостерігатися світла пляма. Вперше до цього висновку прийшов французький учений С. Пуассон, що рецензував працю Френеля про дифракцію світла, подану на здобуття премії Паризької академії наук. Недостатньо ретельно поставивши дослід, Пуассон не виявив світлої плями в центрі тіні і на цій підставі зробив висновок, що теорія Френеля помилкова.

Д. Араго, будучи також членом комітету з премій, вирішив перевірити



Мал. 160



Мал. 161

результати досліду Пуассона. Поставивши дослід більш ретельно, він виявив світлу дифракційну пляму, яка отримала ім'я Пуассона.

Дуже в оригінальній постановці дослід з дифракції світла на диску здійснив професор Московського університету **В. Аркад'єв**. Він виготовив зменшену плоску модель руки, що тримає тарілку. Освітивши модель світлом від точкового джерела світла, він сфотографував тінь від тарілки на екрані. Дослід проводився в добре затемненому коридорі у підвалі старої будівлі Московського університету.

У тому випадку, коли модель знаходилася на невеликій відстані від екрану, на екрані було видно чітку тінь (мал. 162). У міру збільшення відстані від моделі до екрана тінь все гірше передавала контури руки і тарілки. Нарешті, на деякій відстані в центрі тіні від тарілки з'явилася світла пляма (на малюнку наведені різні відстані з урахуванням масштабу моделі).

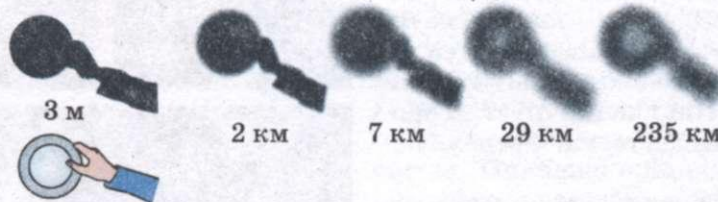
Дифракційна картина в досліді зі щілиною, описаному на початку параграфа, не має достатньої різкості. Це пов'язано з тим, що через вузьку щілину проходить мало світла. Дифракційна картина буде яскравою і добре помітною, якщо на пластинку нанести велике число паралельних однакових щілин, розташованих на рівних відстанях одна від одної. Така сукупність щілин отримала назву **дифракційної ґратки**.

Суму ширини  $a$  однієї щілини і ширини  $b$  однієї непрозорої смужки між щілинами називають сталою ґратки або її періодом (мал. 163).

Сталу ґратки зазвичай позначають літерою  $d$ :  $d = a + b$ .

На сьогодні для наукових цілей використовують дифракційні ґратки, в яких на 1 мм налічується 300, 1200, 1800 і навіть 2400 штрихів. Із збільшенням числа щілин на одиницю довжини ґратки покращуються чіткість і правильність дифракційних спектрів.

Надалі будемо розглядати основні питання елементарної теорії дифракційної ґратки.



Мал. 162

Нехай на ґратку падає плоска монохроматична хвиля, довжина якої  $\lambda$  (мал. 164).

Вторинні джерела в щілинах створюють світлові хвилі, які поширюються в усіх напрямках. Знайдемо умову, за якої хвилі, що виходять із щілин, підсилюють одна одну. З цією метою розглянемо хвилі, які поширюються в напрямі, що позначається кутом  $\varphi$ . Різниця ходу між хвилями від країв сусідніх щілин дорівнює довжині відрізка  $AC$ . Якщо на цьому відрізку вміщується ціле число довжин хвиль, то хвилі від усіх щілин складаються одна з одною і підсилюють одна одну. З трикутника  $ABC$  можна визначити катет  $AC$ :

$$AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

Максимуми спостерігатимуться під кутом  $\varphi$ , що визначається з такої умови:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Ці максимуми називаються **основними**.

Слід мати на увазі, що коли виконується умова  $d \sin \varphi = k\lambda$ , то підсилюються не тільки хвилі, що виходять із нижніх країв щілин, а й хвилі, що виходять із усіх інших точок щілин. Кожній точці в першій щілині відповідає точка в другій щілині на відстані  $d$ . Тому різниця ходу вторинних хвиль, що виходять із цих точок, дорівнює  $k\lambda$  і ці хвилі взаємно підсилюються.

За ґраткою стоїть збиральна лінза  $L$ , у фокальній площині якої встановлено екран  $E$ . Лінза фокусує хвилі, що напрямлені паралельно, в одній точці  $M$ , в якій хвилі додаються, підсилюючи одна одну. Кути  $\varphi$ , які відповідають умові  $d \sin \varphi = k\lambda$ , визначають місце максимумів на екрані  $E$ .

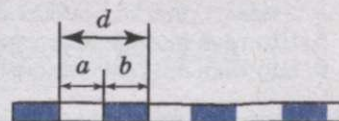
Оскільки місце максимумів (крім центрального, що відповідає  $k = 0$ ) залежить від довжини хвилі, то ґратка розкладає біле світло на спектр (мал. 160, *a*). Чим більше значення  $\lambda$ , тим далі від центрального максимуму (мал. 160, *b*, *e*) той чи інший максимум, що відповідає певній довжині хвилі. Кожному значенню  $k$  відповідає свій спектр.

За допомогою дифракційної ґратки можна дуже точно виміряти довжину хвилі. Якщо період ґратки відомий, то визначення довжини хвилі зводиться до вимірювання кута  $\varphi$ , який відповідає напрямку на максимум.

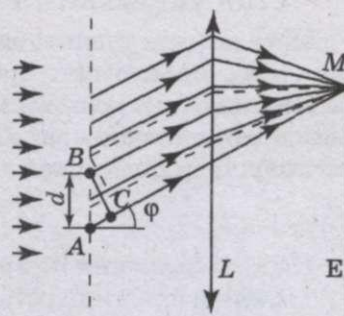
Наші вії з проміжками між ними — це приклад грубої дифракційної ґратки. Тому, якщо подивитися, примружившись, на яскраве джерело світла, можна виявити веселкові кольори. Біле світло розкладається внаслідок дифракції навколо вії.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке дифракція?
2. Які труднощі зустрічаються при постановці дифракційних дослідів і як можна їх подолати?
3. Як можна спостерігати дифракцію на щілині? Чому дифракційна картина в цьому досліді недостатньо чітка?



Мал. 163



Мал. 164

4. У чому полягав дослід професора В. Аркад'єва?
5. Що таке дифракційна ґратка і чим визначається її якість?
6. Що таке основні максимуми? Яка їх умова?

### Лабораторна робота №5

#### СПОСТЕРЕЖЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ТА ДИФРАКЦІЇ СВІТЛА.

**Мета роботи:** навчитися спостерігати інтерференційні смуги і дифракційні спектри у відбитому та прохідному світлі.

**Прилади і матеріали:** скляні пластинки — 2 шт., мильний розчин, дротяна рамка, компакт-диск, штангенциркуль, лампа з прямою ниткою розжарення, світлофільтри, лазерна указка, кольорові олівці.

#### Хід роботи

##### I. Спостереження інтерференції:

1. Скляні пластини ретельно протерти, скласти разом і стиснути пальцями.
2. Розглянути пластини у відбитому світлі на темному фоні (розташовувати їх потрібно так, щоб на поверхні скла не утворювались надто яскраві полоски від вікон або білих стін).
3. В окремих місцях стикання пластин спостерігати яскраві веселкові колоподібні або неправильної форми смужки. Зобразити на малюнку те, що ви побачили за допомогою кольорових олівців.
4. Змінити натиск і записати свої спостереження.
5. Спробувати побачити інтерференційну картину у прохідному світлі. Записати спостереження.
6. Опустити дротяну рамку в мильну воду, а потім, витягнувши її, утворити мильну плівку.
7. За допомогою кольорових олівців зробити у зошиті малюнок інтерференційної картини на мильній плівці.
8. Спостерігати інтерференційну картину, яку дає компакт-диск. Намалювати цю картину.

##### II. Спостереження дифракції:

1. Встановити між губками штангенциркуля щілину шириною 0,1 мм. Розташувати щілину вертикально, приставивши її впритул до ока. Крізь щілину дивитися на вертикально розташовану нитку лампи, що світиться, і спостерігати дифракційні спектри. Зробити малюнок.
2. Змінюючи ширину щілини від 0,1 до 0,3 мм, зазначити, як ця зміна впливає на дифракційні спектри.
3. Закрити нитку лампи світлофільтром. Який вигляд має в цьому випадку дифракційна картина?
4. Спостерігати дифракційний спектр у відбитому світлі за допомогою компакт-диска і лазерної указки, розташувавши його горизонтально на рівні очей. Зробити малюнок спектра.

**УВАГА! Не напрямляйте промінь світла указки прямо в очі!**

### § 35. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА. ПОПЕРЕЧНІСТЬ СВІТЛОВИХ ХВИЛЬ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ТЕОРІЯ СВІТЛА

Явища інтерференції і дифракції світла свідчать про хвильові властивості світла. Проте ці явища в рівній мірі властиві і поперечним і поздовжнім хвилям. Для встановлення природи світлових хвиль важливо з'ясувати, якими вони є — поздовжніми чи поперечними.

Засновники хвильової оптики Юнг і Френель довго вважали, що світлові хвилі поздовжні, як і звукові. У той час світлові хвилі розглядалися як пружні хвилі в ефірі, що заповнює простір і проникає в усі тіла. Поперечні хвилі можуть поширюватися лише в твердому тілі. *Але як можуть рухатися тіла в твердому ефірі, не зазнаючи опору?* Адже ефір не повинен чинити опір руху тіл. Інакше не здійснювався б закон інерції.

Проте поступово збиралось усе більше фактів, які не можна було пояснити, вважаючи світлові хвилі поздовжніми. Під тиском цих фактів Френель зрештою змушений був визнати, що світлові хвилі поперечні, хоч з погляду теорії механічного ефіру, як носія світлових хвиль, це здавалося дуже дивним.

Встановимо дві пластини, вирізані певним чином з кристала турмаліну, одну за одною і спроектуємо їх на екран (подібно до того, як проєктують діапозитиви). Повертаючи один з кристалів навколо осі, зазначимо, що освітленість екрана в місці перетину зображень кристалів мінятиметься і при певному положенні кристала, що повертається, екран стане зовсім темним (мал. 165).

Цей результат можна пояснити так. Світло, що випускається лампою розжарювання, не поляризоване. Пройшовши крізь перший кристал турмаліну, світло стає **плоскополяризованим**. Цей кристал турмаліну є поляризатором світла. Другий кристал турмаліну слугує аналізатором: він майже повністю пропускає поляризоване світло лише при певній орієнтації кристала щодо площини поляризації (мал. 165, а). Якщо ж аналізатор повернути на  $90^\circ$ , то вже поляризоване світло він практично не буде пропускати (мал. 165, б).

Окрім турмаліну, такі властивості має кварцева пластинка, вирізана певним чином з кристала.

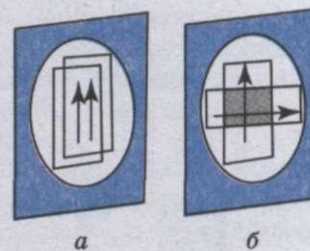
Прозорі плівки, що можуть слугувати поляризаторами і аналізаторами світла, отримали назву **поляроїдів**.

На сьогодні розроблені методи виробництва простих і зручних поляроїдів.

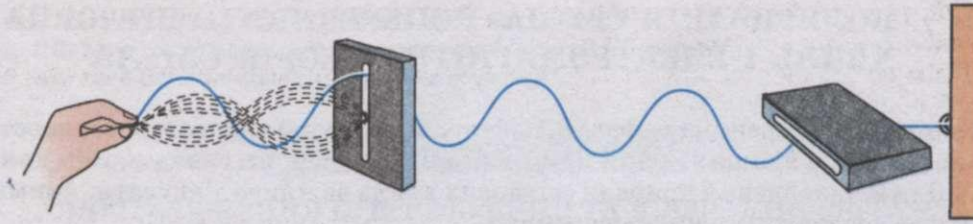
Площину, яка пропускає максимальне поляризоване світло, називають **площиною пропускання поляроїда**.

Поляризація властива тільки поперечним хвилям. Якщо хвилі поляризуються, то вони є поперечними. Поздовжні хвилі не поляризуються. **Явище поляризації світла свідчить про те, що світлові хвилі є поперечними.**

Неважко побудувати просту наочну механічну модель розглядуваного явища. Можна утворити поперечну хвилю в гумовому шнурі так, щоб коливання швидко змінювали свій напрям у просторі. Це є аналогом природної



Мал. 165



Мал. 166

світлової хвилі. Пропустимо тепер шнур крізь вузький дерев'яний ящик (мал. 166). З коливань різних напрямів ящик «виділить» коливання в одній певній площині. Тому з ящика виходить поляризована хвиля.

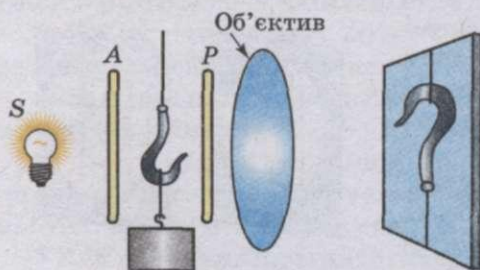
Якщо на її шляху поставити ще один такий самий ящик, але повернутий до першого на  $90^\circ$ , то коливання через нього не пройдуть. Хвиля повністю погаситься.

Поляризоване світло знаходить широке застосування в наукових дослідженнях і в техніці. У багатьох випадках доводиться плавно регулювати освітлення того або іншого об'єкта. Поставивши перед джерелом світла поляризатор і аналізатор, можна, поволив повертаючи аналізатор, плавно змінювати освітлення об'єкта від максимального до повної темноти.

Полярійди використовують для гасіння дзеркально відбитих відблисків, наприклад при фотографуванні картин, скляних і фарфорових виробів та ін. Світло відблисків частково поляризоване. Якщо помістити полярійд між джерелом світла і віддзеркалювальною поверхнею, то відблиски можна зовсім погасити.

У будівельній і машинобудівній техніці явище поляризації використовують для вивчення напруги, що виникає в окремих вузлах споруд і машин. Суть цього методу дослідження, названого фотопружним, полягає в наступному. З прозорого матеріалу (наприклад, з органічного скла) виготовляють точну копію тієї деталі, напругу в якій треба вивчити. Потім цю модель ставлять між аналізатором  $A$  і поляризатором  $P$ , освітлюють і проєктують на екран (мал. 167). Оскільки недеформована пластинка органічного скла оптично однорідна, то на екрані видно лише її контури. При деформації моделі оптична однорідність органічного скла порушиться і на екрані з'явиться барвиста картина напруги, що виникла в деталі.

Поляризацію використовують в декоративних цілях (наприклад, у при-



Мал. 167

строї вітрин, під час театральних постановок і тому подібне), у геології і ряді інших галузей науки і техніки.

Тепер розглянемо, яку ж природу має світло, якою теорією воно описується.

Дж. Максвелл суто теоретично показав можливість існування електромагнітних хвиль. Він довів, що швидкість поширення цих хвиль у вакуумі має дорівнювати швидкості

світла, яка на той час уже була відома. Виходячи з цього, Максвелл припустив, що **світло — це електромагнітна хвиля**.

Крім того, з теорії Максвелла безпосередньо випливає, що електромагнітні хвилі поперечні. На той час поперечність електромагнітних хвиль уже було доведено експериментально. Тому Максвелл цілком правильно вважав поперечність електромагнітних хвиль ще одним важливим доказом на користь електромагнітної теорії світла.

Після того як Герц експериментально одержав електромагнітні хвилі й виміряв їх швидкість, електромагнітна теорія світла дістала перше експериментальне підтвердження. Було доведено, що під час поширення електромагнітні хвилі виявляють такі самі властивості, що й світлові: відбивання, заломлення, інтерференцію, дифракцію, поляризацію тощо. У кінці XIX ст. було остаточно встановлено, що світлові хвилі збуджуються зарядженими частинками, які рухаються в атомах.

З визнанням електромагнітної теорії світла відпала потреба вводити гіпотетичне середовище — ефір, який доводилось вважати твердим тілом. Світлові хвилі — це не механічні хвилі в особливому всепроникному середовищі — ефірі, а електромагнітні хвилі. Електромагнітні ж процеси підлягають не законам механіки, а своїм власним законам.

В електромагнітній хвилі вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  перпендикулярні один до одного. У природному світлі напруженість електричного поля  $\vec{E}$  і магнітної індукції  $\vec{B}$  коливається в усіх напрямках, перпендикулярних до напрямку поширення хвилі. Якщо світло поляризоване, то вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  коливаються не в усіх напрямках, а лише в двох певних площинах.

## ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як можна виявити поляризацію світла?
2. Про що свідчить явище поляризації світла?
3. Назвіть основні застосування явища поляризації світла в науці і техніці.
4. Якою теорією описується світло? Чому саме нею?



## Це цікаво знати

### **Відкриття явища поляризації світла**

Встановлення закономірного зв'язку між зовнішньою формою і оптичними властивостями кристалів стало можливим після того, як французький фізик **Е. Л. Малюс** (1775—1812) відкрив у 1810 р. явище **поляризації світла**. Хоча в літературі можна знайти дані, що першовідкривачем взаємозв'язку між кристалічною формою і явищем подвійного променезаломлення є **Ш. Ф. Цистерной дю Фай** (1698—1739). Відкриття поляризації світла відбулося наступним чином: одного разу вчений розглядав крізь кристал ісландського шпату вікна Люксембурзького палацу, освітлені сонцем, що заходило. Обертаючи кристал, Малюс звернув увагу на періодичні затемнення інтенсивності відбитих променів. Спостерігаючи відбиття світла від скла і води, вчений встановив, що відбиті промені частково поляризовані.

В історії кристалооптики Малюс відомий як автор «Теорії подвійного променезаломлення у кристалічних тілах», яка відзначена в 1810 р. академічною премією. Малюс сконструював перший поляризаційний прилад, за допомогою якого підтвердив твердження **Гаяюї** про те, що кристали у формі кубів і октаєдрів не мають властивостей подвійного променезаломлення. Малюса слід вважати автором відкриття оптич-





Мал. 168

но двовісних кристалів. **Ж. Б. Біо** (1774—1862) вперше чітко показав різницю між оптично одновісними і двовісними кристалами і, крім того, поділив і ті, й інші, на оптично позитивні та оптично негативні. До першої групи він відніс кварц, а до другої — кальцит.

Пізніше Малюс за допомогою приладу, що складається зі штатива і дзеркала, зображеного на мал. 168, показав, що при звичайному заломленні, наприклад, у склі, заломлений промінь також є поляризований і притому перпендикулярно до відбитого променя. Частина променя світла  $S$ , що падає на скляну пластинку, частково поглинається склом, а частково відбивається від нього. Ці два промені, на які розкладається падаючий промінь, поляризовані й

перпендикулярні один до одного.

Важливі досягнення в галузі експериментальної кристалооптики, які знаменували новий етап в її розвитку, зв'язані з іменем шотландського фізика **Д. Брюстера** (1781—1868). Перше дослідження Брюстера було присвячено закономірностям співвідношення між оптичними та геометричними властивостями кристалів («Про закон поляризації та подвійне променезаломлення у правильно кристалізованих тілах» (1818)). Базуючись на своїх теоретичних поглядах, Брюстер пояснив причину подвійного променезаломлення в кристалах тим, що «на незвичайний промінь впливають сили, що виходять із однієї чи декількох осей». Брюстер вперше відкрив анізотропію поглинання світла у забарвлених кристалах. Англійському фізику **Дж. Гершелю** (1792—1871) вдалося виявити взаємозв'язок між обертанням площини поляризації та зовнішньою формою кристала (вперше здогадався про це ще Гаюї).

Описані вище відкриття в галузі кристалооптики носили в основному емпіричний характер. Докорінні зміни у розвиток кристалооптики внесли англієць **Т. Юнг** (1773—1829) та француз **О. Ж. Френель** (1788—1827). В. І. Вернадський справедливо зазначив, що «заслуги їх з точки зору розробки принципів хвильової теорії світла можуть бути порівняні, але в оптиці кристалів досягнення Френеля, без сумніву, має найбільше значення». Причину подвійного променезаломлення світла у кристалах Френель зв'язував з неоднаковою пружністю світлового ефіру в різних напрямках кристала. Вчений вважав, що швидкість поширення променя в кристалі можна записати за допомогою формули

$$v = \sqrt{\frac{Q}{r}}, \text{ де } v \text{ — швидкість променя; } Q \text{ — пружність світлового ефіру; } r \text{ — густина}$$

світлового ефіру.

Френель вважав, що величина  $\sqrt{Q}$  у кристалі змінюється від напрямку за законом еліпсоїда. Цей уявний еліпсоїд і є так званий еліпсоїд Френеля. Розрізняють три види еліпсоїдів Френеля: тривісний (еліпсоїд загального вигляду), який характеризує оптичні двовісні кристали, тобто кристали нижчих категорій; еліпсоїд обертання, який властивий оптично одновісним кристалам середніх сингоній; сфера, що притаманна оптично ізотропним кристалам вищих категорій, тобто кристалам кубічної сингонії. Еліпсоїд Френеля дає не лише поняття про оптичні властивості кристала, а й змогу побудувати відповідні поверхні світлових хвиль. Теорію Френеля продовжував розвивати німецький кристалограф і фізик **Ф. Нейман** (1798—1895).

Одночасно із дослідженнями оптичних властивостей кристалів відбувалося вдосконалення поляризаційної апаратури (Араго, Нерберг, Амічі), **У. Тальбот** (1800—1877) створює перший поляризаційний мікроскоп.

## § 36. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

### З ІСТОРІЇ

Явище розкладання білого світла на спектр за допомогою призми було відоме досить давно, але пояснити це явище зміг лише **І. Ньютон**. Вчених, які займалися оптикою, цікавила природа світла. Ньютон же, вивчаючи явище розкладання білого світла на спектр, приходив до висновку, що біле світло є складним, тобто складається із суми простих кольорових променів.

Ньютон працював із простою установкою. На мал. 169 показано дослід Ньютона із встановлення явища дисперсії світла (1754). У вікні затемненої кімнати було пророблено маленький отвір, через який проходив вузький пучок сонячного світла. На шляху сонячного світла ставили призму, а за призмою — екран. На екрані спостерігали спектр, тобто видовжене зображення круглого отвору, нібито складене із багатьох кольорових кружечків. При цьому найбільше відхилення мали фіолетові промені — один кінець спектра — і найменше відхилення — червоні — другий кінець спектра.

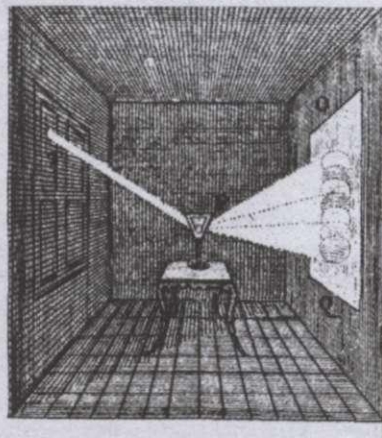
Але цей дослід ще не був переконливим доведенням складності білого світла й існування простих променів. Він був добре відомий, і давав змогу зробити висновок, що, проходячи через призму, біле світло не розкладається на прості промені, а змінюється, як вважало багато дослідників до Ньютона.

Для того щоб довести висновок про те, що біле світло складається із простих кольорових променів і розкладається на них при проходженні через призму, Ньютон провів інший дослід (мал. 170). В екрані, на якому спостерігався спектр, також робили маленький отвір, через який пропускали вже не біле світло, а світло, що мало певну окраску, говорячи сучасною мовою, монохроматичний пучок світла. На шляху цього пучка Ньютон ставив нову призму, а за нею новий екран. *Що спостерігалось на цьому новому екрані?*

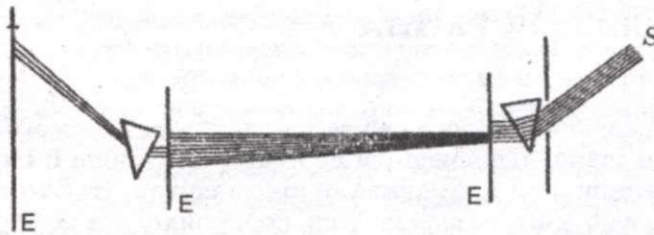
Дослід показав, що цей пучок світла відхилявся призмою як єдине ціле, під визначеним кутом. Повертаючи першу призму, Ньютон пропускав через отвір екрана кольорові промені різних ділянок спектра. У всіх випадках вони не розкладалися другою призмою, а лише відхилялися на визначений кут, різний для променів різного кольору.

Отже, Ньютон дійшов висновку, що біле світло розкладається на кольорові промені, які є простими, і не розкладаються призмою. Для кожного кольору показник заломлення має своє визначене значення.

Таким чином, прості промені є незмінними. Вони являють собою, можна сказати, атоми світла, подібно до атомів речовини. Цей висновок узгоджувався із корпускулярною теорією світла. Дійсно, незмінні атоми світла, прості промені, є потоком і однорідних частинок, які, потрапляючи у



Мал. 169



Мал. 170

наше око, викликають відчуття певного кольору. Суміш із різнорідних світлових частинок є білим світлом. При проходженні через призму біле світло розкладається. Призма сортує світлові частинки, відхиляючи їх на різний кут відповідно до їх колірності.

Із точки зору хвильової теорії на той час було складно пояснити відкриття Ньютона, тому що теорія поширення хвиль ще не була розроблена. Розуміння того, що колір визначається періодом світлової хвилі, прийшло набагато пізніше.

Якщо уважно придивитися до проходження світла через трикутну призму, то можна побачити, що розкладання білого світла починається відразу ж, як тільки світло переходить з повітря в скло (мал. 171).

Середовища, в яких спостерігається явище дисперсії, називають *диспергуючими*.

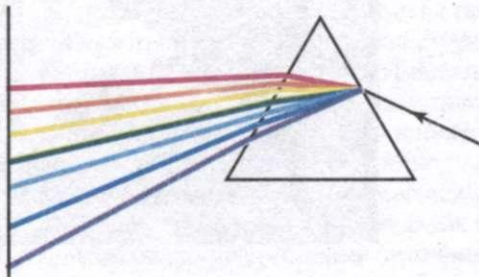
Якщо на шляху будь-якого кольорового пучка, що виходить з призми, поставити ще одну призму, то він пройде через призму без зміни, не розкладаючись (мал. 172).

Про що свідчить явище дисперсії? Перш за все, явище дисперсії свідчить про те, що біле світло є складним. Проте це не нове: про це свідчить і явище дифракції. Більш того, при вивченні явища дифракції було встановлено, що довжини хвиль і їх частоти різні для кожного кольору.

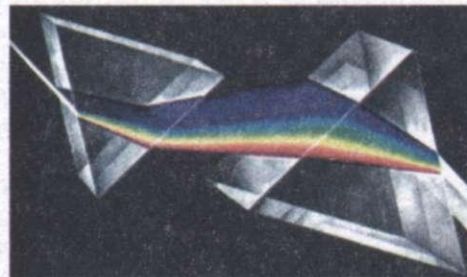
Явище дисперсії свідчить також про те, що швидкості хвиль, з яких складається біле світло, різні. Дійсно, безпосередньо з досліду випливає, що для показників заломлення справедлива наступна нерівність:

$$n_{\text{ч}} < n_{\text{о}} < n_{\text{ж}} < n_{\text{з}} < n_{\text{б}} < n_{\text{с}} < n_{\text{ф}}$$

Але показник заломлення дорівнює відношенню швидкості світла в повітрі до швидкості світла у склі. Тому показники заломлення кольорових променів можна записати через їх швидкості:



Мал. 171



Мал. 172

$$n_{\text{ч}} = \frac{c}{v_{\text{к}}}; \dots n_{\text{ф}} = \frac{c}{v_{\text{ф}}}.$$

Підставивши знайдені значення показників заломлення в попередню нерівність, отримаємо

$$v_{\text{ч}} > v_{\text{о}} > \dots > v_{\text{ф}}.$$

Таким чином, з явища дисперсії випливає, що хвилі, які входять до складу білого світла, в речовині поширюються з різними швидкостями: з найбільшою швидкістю поширюються хвилі, які ми сприймаємо як червоне світло, і з найменшою — хвилі, що сприймаються нами як фіолетове світло.

Проте наше сприйняття кольору залежить від довжини хвилі, а отже, і від частоти коливань. Таким чином, швидкість поширення світлових хвиль залежить від їх частоти.

Об'єднуючи сказане про дисперсію світла, можна дати наступне визначення:

**Дисперсією хвиль** називають залежність їх швидкості від частоти.

Залежність фазової швидкості хвиль від їх частоти виявляється в тому, що показник заломлення хвиль також залежить від частоти, а це, у свою чергу, свідчить про те, що на межі з диспергуючим середовищем біле світло розкладається на його складові хвилі.

*А чи залежить швидкість світла у вакуумі від частоти коливань?*

Уявімо собі, що у вакуумі на дуже великій від нас відстані потужне джерело світла періодично закривається непрозорою ширмою, а потім знову відкривається. Якщо всі світлові хвилі незалежно від частоти коливань поширюються у вакуумі з однаковою швидкістю, то ми повинні побачити, що світло, яке випромінюється далеким джерелом, мигтить, але його колір не змінюється. Якщо ж світлові хвилі різної частоти у вакуумі поширюються з різними швидкостями, то колір джерела повинен змінюватися.

Розглянемо це питання докладніше. Припустимо, що у вакуумі з найбільшою швидкістю поширюються хвилі червоного світла, а з найменшою — хвилі фіолетового світла. У такому разі, після того, як ширма відкриє джерело світла, до нас перш за все дійдуть хвилі червоного світла і ми побачимо джерело червоним. Потім, у міру того як наших очей досягатимуть хвилі інших частот, забарвлення джерела змінюватиметься і, нарешті, стане таким, яким воно є насправді. Після того, як ширма закриє джерело світла, до нас перш за все перестануть доходити хвилі червоного світла, а потім фіолетового. Отже, колір джерела змінюватиметься від дійсного до фіолетового, після чого джерела не буде видно.

При невеликій різниці у швидкостях поширення хвиль описаний ефект, якщо він відбувається, може бути помітний тільки при дуже великих відстанях між джерелом і спостерігачем. Тому в лабораторних умовах здійснити описаний вище дослід не можна, оскільки всі земні відстані для нього малі. Проте можна скористатися астрономічними спостереженнями за подвійними зірками. Подвійна зірка — це дві зірки, що обертаються навколо їх загального центра мас. Кожна з них періодично затуляє від спостерігача світло іншої зірки. Проте при спостереженні через телескоп зміни кольору цих зірок не спостерігають. Якби швидкість світла у вакуумі залежала від частоти, то після виходу зірки із тіні повинен був би змінюватися її колір.

Отже, у вакуумі швидкість світлових хвиль не залежить від частоти коливань.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як можна спостерігати явище дисперсії світла?
2. Що таке дисперсія?
3. Про що свідчить дослід Ньютона з трикутною призмою?
4. Яке середовище називають диспергуючим?
5. Чи спостерігається дисперсія світла при проходженні через вакуум?

### Задачі та справи

#### Розв'язуємо разом

Для визначення довжини світлової хвилі використовували дифракційну ґратку, період якої 0,01 мм. Перше дифракційне зображення на екрані отримали на відстані 11,8 см від центрального зображення і на відстані 2 м від ґратки. Визначте довжину світлової хвилі.

#### Розв'язання.

Умову максимуму дифракційної картини від ґратки записуємо так:

$$d \sin \varphi = k \lambda,$$

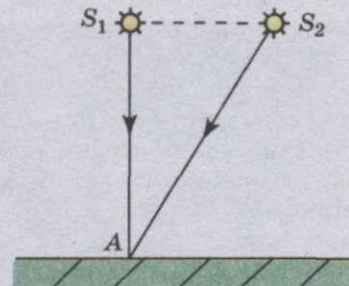
де  $d$  — стала (період) ґратки;  $\sin \varphi = \frac{h}{l}$ ;  $k$  — порядок спектра (у нашому випадку  $k = 1$ ).

$$\text{Тепер } d \frac{h}{l} = \lambda.$$

Підставивши значення відомих величин, отримаємо  $\lambda = 5,9 \cdot 10^{-7}$  м.

#### Рівень А

301. Чому поверхня мильної бульбашки забарвлена кольорами веселки? Відповідь проілюструйте малюнком.
302. Поясніть причини виникнення кольорових смуг під час розглядання тонкого шару бензину на поверхні води.
303. Чому тільки досить вузький світловий пучок після проходження крізь призму дає спектр, а в широкого пучка забарвленими виявляються лише краї?
304. Два когерентних пучки світла, які мають довжину хвилі 0,4 мкм, перетинаються. Що можна спостерігати в точці їх перетину, для якої різниця ходу хвиль дорівнює 0,5 мм, максимум чи мінімум коливань?
305. Визначте кут відхилення зеленого світла з довжиною хвилі 550 нм у спектрі другого порядку, отриманому за допомогою дифракційної ґратки з періодом 20 мкм.
306. Кут відхилення променів фіолетового світла з довжиною світлової хвилі 435 нм у дифракційному спектрі першого порядку дорівнює  $2^\circ 30'$ . Який період дифракційної ґратки?
307. Два когерентних джерела  $S_1$  і  $S_2$ , що мають довжину хвилі 0,5 мкм, розташовані на відстані 2 мм одне від одного (мал. 173), а екран — на



Мал. 173

- відстані 2 м від  $S_1$ . Що можна спостерігати в точці А екрана — світло чи темряву?
308. Білий промінь світла падає на бічну грань призми під кутом  $0^\circ$ . Чи матимемо на екрані спектр?
309. Щоб дістати на екрані спектр випромінювання лампи, її розжарювали поступово за допомогою реостата. Які зміни при цьому відбувалися на екрані?
310. Знаючи швидкість світла у вакуумі, обчисліть швидкість світла у воді та склі.
311. В Антарктиді кількість тепла, що його приносить сонячне проміння на одиницю поверхні, така сама, як і в Криму. Чому ж в Антарктиді так холодно (температура повітря досягає  $-88^\circ\text{C}$ )?
312. Навіщо металізують (покривають міцним шаром фольги) спецодег сталеварів, мартенівців, вальцювальників та ін.?

**Рівень В**

313. Скільки довжин хвиль монохроматичного випромінювання з частотою 400 ТГц поміщається на відрізьку 1 м?
314. З якою швидкістю поширюється світло у воді, якщо при частоті 600 ТГц довжина хвилі дорівнює 0,51 мкм?
315. Яку приблизно товщину має плівка мильної бульбашки в місцях, де вона здається блакитною?
316. Екран розміщено на відстані 1 м від дифракційної ґратки. При її освітленні червоним світлом із довжиною хвилі 650 нм відстань між двома максимумами першого порядку на екрані дорівнює 26 см. Визначте період дифракційної ґратки.
317. За допомогою дифракційної ґратки з періодом 5 мкм дифракційний максимум першого порядку отримано на відстані 60 мм від центрального. Відстань від ґратки до екрана 50 см. Світло падає на ґратку паралельно. Яка довжина світлової хвилі?
318. Під час туману навколо ліхтарів можна спостерігати кольорові кільця. Чим спричинене це явище? Поясніть його.
319. Дно ставка не можна бачити через відбите світло. Як можна усунути відбите світло і побачити дно?
320. Чи можна зробити так, щоб краплі ртуті не блищали, коли на них дивитися крізь поляроїд?
321. Є призми з різних матеріалів, але з однаковими заломними кутами. Чим розрізнятимуться спектри, що їх дістали за допомогою цих призм?
322. Чи змінюється швидкість, довжина хвилі, частота коливань, коли світло переходить із повітря у скло? Як?
323. На дифракційну ґратку завдовжки 10 мм, що має 2000 штрихів, нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 450 нм. Який кут між напрямками спостереження максимумів першого і другого порядків?
324. Яку ширину має весь дифракційний спектр першого порядку, отриманий на екрані, віддаленому на 1,5 м від дифракційної ґратки з періодом 10 мкм? Довжини світлових хвиль лежать у межах від 380 до 760 нм.
325. Поясніть відмінність між дифракційним та дисперсійним спектрами.
326. Чому в ясний сонячний день небо забарвлене у блакитний колір, а вранці на сході і ввечері на заході колір неба може мати оранжево-червоні відтінки?
327. Чому ртутні лампи ультрафіолетового випромінювання виготовляють не зі скла, а з кварцу? Чому під час горіння кварцевих ламп відчувається запах озону?

### § 37. РОЗВИТОК КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ. ГІПОТЕЗА ПЛАНКА

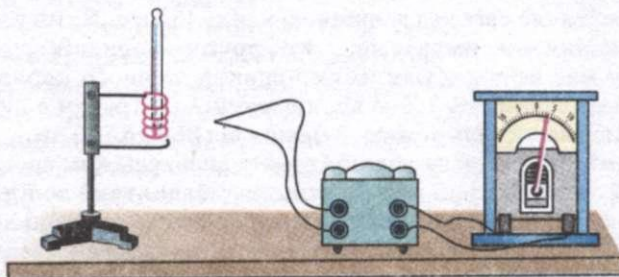
Явища, що відбуваються в макросвіті, вивчає класична фізика. У тих випадках, коли макроскопічні явища відбуваються з невеликими (порівняно зі швидкістю поширення світла) швидкостями, їх пояснює класична механіка Ньютона. Явища, що відбуваються зі швидкостями, які наближаються до швидкості світла, вивчає теорія відносності. Квантова фізика, знайомство з якою ви починаєте, вивчає явища, що відбуваються в мікросвіті, які класична фізика пояснити не може.

Виникнення квантової фізики пов'язане з ім'ям німецького фізика **М. Планка**. Він досліджував випромінювання нагрітого тіла. Найбільш важливі результати своїх дослідів Планк опублікував наприкінці 1900 р. Таким чином, виникнення квантової фізики датується XIX і XX ст.

*Розглянемо дослід.* Під'єднаємо металеву спіраль до джерела регульованої напруги. Для вимірювання температури спіралі вставимо в неї термометр. Встановивши низьку напругу, замкнемо коло. Спіраль трохи нагріється, але світитися не буде. Якщо недалеко від спіралі поставити термопару, приєднану до чутливого гальванометра (мал. 174), то прилад зафіксує наявність теплового випромінювання, що не сприймається нашим оком. Збільшуючи напругу, що подається на спіраль, ми помітимо, що з підвищенням температури теплове випромінювання спіралі стає значнішим. При температурі близько  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  спіраль почне випромінювати червоне («вишневе») світло. При подальшому підвищенні температури спіралі інтенсивність випромінювання буде зростати, а колір випромінюваного світла стане спочатку оранжевим, потім жовтим і нарешті звичайним білим.

Якщо в описаному досліді спостерігати за світлом, що випромінює спіраль, за допомогою спектроскопа, то спочатку побачимо лише червоний край спектра. Але потім послідовно почнуть з'являтися оранжева, жовта, зелена, блакитна, синя і нарешті фіолетова області. Таким чином, з підвищенням температури підвищується інтенсивність теплового випромінювання, а в ньому спостерігаються випромінювання все більш високих частот.

Тіло, нагріте до температури в декілька тисяч градусів, має суцільний спектр випромінювання, що займає область від невидимого інфрачервоного випромінювання до невидимого ультрафіолетового.



Мал. 174

На мал. 175 наведено експериментально одержані графіки розподілу енергії  $E$  в спектрі випромінювання вугільної спіралі при різних температурах. На осі ординат відкладені значення енергії, що відповідають даній довжині хвилі, а на осі абсцис — довжини хвиль.

Визначений експериментально розподіл енергії випромінювання в спектрі потребував теоретичного пояснення. Зрозуміло, оскільки всі тіла складаються з атомів, то теплове, видиме і ультрафіолетове випромінювання обумовлюються потоком атомів. Але як?

У класичній електродинаміці Максвелла відповідно до дослідів вважається, що заряд, який коливається, випромінює електромагнітні хвилі і втрачає енергію безперервно. Багаторазові намагання фізиків пояснити механізм випромінювання з позицій класичної фізики не мали успіху. Зазнав поразки і Планк. Аналізуючи причини своєї невдачі, він дійшов висновку, що закони випромінювання електромагнітних хвиль класичної фізики, засновані на теорії електромагнетизму Максвелла, непридатні до атомів.

Планк висловив припущення, що атоми випромінюють не безперервно, а переривчасто, порціями — квантами (з лат. *quantum* — порція), енергія яких пропорційна частоті коливань:

$$E = h\nu,$$

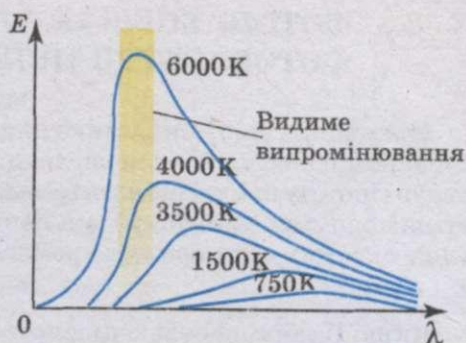
де  $E$  — енергія кванта;  $h$  — стала величина, що отримала згодом назву сталої Планка. Стала Планка в сучасній фізиці відіграє виключно важливу роль; її значення визначене з високою точністю:

$$h = 6,626\,176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Гіпотеза Планка про переривчастий характер випромінювання нагрітого тіла блискуче пояснила експериментально знайдену залежність випромінювання від довжини хвилі (частоти). Проте вона суперечить класичній фізиці. Сучасники Планка, та спочатку і сам Планк, сприйняли гіпотезу про переривчастий характер випромінювання як цікавий прийом, що дає змогу пояснити тільки закономірності теплового випромінювання. Проте значення гіпотези Планка виявилось незрівнянно великим: воно знаменувало народження нової фізики — фізики мікросвіту.

## 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

- Уважно вивчіть графік випромінювання нагрітого тіла (мал. 175) і дайте відповідь на такі питання:
  - як залежить спектральна густина енергії теплового випромінювання  $\left(\frac{E}{\lambda}\right)$  від температури?
  - як залежить положення максимуму кривої розподілу енергії за довжинами хвиль від температури?
- У чому полягала гіпотеза Планка? Яка головна відмінність квантової теорії від класичної?
- Які явища підтверджують гіпотезу квантів?



Мал. 175



### § 38. ФОТОН. ЕНЕРГІЯ, МАСА, ІМПУЛЬС ФОТОНА. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ

Важливість гіпотези Планка для подальшого розвитку фізики в 1900 р. не була очевидною навіть для видатних учених. Однак у 1905 р. А. Ейнштейн висунув гіпотезу про те, що електромагнітне випромінювання не тільки випускається порціями (квантами), а й поширюється і поглинається речовиною у вигляді окремих частинок електромагнітного поля — **фотонів**, які мають енергію

$$E = h\nu.$$

Якщо Планк, висувачи гіпотезу квантів, вважав, що квант необхідний лише як допоміжне поняття, то Ейнштейн пішов далі: він побачив у кванті реально існуючу частинку електромагнітного поля — **фотон**.

Розглянемо основні властивості фотона. Фотон, як частинка електромагнітного поля, рухається зі швидкістю світла. Він існує тільки в русі. Зупинити фотон неможливо, він або рухається зі швидкістю світла, або не існує. Якщо фотон має енергію  $E = h\nu$ , то за законом пропорційності маси і енергії він повинен мати і масу:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

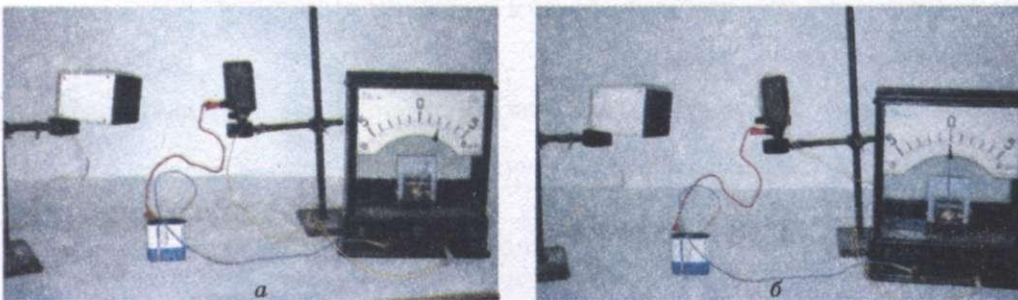
Оскільки фотон існує тільки в русі зі швидкістю світла, то у нього немає маси спокою. У цьому полягає принципова відмінність фотона від звичайних частинок речовини. Якщо фотон рухається, то він повинен мати також імпульс:

$$p = mc.$$

Наявність у фотона імпульсу підтверджується існуванням світлового тиску.

Ви вже знаєте, що під дією світла відбувається емісія електронів з речовини. Це явище отримало назву **фотоелектронної емісії** або **фотоелектричного ефекту**. Фотоелектричний ефект було відкрито у 1887 р. Г. Герцем.

Дізнавшись про відкриття Герца, професор Московського університету О. Г. Столетов у 1888 р. почав вивчати це явище. На мал. 176 зображено установку, яка демонструє, як Столетов досліджував явище фотоелектричного ефекту. Перед ретельно очищеною цинковою пластинкою розміщували металеву сітку, через яку цинкову пластинку освітлювали світлом від електричної дуги. Якщо цинкову пластинку приєднували до негативного полюса джерела,



Мал. 176

то по колу проходив струм (мал. 176, а), який вимірювався гальванометром. Якщо ж цинкову пластинку приєднували до позитивного полюса джерела, то струму в колі не було (мал. 176, б). Отже, при фотоелектрі електрони покидають катод.

Струм, що виникає в колі, згодом отримав назву **фотоструму**, а цинкова (або інша) пластинка, приєднана до негативного полюса джерела, — **фотокатод**. О. Г. Столетов виявив, що фотон практично виникає одночасно з освітленням фотокатода.

Досліджуючи залежність фотоструму від прикладеної напруги, О. Г. Столетов установив, що фотострум не підкоряється закону Ома. На мал. 177 зображено графік залежності фотоструму від напруги між електродами при незмінному освітленні пластинки. З графіка видно, що фотострум спочатку зростає, а потім, при порівняно невеликій напрузі, перестає збільшуватися. Максимальне значення фотоструму набуло назви — **фотострум насичення**. Столетов установив, що **фотострум насичення (а отже, і число вирваних світлом фотоелектронів) прямо пропорційний освітленості цинкової пластинки (закон Столетова)**.

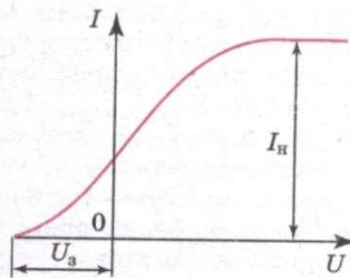
О. Г. Столетов виявив, що фотоелектр спостерігається тільки тоді, коли цинк опромінюється світлом, довжина хвилі якого менша за деяку граничну довжину хвилі. Ця мінімальна довжина хвилі пізніше отримала назву — **червона межа фотоелектру**.

Фотострум існує і тоді, коли в колі немає джерела (мал. 178). Це можна пояснити тим, що електрони покидають катод зі швидкістю, відмінною від нуля, частина з них досягає анода і за відсутності напруги між електродами. Для того, щоб фотострум дорівнював нулю, потрібно прикласти деяку затримуючу негативну напругу —  $U_s$  (мал. 177). Вона повинна бути такою, щоб електрони, які мають при вильоті з катода навіть найбільшу швидкість  $v_{\max}$ , не могли подолати затримуюче електричне поле і долетіти до анода. Між максимальною початковою швидкістю електронів, що вилітають під дією світла з катода, і затримуючою напругою існує таке співвідношення:

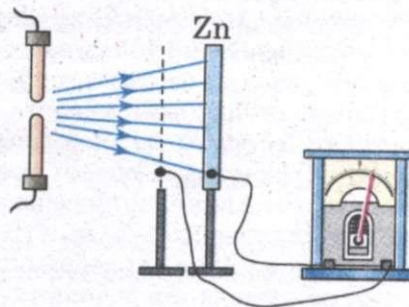
$$\frac{m_e v_{\max}^2}{2} = eU_s,$$

де  $m_e$  — маса електрона. Таким чином, вимірявши затримуючу напругу  $U_s$ , можна визначити максимальне значення швидкості фотоелектронів:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_s}{m_e}}.$$



Мал. 177



Мал. 178

Дослідження показали, що максимальна швидкість фотоелектронів залежить тільки від частоти світла, яким освітлюється фотокатод.

Таким чином, експериментально були встановлені такі закономірності фотоелектру.

1. Для кожної речовини існує така гранична довжина хвилі, при якій фотоелектр ефект ще можливий, але при опроміненні хвилями більшої довжини фотоелектр ефект неможливий (червона межа фотоелектру).

2. Число фотоелектронів, що вириваються з фотокатода за одиницю часу, пропорційне освітленості фотокатода.

3. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою випромінювання і не залежить від освітленості фотокатода.

4. Фотоелектр ефект практично безінерційний.

Класична фізика не могла пояснити перерахованих вище закономірностей фотоелектру. Це пояснила квантова фізика.

А. Ейнштейн у 1905 р. довів, що всі закономірності фотоелектру легко пояснюються, якщо припустити, що світло поглинається речовиною такими ж порціями (квантами), якими воно випромінюється і поширюється. При поглинанні світла металом фотон передає цілком свою енергію одному електрону. Частина цієї енергії витрачається на те, щоб електрон міг покинути тіло, тобто на виконання роботи виходу  $A$ . Якщо електрон звільняється світлом не біля самої поверхні, а на деякій глибині, то частина енергії, яка дорівнює  $E'$ , може бути втрачена ним унаслідок випадкових зіткнень у речовині і піде на нагрівання речовини. Залишок енергії утворює кінетичну енергію  $E_k$  електрона, що покинув речовину. Енергія вильоту електрона буде максимальною, якщо електрон вибивається світлом з поверхні металу. Тоді  $E' = 0$  і

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}.$$

Це рівняння Ейнштейна для фотоелектру, яке дає змогу пояснити всі закони фотоелектру.

З нього випливає, що максимальна кінетична енергія фотоелектрона, а отже, і його максимальна початкова швидкість залежать від частоти світла  $\nu$  і роботи виходу  $A_{\text{вих}}$ , але не залежать від інтенсивності світла:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{m_e}(h\nu - A_{\text{вих}})}.$$

З рівняння Ейнштейна також випливає, що фотоелектр можливий лише при енергії фотона, яка більша за роботу виходу. Енергії фотона повинно щонайменше вистачити на те, щоб відірвати електрон від металевої пластини:

$$h\nu \geq A_{\text{вих}}.$$

Позначивши найменшу частоту світла  $\nu_0$ , за якої можливий фотоелектр ефект (червона межа фотоелектру), маємо

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}.$$

Червона межа фотоелектру залежить тільки від роботи виходу електрона, тобто від хімічної природи металу.

## 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які властивості має фотон? Чи можна фотон зупинити?
2. Перерахуйте і поясніть основні закономірності фотоефекту.
3. Поясніть закономірності фотоефекту з позицій квантових уявлень.

## § 39. ЗАСТОСУВАННЯ ФОТООЕФЕКТУ

Відкриття фотоефекту мало дуже велике значення для глибшого розуміння природи світла. Проте цінність науки не тільки в тому, що вона з'ясовує складну і багатогранну будову навколишнього світу, а й у тому, що вона надає людині засоби, за допомогою яких можна вдосконалювати виробництво, поліпшувати умови матеріального і культурного життя суспільства.

За допомогою фотоефекту «заговорило» кіно: можна передавати рухомі зображення (телебачення). Застосування фотоелектронних приладів дало можливість створити верстати, які без участі людини виготовляють деталі за кресленнями. Прилади, що ґрунтуються на фотоефекті, контролюють розміри виробів краще від людини, вчасно вмикають і вимикають маяки та вуличне освітлення і т. д.

Усе це стало можливим завдяки винайденню дуже досконалих пристроїв — **фотоелементів**, у яких світлова енергія керує енергією електричного струму або перетворюється в неї.

Вакуумний фотоелемент — це скляна колба, частина внутрішньої поверхні якої вкрита тонким шаром металу з малою роботою виходу (мал. 179), це — катод. Через прозоре «віконце» світло проникає в колбу. У центрі колби є дротяна петля або диск — анод. Він призначений для вловлювання фотоелектронів і приєднаний до позитивного полюса батареї.

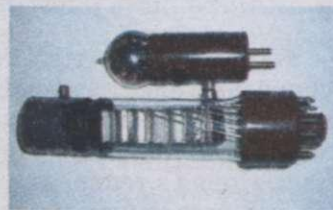
Фотоелементи здатні реагувати на видиме світло і навіть на інфрачервоне проміння.

Якщо світло потрапляє на катод фотоелемента, то в колі виникає електричний струм, який вмикає або вимикає те чи інше реле. Комбінація фотоелемента і реле дає можливість конструювати багато різних автоматів, що здатні «бачити». Один з них — автомат у метро. Він спрацьовує (висуває перегородку), коли людина перетинає світловий пучок, не опустивши монети, або жетона, або не приклавши проїзної картки.

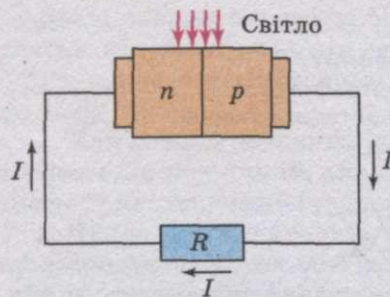
Подібні автомати можуть запобігати аварії. На заводі фотоелемент майже вмить зупиняє потужний прес, якщо рука людини потрапить у небезпечну зону.

За допомогою фотоелементів відтворюють записаний на кіноплівці звук.

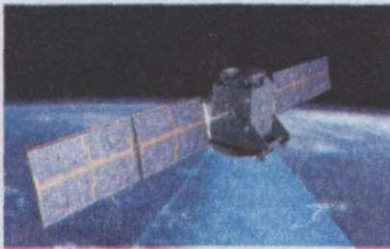
Крім розглянутого фотоефекту, який називають зовнішнім фотоефектом, різноманітне застосування знаходить внутрішній фотоефект у напівпровідниках. Це явище використовують у фоторезисторах — приладах, опір яких залежить від освітленості. Крім того, є напівпровідникові фотоелементи, які створюють ЕРС і безпосередньо



Мал. 179



Мал. 180



Мал. 181

перетворюють світлову енергію в енергію електричного струму. ЕРС, яку в цьому випадку називають фотоЕРС, що виникає в ділянці  $p-n$ -переходу двох напівпровідників під час опромінення цієї ділянки світлом. Під впливом світла утворюються пари електрон—дірка. У ділянці  $p-n$ -переходу є електричне поле. Воно примушує неосновні носії напівпровідників переміщатися через контакт. Дірки з напівпровідника  $n$ -типу переміщуються в напівпровідник  $p$ -типу, а електрони з напівпровідника  $p$ -типу — в ділянку  $n$ -типу, що створює накопичення основних носіїв у напівпровідниках  $n$ - і  $p$ -типів. Отже, потенціал напівпровідника  $p$ -типу збільшується, а  $n$ -типу зменшується. Це триває доти, поки струм неосновних носіїв через  $p-n$ -перехід зрівняється зі струмом основних носіїв через той самий перехід. У цей момент між напівпровідниками встановлюється різниця потенціалів, що дорівнює фотоЕРС.

Якщо коло замкнути зовнішнім навантаженням, то в колі потече струм, який буде визначатися різницею струмів неосновних і основних носіїв через  $p-n$ -перехід (мал. 180). Сила струму залежить від інтенсивності падаючого світла і опору навантаження.

Фотоелементи з  $p-n$ -переходом створюють ЕРС близько 1—2 В. Їх вихідна потужність сягає сотень ват при коефіцієнті корисної дії до 20%. Фотоелементи малої потужності використовують у фотоекспонетрах. Особливо широко їх застосовують при виготовленні сонячних батарей, які встановлюють не тільки на космічних апаратах (мал. 181), а й на дахах будинків, автомобілів тощо.

### ❓ ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Де застосовується явище фотоефекту?
2. Що таке фотоелемент? Яке його призначення?

## § 40. ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ

Усі без винятку тіла, температура яких не дорівнює абсолютному нулю, є джерелами електромагнітного випромінювання. Воно обумовлене тепловим рухом частинок речовини і тому називається тепловим. Інтенсивність теплового випромінювання дуже швидко зростає з підвищенням температури. Поряд з тепловим випромінюванням у природі існує випромінювання тіл, що не залежить від їх температури. Воно виникає за рахунок будь-якого виду енергії мимоволі.

Мимовільне (спонтанне) випромінювання, що відбувається за рахунок будь-якого виду енергії, крім теплової, називається люмінесценцією.

Залежно від процесів, при яких виникає холодне свічення, розрізняють кілька видів люмінесценції. Цілий ряд хімічних реакцій супроводжується холодним свіченням речовин, що беруть участь у них. Так, жовтий фосфор, поволі окиснюючись у повітрі, інтенсивно випускає холодне світло. Хімічні процеси викликають і холодне свічення багатьох біологічних об'єктів — біолюмінесценцію, що спостерігається у комах, морських риб і дрібних тварин, деяких сортів грибів, шматків гниючої деревини, багатьох бактерій.

Холодне свічення, що виникає при хімічних реакціях, називається хімічною люмінесценцією.

При проходженні струму через розріджені гази виникає яскраве холодне свічення різного кольору залежно від природи газу.

Холодне свічення, що спричинюється електричним струмом, називається електролюмінесценцією.

Люмінесценція виникає і при опроміненні багатьох речовин — сульфиду цинку, платиноціаната барію, гасу, ряду органічних барвників — рентгенівськими, ультрафіолетовими або видимими променями.

Холодне свічення, що викликається різними променями електромагнітного спектра, називається фотолюмінесценцією.

Розрізняють два види фотолюмінесценції: **флюоресценція і фосфоресценція**.

Флюоресценція — це свічення тіл, що відбувається тільки в процесі їх опромінення.

Фосфоресценція — це свічення тіл, що відбувається як під час опромінення, так і після його припинення.

Тривалість післясвічення при флюоресценції не перевищує  $10^{-3}$  с, а при фосфоресценції післясвічення може продовжуватися годинами, цілодобово і навіть місяцями. Принципової відмінності між цими видами люмінесценції немає. Фосфоресценція відрізняється від флюоресценції тільки тривалістю післясвічення.

Речовини, здатні випускати світло при їх опроміненні, називаються люмінофорами.

Усі спроби пояснити холодне свічення тіл, виходячи з електромагнітної теорії світла, виявилися невдалими. Квантова теорія світла це явище пояснює таким чином.

Припустимо, що молекула або атом люмінофора має  $p$  енергетичних рівнів. При поглинанні фотона молекула переходить у збуджений стан. Проте цей стан нестійкий і молекула повертається в стійкіший стан, випромінюючи при цьому надлишок енергії у вигляді світлового кванта. Так виникає холодне свічення тіл.

Процес випромінювання холодного світла може відбуватися прямо: електрони відразу переходять із збудженого стану в нормальний. У цьому випадку молекула люмінофора випромінює такий же квант енергії, який вона поглинула. У деяких люмінофорів процес випромінювання може мати каскадний характер: електрони переходять з найбільш високого енергетичного рівня в нормальний стан через ряд проміжних рівнів. Тоді енергія ви-

проміньованих квантів буде меншою за енергію поглиненого кванта, але загальна сума енергій випромінюваних квантів (згідно з законом збереження енергії) може бути або меншою, або, в крайньому випадку, дорівнювати тій енергії, яку поглинає молекула:  $\Delta E_{\text{в}} \leq \Delta E_{\text{п}}$  або  $h\nu_{\text{в}} \leq h\nu_{\text{п}}$ , звідки:  $\nu_{\text{в}} \leq \nu_{\text{п}}$  або

$$\frac{c}{\lambda_{\text{в}}} = \frac{c}{\lambda_{\text{п}}}. \text{ Отже, } \lambda_{\text{в}} \geq \lambda_{\text{п}}.$$

Таким чином, довжина хвилі світла, що випускається люмінесцюючою речовиною, завжди більша або дорівнює довжині світлової хвилі, падаючої на речовину.

Цей закон був встановлений експериментально англійським фізиком Дж. Стоксом і носить його ім'я — закон Стокса. У більшості випадків деяка частина енергії квантів світла, що поглинаються, перетворюється на внутрішню енергію тіл і тому, як правило, атоми і молекули люмінофора випромінюють кванти світла меншої енергії, ніж поглинають.

Явище люмінесценції покладене в основу будови люмінесцентних ламп. Люмінесцентна лампа є скляною трубкою, в яку з обох кінців упаяні вольфрамові електроди у вигляді спіралей. Внутрішня поверхня трубки покрита тонким шаром люмінофора. З трубки ретельно відкачують повітря. Потім її наповнюють під невеликим тиском аргоном і вводять кілька крапельок ртуті.

При включенні лампи в мережу змінного струму вольфрамові електроди розжарюються і з них вилітають електрони. Під дією електричного поля електрони набувають великої швидкості і, стикаючись з нейтральними атомами Аргону, йонізують їх. У аргоні виникає тліючий розряд, при цьому газ нагрівається, ртуть випаровується і пара ртуті випускає ультрафіолетові промені. Ультрафіолетові промені поглинаються атомами люмінофора і він випромінює видиме світло. Експериментально добирають такий склад люмінофора, який випромінює світло, за спектральним складом близьке до денного.

Спектральний склад люмінесцентного випромінювання є характерним для кожної речовини, і тому явище люмінесценції використовується для визначення хімічного складу різних речовин (люмінесцентний аналіз). При вивченні складу речовини методом люмінесцентного аналізу речовину опромінюють ультрафіолетовими променями. Спектр холодного світла, що вивчається при цьому, вивчають за допомогою спеціального люмінесцентного мікроскопа (мікроаналіз) або просто спостерігають неозброєним оком (макроаналіз) залежно від розміру досліджуваного об'єкта. Люмінесцентний аналіз отримав широке застосування в медико-біологічних дослідженнях, у гігієні і судовій медичній експертизі.

Під дією ультрафіолетових променів люмінесцюють різні тканини (нігті, зуби, склера, кришталік і ін.) і багато мікроорганізмів (бактерії прокази, дифтерії, туберкульозна паличка і т. д.). Це дає змогу проводити за допомогою люмінесцентного аналізу ряд важливих мікробіологічних досліджень, якщо звичайна мікроскопія виявляється менш ефективною. За допомогою люмінесцентного аналізу визначають ступінь придатності багатьох харчових продуктів: овочів, фруктів, яєць, муки, масла, риби, м'яса і ін. Цим же методом визначають ступінь чистоти лікарських препаратів, наявність вітамінів або отрут у харчових продуктах.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке люмінесценція?
2. Які види люмінесценції ви знаєте?
3. Які існують види фотолюмінесценції?
4. Яка природа люмінесценції?
5. Де застосовується люмінесцентний аналіз?

## § 41. КВАНТОВІ ГЕНЕРАТОРИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

На сьогодні є джерела світла, в яких атоми випромінюють світло однієї і тієї ж частоти, поляризованого в одній і тій же площині. Такі джерела когерентного світла отримали назву **лазерів**. Розглянемо їх принцип будови і роботи.

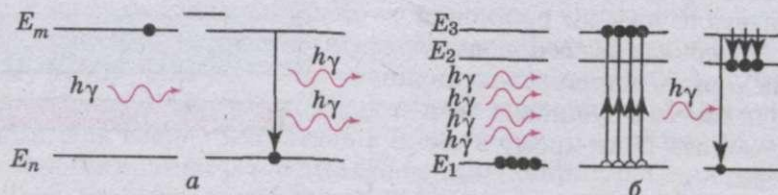
У 1917 р. **А. Ейнштейн** на основі теоретичного аналізу дійшов висновку, що перехід атомів із збудженого стану в незбуджений може бути не тільки спонтанним, а й вимушеним, індукованим. Він може відбутися під дією зовнішнього фотона, який проходить поблизу збудженого атома. При цьому атом (молекула, йон) випускає фотон, який абсолютно не відрізняється від того фотона, що викликав перехід атома із збудженого стану в незбуджений. Не змінюється при цьому і фотон, що викликав індуковане випромінювання (мал. 182, а).

Фотон, зустрічаючи на своєму шляху збуджений атом, нібито вибиває з останнього свого двійника. Обидва фотони мають однакові частоти, напрям руху, фази і площини поляризації.

У 1940 р. **В. Фабрикант** запропонував метод посилення світла на основі використання явища індукованого випромінювання. Суть цього методу полягає в наступному. В атомів деяких речовин є такі збуджені стаціонарні стани, в яких атоми можуть знаходитися досить довго (до декількох секунд). Такі стани отримали назву — **метастабільні**. Приклад речовини, в атомів якої спостерігається метастабільний стан, — це рубін — оксид алюмінію, в якому частина атомів алюмінію замінена йонами хрому, що мають метастабільний стан.

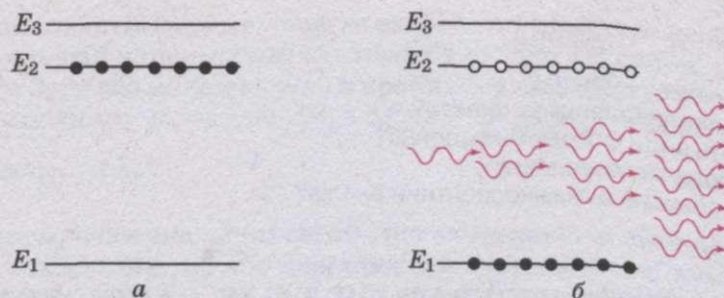
Під час опромінення рубіна зеленим світлом йони хрому збуджуються і переходять у стаціонарний стан, якому відповідає енергетичний рівень  $E_3$  (мал. 182, б). Через дуже малий інтервал часу (порядку  $10^{-8}$  с) більшість збуджених атомів хрому переходять на метастабільний рівень  $E_2$ .

Перехід з рівня  $E_3$  на рівень  $E_2$  не супроводжується випромінюванням; енергія, що звільняється при цьому переході, передається кристалічній ґратці, внаслідок чого підвищується температура кристала. Якщо кристал



Мал. 182





Мал. 183

рубіна тривалий час освітлювати, то відбудеться дуже щільне «заселення» метастабільного рівня йонів хрому (мал. 183, а). Якщо в рубіновий стержень через один його торець надходить слабкий пучок світла у напрямі осі стержня, то фотони, енергія яких  $h\nu$  дорівнює різниці  $E_2 - E_1$  енергій йона хрому в метастабільному й основному станах, викликають індуковані переходи цих йонів із стану  $E_2$  в стан  $E_1$  і випускання фотонів такої ж енергії:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Число фотонів подвоюється. Підкреслимо, що фотони індукованого випромінювання не відрізняються від фотонів, що викликали індуковані переходи йонів хрому не тільки за енергією і частотою, а й за фазою, напрямом поширення і поляризацією.

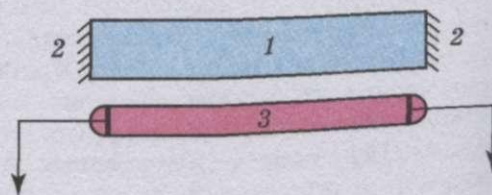
Подвоєні однакові фотони, рухаючись у рубіновому стержні, викликають індуковане випромінювання нових йонів хрому. При цьому число фотонів стає вже в 4 рази більше від їх початкового числа в підсилюваному пучку світла. Поки в рубіновому стержні є достатньо йонів хрому, що знаходяться в метастабільному стані, процес продовжується, і число фотонів, що рухаються до іншого торця стержня, збільшується лавиноподібно (мал. 183, б). Внаслідок цього з рубінового стержня виходить пучок когерентного світла, енергія якого значно більша за енергію пучка світла, що ввійшов до стержня, тобто відбувається посилення світлового пучка.

Проте важливий не тільки факт збільшення енергії світлового пучка. Ще важливіше те, що таким чином виходить пучок когерентного світла, в якому частота, фаза, поляризація і напрям руху в усіх фотонів однакові.

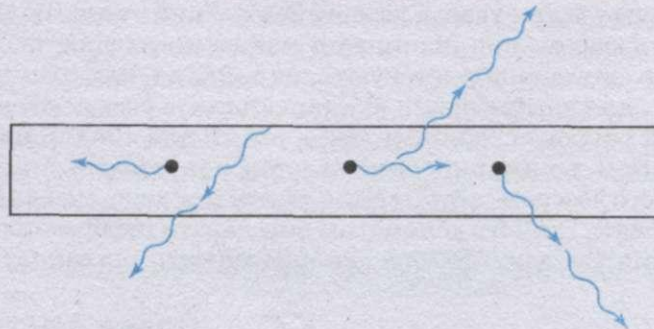
Від підсилення світла на основі використання принципу індукованого переведення атомів з метастабільного стану в стійкий один крок до генерування когерентного випромінювання. На мал. 184 показана спрощена схема рубінового лазера.

Основні вузли лазера: рубіновий стержень 1, дзеркала 2 і ксенонова газорозрядна лампа 3, випромінювання якої, потрапляючи в рубіновий стержень, переводить йони хрому в збуджений стан.

Якщо йони хрому збуджені і багато яких з них знаходиться в метаста-



Мал. 184



Мал. 185

більшому стані, то система буде нестійкою. У ній вірогідні спонтанні переходи йонів хрому з метастабільного в основний стан. Як ви вже знаєте, при таких переходах випромінюються фотони з енергією  $h\nu = E_2 - E_1$ . Напрямок руху фотона, що спонтанно випромінюється, передбачити не можна — він довільний. Різні фотони, що спонтанно випромінюються, рухаються за різними напрямками. Якщо фотон видетів у напрямі, не паралельному осі рубінового стержня, то він незабаром досягне бічної стінки і покине стержень (мал. 185).

Проте серед фотонів, що спонтанно вилітають, неодмінно будуть і такі, які рухаються паралельно осі рубінового стержня. На шляху свого руху вони викликають індуковані переходи атомів хрому, і кількість фотонів швидко збільшується, поки світло не досягне торця стержня. Відбившись від дзеркала (повністю і частково), фотони знову проходять по стержню і їх кількість продовжує збільшуватися.

Кожного разу при досягненні потоком фотонів напівпрозорого дзеркала велика його частина виходить назовні у вигляді червоного променя когерентного випромінювання. Оскільки всі фотони мають однакові напрями руху, то значна енергія випромінювання концентрується у вузькому пучку.

Генератори індукованого когерентного випромінювання називають **лазерами**.

Ця назва виправдана тим, що під час генерації основну роль відіграє процес посилення світла за рахунок індукованого випромінювання.

За фундаментальні роботи зі створення лазерів фізикам **М. Басову** і **О. Прохорову** в 1959 р. було присуджено Ленінську премію. У 1963 р. М. Басов, О. Прохоров і американський фізик **Ч. Таунс** за роботи в галузі лазерів були удостоєні Нобелівської премії.

Зі створенням лазерів виникли нові розділи оптики, що вивчають властивості і можливе практичне застосування когерентного світла.

Лазери знаходять дуже широке застосування в сучасній техніці.

Один із напрямів в практичному застосуванні лазерів зв'язаний з тим, що в лазерному пучку світла вдається сконцентрувати дуже велику потужність (до десятків мегават). Лазери застосовують для зварювання і різання тугоплавких матеріалів, для свердління отворів (наприклад, в алмазах); у медицині — для проведення тонких і складних операцій (наприклад, для приварювання сітківки ока, що відшарувалася). За допомогою лазерів здійснюється точкове зварювання при виробництві напівпровідникових приладів.

Інший напрям у застосуванні лазерів пов'язаний з тим, що світло, яке випромінюється лазером, при поширенні майже не розсіюється. Цю властивість лазерного світла використовують, наприклад, для прокладання ліній метрополітену, для вимірювання відстаней і кутів у геодезії, для визначення швидкостей і курсу кораблів, літаків, ракет, для локації планет.

Третій напрям у використанні лазерів пов'язаний з когерентністю випромінюваного лазером світла: світло лазера має дуже вузький спектр, його можна модулювати і за його допомогою передавати інформацію. На сьогодні діють лазерні лінії зв'язку. Лазери використовують для запису телевізійних зображень.



#### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яке випромінювання називають індукованим?
2. У чому полягає посилення світла?
3. Намалюйте схему рубінового лазера і поясніть принцип його роботи.
4. Назвіть основні напрями в застосуванні лазерів.

### § 42. КОРПУСКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ СВІТЛА

Такі явища, як відбивання, заломлення, інтерференція, дифракція і поляризація світла, з великою переконливістю свідчать, що світло має хвильові властивості. Разом з тим, ряд інших явищ — стійкість атома, розподіл енергії в спектрі абсолютно чорного тіла, лінійчасті спектри атомів, люмінесценція, фотоэффект тощо — переконують нас у тому, що світлом є потік фотонів. *Так що ж насправді є світлом: потік електромагнітних хвиль чи потік фотонів?*

Якщо світло — це тільки сукупність електромагнітних хвиль, то абсолютно неможливо пояснити явища фотоэффекту і люмінесценції, лінійчасті спектри та інші факти. Проте всі ці явища стають абсолютно зрозумілими і легко з'ясовними, якщо відмовитися від хвильової точки зору і вважати, що світло — це потік фотонів. Але в цьому випадку нез'ясовними стають явища інтерференції, дифракції і поляризації світла.

Аналізуючи всю сукупність відомих нам властивостей світла, можна зробити єдино можливий висновок: світло одночасно має і властивості хвиль, і властивості частинок. Абсолютно неможливо протиставити хвильові властивості світла його квантовим властивостям або, навпаки, пояснювати всі оптичні явища, виходячи тільки з однієї — хвильової або квантової — точки зору. Всяка спроба віддати перевагу хвильовій або квантовій точці зору неминуче призводить до непереборних суперечностей з експериментально встановленими фактами. Світло одночасно має і хвильові, і квантові властивості. При цьому в одних явищах більшою мірою виявляються хвильові властивості світла, а в інших — квантові.

Світлові частинки — фотони — одночасно мають і властивості хвиль, і властивості частинок.

**Фотон одночасно є і частинкою, і хвилею, тобто частинкою-хвилею, і об'єднує властивості обох.**

Математично цей факт виражається знаменитою формулою Планка. З цієї формули видно, що, коли довжина хвилі електромагнітного випроміню-

вання велика, відповідні їй кванти настільки малі, що їх неможливо виявити на досліді. У міру зменшення довжини хвилі випромінювання хвильові властивості поступово ослаблюються, а квантові, навпаки, підсилюються і, нарешті, при вивченні рентгенівських і гамма-променів стають переважаючими. У певному інтервалі частот (довжин хвиль) хвильові і корпускулярні властивості випромінювання виявляються в однаковій мірі, і на досліді ми спостерігаємо їх єдність, яка вражає нашу уяву.

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

Для вольфраму червона межа фотоефекту  $2,75 \cdot 10^{-5}$  см. Визначте роботу виходу електронів з вольфраму і швидкість вириваних фотоелектронів світлом, довжина хвилі якого  $1,8 \cdot 10^{-5}$  см.

#### Розв'язання

Рівняння Ейнштейна для червоної межі фотоефекту можна записати так:

$$h\nu_0 = A.$$

Звідси визначимо роботу виходу електрона з вольфраму:  $A = h\nu_0 = h \frac{c}{\lambda_0}$ . Підставляючи значення величин, отримаємо  $A = 7,2 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Тепер запишемо рівняння Ейнштейна для довжини хвилі  $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-7}$  м:

$$h \frac{c}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2}, \text{ звідки } \frac{mv^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - A. \text{ Тоді } \frac{mv^2}{2} = hc \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right).$$

Знаючи кінетичну енергію електрона, визначимо швидкість його вильоту:

$$v = \sqrt{\frac{2hc}{m} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо

$$v = 0,91 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

#### Рівень А

328. Як і чому освітленість поверхні металу впливає на фотоефект?
329. У чому відмінність між зовнішнім та внутрішнім фотоефектами?
330. Як і чому частота випромінювання впливає на фотоефект?
331. Довжина хвилі випромінювання, яка відповідає червоній межі фотоефекту для натрію, дорівнює 530 нм. Яка робота виходу електронів із натрію (результати подати в Дж і еВ)?
332. Визначте роботу виходу електрона з металу, якщо фотоефект починається, коли частота падаючого світла становить  $6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ .
333. Робота виходу електронів із вольфраму дорівнює 4,5 еВ. Яка мінімальна частота електромагнітного випромінювання, що здатне зумовити фотоефект під час опромінення ним поверхні вольфраму?
334. Яка максимальна довжина хвилі електромагнітного випромінювання, що здатне зумовити фотоефект при опроміненні ним цинкової пластини? Робота виходу з цинку становить 4,2 еВ.
335. У яких променів маса більша — у фотонів  $\gamma$ -проміння чи ультрафіолетового випромінювання?
336. Визначте енергію фотонів, які відповідають найдовшим ( $\lambda = 0,75 \text{ мкм}$ ) і найкоротшим ( $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ ) хвилям видимої частини спектра.

337. Який імпульс і яка довжина хвилі випромінювання, фотони якого мають масу  $4 \cdot 10^{-36}$  кг?
338. Фотони рентгенівського випромінювання мають енергію 50 кеВ. Яка довжина їх хвилі та яка їх маса?
339. Які енергія та імпульс фотонів інфрачервоного випромінювання з частотою 30 ТГц?
340. Поясніть поняття тиску світла з точки зору квантової фізики.
341. Світло чинить на поверхню тим більший тиск, чим повніше вона його відбиває. Як це пояснити?
342. Порівняти тиск світла, який діє на ідеально білу та ідеально чорну поверхні за однакових умов.

### Рівень В


343. Поясніть, як відбувається фотосинтез та яку роль він відіграє у природі.
344. Поясніть, яким чином отримується приховане зображення на фотоплівці у процесі фотографування.
345. Чому фотоплівку для чорно-білої фотозйомки можна проявляти при червоному освітленні?
346. Визначте кінетичну енергію і швидкість фотоелектронів, що їх вириває з поверхні цинку ультрафіолетове випромінювання, яке має довжину хвилі 0,2 мкм.
347. Електрон вилітає із цезію, маючи кінетичну енергію 2 еВ. Яку максимальну довжину має хвиля світла, що спричиняє фотоэффект, коли робота виходу дорівнює 1,8 еВ?
348. Срібну пластину опромінюють ультрафіолетовим випромінюванням хвилі 200 нм. З якою максимальною швидкістю електрони залишають поверхню срібла? Робота виходу електронів дорівнює 4,3 еВ.
349. На фотоелемент із цезієвим фотокатодом падає ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 100 нм. Яку зворотну напругу слід подати на фотоелемент, щоб електричний струм крізь нього припинився?
350. Максимальна швидкість електронів, які вилітають із поверхні рубідію під час її освітлення ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі 400 нм, дорівнює  $880 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ . Яка робота виходу електронів із рубідію?
351. Деякі речовини світяться, якщо на них потрапляє випромінювання. Чому довжина хвилі випромінювання такої речовини більша від довжини хвилі випромінювання, яке вона поглинула?
352. На залізну кульку, віддалену від інших тіл, падає ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 200 нм. До якого максимального потенціалу заряджається кулька внаслідок тривалого опромінення, якщо робота виходу електронів із заліза дорівнює 4,36 еВ?
353. Плоский алюмінієвий електрод освітлюється світлом із довжиною хвилі 83 нм. Поза електродом є затримуюче електричне поле напруженістю  $750 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . На яку максимальну відстань від електрода може віддалитися електрон?
354. Яку максимальну кількість електронів може втратити металева дробинка радіусом 1 мм при опроміненні її світлом довжиною хвилі 200 нм? Червона межа фотоэффекту  $\lambda_0 = 280$  нм.
355. Фотоэффект припиняється, якщо до фотоелемента прикласти зворотну напругу 2,4 В. З якою максимальною швидкістю досягатимуть електроди анода фотоелемента під час його прямого ввімкнення, якщо напруга на ньому становитиме 4,8 В?

356. Визначте частоту випромінювання, фотони якого мають енергію, що дорівнює кінетичній енергії протонів, які пройшли прискорювальну різницю потенціалів 10 кВ.
357. При якій температурі кінетична енергія поступального руху молекули Гідрогену дорівнює енергії фотона з довжиною хвилі 0,4 мкм?
358. Фотони, частота яких дорівнює 500 ТГц, падають на дзеркальну поверхню. Кут падіння випромінювання становить  $60^\circ$ . Яка зміна імпульсу фотонів внаслідок зіткнення з поверхнею?
359. На поверхню металу падають монохроматичні промені з довжиною хвилі 0,1 мкм. Червона межа фотоефекту 0,3 мкм. Яка частина енергії фотона витрачається на надання електрону кінетичної енергії?
360. Око людини реагує на зелене світло з довжиною хвилі 500 нм, якщо в зіницю ока потрапляє щосекунди не менше 53 фотонів. Із якої максимальної відстані могла б бути людиною помічена в темряві зелена лампочка, що споживає потужність 100 Вт і має ККД 1 %, якби не було поглинання світла в атмосфері? Діаметр зіниці ока в темряві вважати таким, що дорівнює 6 мм.

## ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

## Контрольні запитання

1. Обґрунтуйте, виходячи із законів заломлення світла, чому промені, які падають перпендикулярно до межі розділу двох середовищ, не повинні заломлюватися.
2. Не звертаючись до дослідів, обґрунтуйте оборотність ходу променів при переході з одного середовища в інше.
3. Відхилення світлових променів у тонкій тригранній призмі пропорційне її заломному куту. З огляду на це, встановіть, що сильніше заломлює світло — краї чи середина лінзи.
4. Поясніть, чому явище інтерференції переконливо доводить, що світло — це типово хвильовий процес.
5. Чому колір одного і того ж самого місця мильної бульбашки, вертикально завислої на каркасі, безперервно змінюється? В якій послідовності? Як змінюватимуться від шару до шару кольори бульбашки, коли від цього місця почати дивитись угору?
6. Як впливає число штрихів дифракційної ґратки на відстань між світлими смугами і на їхні розміри в спектрі ґратки?
7. Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?
8. Призматичний спектр в інтервалі коротких хвиль, особливо на ділянці фіолетових променів, дуже витягнутий і розмитий. Про що це свідчить?
9. Коричневий колір відсутній у суцільному спектрі. Як виникає цей колір?
10. Чи буде повністю поляризованим заломлене в прозорому діелектрику світло, якщо встановлено, що відбитий промінь поляризується повністю, коли він із заломленим променем утворює кут  $90^\circ$ ?
11. Якби світло взаємодіяло з речовиною як хвиля, то не існувало б червоної межі фотоефекту. Доведіть це.
12. Фотон поглинається речовиною. Що стається з масою фотона?
13. Доведіть, що вільний електрон не може поглинути фотон.
14. Чи правильне твердження: в природі світла виявляється корпускулярно-хвильовий дуалізм? Поясніть чому.

 **Що я знаю і вмю робити**

**Я знаю, як проводилися історичні досліді**

1. В історичному досліді Фізо на визначення швидкості світла відстань між колесом, яке мало 720 зубців, і дзеркалом дорівнює 8633 м. Світло вперше зникло, коли частота обертання зубчастого колеса становила 12,67 Гц. Яке значення швидкості світла дістав Фізо?

2. У досліді Юнга фіолетовий світлофільтр ( $\lambda_1 = 400$  нм) замінимо червоним ( $\lambda_2 = 650$  нм). Як при цьому змінилась інтерференційна картина на екрані?

**Я знаю, як застосовувати рівняння фотоефекту**

3. Електрон вилітає з цезію з кінетичною енергією  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж, а робота виходу із цезію  $2,88 \cdot 10^{-19}$  Дж. Яка довжина хвилі, що визначає фотоефект?

4. Робота виходу електронів з цинку  $5,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. Чи відбуватиметься фотоефект, якщо на цинк падатимуть світлові промені з довжиною хвилі  $4,5 \cdot 10^{-7}$  м?

5. Червона межа для фотоефекту калію  $\lambda_c = 577$  нм, кінетична енергія вирваних фотоелектронів  $4,2 \cdot 10^{-19}$  Дж. Яка частота світлової хвилі, що визначає фотоефект?

6. Робота виходу фотоелектронів із срібла становить  $7,85 \cdot 10^{-19}$  Дж. Визначте довжину і частоту хвилі червоної межі фотоефекту для срібла.

**Я вмю розв'язувати задачі і пояснювати їх розв'язки**

7. Світло частотою  $10^{15}$  Гц падає перпендикулярно до плоского дзеркала. Визначте зміну імпульсу фотона при відбиванні.

8. Фотоелектрони, що вириваються з металу червоним світлом з частотою  $3,9 \cdot 10^{15}$  Гц, повністю затримуються напругою 5 В, а вирвані фіолетовим світлом з частотою  $7,6 \cdot 10^{15}$  Гц — напругою 20 В. Визначте сталу Планка за цими даними.

**Я вмю виконувати досліді**

9. Закоптіть скло і голкою проведіть лінію завдовжки 1—2 см. Подивіться через отриману щілину на волосок електричної лампи, розташувавши щілину паралельно нитці лампи. Наближаючи і віддаляючи скло від ока, знайдіть таке його положення, при якому помітне явище дифракції. Щілину можна вирізувати гострою бритвою в чорному папері. Ширина щілини повинна бути близько 0,5 мм.

10. Змінюючи температуру нитки електричної лампи, спостерігайте за спектром випромінюваного нею світла.

Необхідне устаткування: спектроскоп, низьковольтна лампочка з ковпачком, джерело струму з ЕРС 4 В, реостат, ключ, з'єднувальні провідники.

**Я знаю, як працюють фотоелементи**

11. Катод фотоелемента освітлюється монохроматичним випромінюванням. При зворотній напрузі на фотоелементі 1,25 В струм через нього припиняється. Після зміни довжини хвилі випромінювання на 50 % для припинення фотоструму на фотоелемент довелось подати зворотну напругу 4 В. Яка довжина хвилі випромінювання, яким опромінювався катод? Яка червона межа фотоефекту для речовини катоду фотоелемента?

## ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

## Варіант I

1. Світло — це
  - А. одночасно хвиля і потік частинок масою  $m$ .
  - Б. електромагнітна хвиля.
  - В. потік фотонів.
  - Г. одночасно електромагнітна хвиля і потік фотонів.
  - Д. потік частинок масою  $m$ .
2. Когерентні хвилі отримують шляхом
  - А. випромінювання від двох джерел різної частоти.
  - Б. від двох джерел однакової частоти із змінною різницею фаз.
  - В. розділом світлового фронту на два.
  - Г. випромінюванням двох джерел, нагрітих до різної температури.
  - Д. випромінювання двох різних лазерів.
3. Інтерференція світла — це
  - А. накладання хвиль, що поширюються від когерентних джерел.
  - Б. області накладання хвиль.
  - В. накладання хвиль, що поширюються від двох джерел, однакової частоти, але змінної різниці фаз.
  - Г. додавання коливань з розподілом амплітуди в часі.
  - Д. додавання коливань з розподілом амплітуди в просторі і часі.
4. Дифракційна ґратка має 40 штрихів на 1 мм. Четвертий максимум відхилений на  $6^\circ$  від точки центра екрана. Чому дорівнює довжина хвилі світла? Якому кольору відповідає така довжина хвилі?
  - А. 523 нм, зеленому. Б. 653 нм, жовтому.
  - В. 710 нм, червоному. Г. 1024 нм, червоному.
5. Дисперсія світла — це залежність
  - А. показника заломлення від швидкості світла.
  - Б. показника заломлення від частоти падаючого світла.
  - В. довжини хвилі від показника заломлення.
  - Г. швидкості поширення світла від показника заломлення.
  - Д. частоти світла від показника заломлення.
6. Швидкість поширення світла у вакуумі дорівнює
  - А.  $3 \cdot 10^6$  м/с. Б.  $3 \cdot 10^3$  м/с. В.  $3 \cdot 10^5$  км/с. Г.  $3 \cdot 10^7$  м/с. Д.  $3 \cdot 10^4$  км/с.
7. Максимум інтерференційної картини спостерігається, якщо різниця ходу дорівнює
  - А.  $k$ . Б.  $(k + \frac{1}{2})$ . В.  $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ . Г.  $k \cdot \frac{\lambda}{2}$ . Д.  $3k \cdot \frac{\lambda}{2}$ .
8. Визначте довжину світлової хвилі, що потрапляє на дифракційну ґратку, якщо її період 0,01 мм, а кут заломлення  $0,05^\circ$ .
  - А.  $5 \cdot 10^{-6}$  м. Б.  $4,5 \cdot 10^{-7}$  м. В.  $6 \cdot 10^{-7}$  м. Г.  $9 \cdot 10^{-6}$  м. Д.  $5 \cdot 10^{-7}$  м.
9. Кут падіння променя  $37^\circ$ , визначте кут відбиття.
  - А.  $37^\circ$ . Б.  $64^\circ$ . В.  $30^\circ$ . Г.  $45^\circ$ . Д.  $15^\circ$ .
10. Визначте абсолютний показник заломлення середовища, якщо кут падіння променів у повітрі  $45^\circ$ , а кут заломлення в середовищі  $30^\circ$ .
  - А. 2. Б.  $\frac{\sqrt{2}}{2}$ . В.  $\sqrt{2}$ . Г.  $\frac{2}{\sqrt{2}}$ . Д.  $2\sqrt{2}$ .



11. Явище зовнішнього фотоелектру — це виривання електронів
- під дією теплового поля.
  - із середини речовини під дією світла.
  - з поверхні речовини під дією світла.
  - із середини речовини за рахунок деформації.
  - випромінювання поверхнею речовини світла.
12. Закони фотоелектру формулюються так.
- Фотострум насичення прямо пропорційний світловому потоку; максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається інтенсивністю.
  - Фотострум насичення пропорційний частоті падаючого світла; максимальна початкова швидкість фотоелектрів визначається інтенсивністю падаючого світла.
  - Фотострум насичення прямо пропорційний світловому потоку; максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою падаючого світла і не залежить від його інтенсивності.
  - Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою та інтенсивністю падаючого світла.
  - Фотострум насичення пропорційний світловому потоку і залежить від частоти падаючого світла.
13. Згідно з рівнянням Ейнштейна для фотоелектру, енергія кванта, що визначає фотоелектр, повинна бути
- більшою за роботу виходу.
  - рівною роботі виходу.
  - більшою за роботу виходу або дорівнювати їй.
  - більшою за кінетичну енергію.
  - дорівнювати кінетичній енергії електрона, що вилітає.
14. Червона межа фотоелектру визначається з умови:
- $h\nu = \frac{mv^2}{2}$ .
  - $h\nu = eU$ .
  - $h\nu = A_{\text{вих}} + eU$ .
  - $h\nu = A_{\text{вих}}$ .
  - $h\nu = 0$ .
15. Якщо довжина хвилі падаючого світла дорівнює червоній межі, то швидкість фотоелектронів
- $v = 10^6$  м/с.
  - $v = 3 \cdot 10^8$  м/с.
  - $v = 1,5 \cdot 10^8$  м/с.
  - $v = 1000$  м/с.
  - $v = 0$ .
16. Імпульс фотона визначається як
- $\frac{hc}{\lambda}$ .
  - $\frac{h\lambda}{c}$ .
  - $\frac{h\nu}{c}$ .
  - $mc^2$ .
  - $\frac{hc}{v}$ .
17. Визначте енергію фотона, якщо  $\nu = 4 \cdot 10^{14}$  Гц.
- $26,56 \cdot 10^{-19}$  Дж.
  - $2,656 \cdot 10^{-19}$  Дж.
  - $265,6 \cdot 10^{-20}$  Дж.
  - $2,656 \cdot 10^{-20}$  Дж.
  - $2,656 \cdot 10^{-18}$  Дж.
18. Визначте імпульс фотона, якщо  $\nu = 6 \cdot 10^{14}$  Гц.
- $6,64 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с.
  - $6,64 \cdot 10^{-28}$  кг·м/с.
  - $1,328 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с.
  - $13,28 \cdot 10^{-29}$  кг·м/с.
  - $13,28 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с.
19. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і фізичними величинами.
- |                    |                       |
|--------------------|-----------------------|
| А. Маса фотона.    | 1. Метр.              |
| Б. Частота.        | 2. Джоуль.            |
| В. Довжина хвилі.  | 3. Кілограм.          |
| Г. Імпульс фотона. | 4. Герц.              |
| Д. Енергія фотона. | 5. Ньютон на секунду. |

## Варіант II

1. Когерентними називаються джерела світла, для яких
  - А. однакова частота і зсув фаз постійний у часі.
  - Б. однакова частота і зсув фаз змінний у часі.
  - В. різна частота і зсув фаз незмінний у часі.
  - Г. різна частота і зсув фаз дорівнює нулю.
  - Д. однакова частота.
2. Дифракція світла — це
  - А. огинання перешкод.
  - Б. інтерференція хвиль.
  - В. огинання перешкод співмірних з довжиною хвилі.
  - Г. відбивання від перешкод.
  - Д. проникнення через перешкоди.
3. Які з перерахованих нижче явищ пояснюються інтерференцією світла? 1. Кольорова плівка мильних бульбашок. 2. Відхилення світла в область геометричної тіні. 3. Кільця Ньютона. 4. Утворення напівтіні. 5. Розкладання світла в призмі.
  - А. 1 і 5. Б. 1 і 2. В. 3 і 4. Г. 1 і 3. Д. 1.
4. На основі принципу Гюйгенса — Френеля пояснюється
  - А. відбивання світла.
  - Б. заломлення світла.
  - В. прямолінійне поширення світла, дифракція.
  - Г. інтерференція.
  - Д. дисперсія.
5. Плоскополяризованим називається світло, якщо коливання вектора
  - А.  $\vec{E}$  відбуваються в одній площині.
  - Б.  $\vec{E}$  змінюються по колу.
  - В.  $\vec{B}$  відбуваються в різних площинах.
  - Г.  $\vec{E}$  відбуваються в різних площинах.
  - Д.  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  відбуваються в різних площинах.
6. Показник заломлення середовища  $n = 2$ , тоді швидкість поширення світла в ньому
  - А.  $3 \cdot 10^8$  м/с. Б.  $1,5 \cdot 10^8$  м/с. В.  $1,5 \cdot 10^7$  км/с. Г.  $2 \cdot 10^8$  м/с. Д.  $1,5 \cdot 10^3$  км/с.
7. Мінімум інтерференційної картини спостерігається, якщо різниця ходу дорівнює
  - А.  $k\lambda$ . Б.  $(k + \frac{1}{2})\lambda$ . В.  $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ . Г.  $k \cdot \frac{\lambda}{2}$ . Д.  $\frac{3}{2} \cdot k\lambda$ .
8. Визначте порядок максимуму інтерференційної картини, що її дає дифракційна ґратка періодом 0,02 мм, якщо кут заломлення 0,06, а довжина хвилі  $6 \cdot 10^{-7}$  м.
  - А. 1. Б. 0. В. 2. Г. 3. Д. 20.
9. Визначте фокусну відстань лінзи, якщо її оптична сила 10 дптр.
  - А. 0,1 см. Б. 10 см. В. 1 м. Г. 0,01 м. Д. 0,15 м.
10. Робота виходу електрона дорівнює найменшій енергії, яку потрібно
  - А. надати електрону провідності, щоб він міг вийти у вакуумі.
  - Б. надати, щоб електрон став електроном провідності.
  - В. надати, щоб швидкість електрона зростає в 2,74 раза.

- Г. забрати, щоб електрон перейшов із зони провідності в зону валентності.  
 Д. надати, щоб електрон перейшов із зони валентності в зону провідності.  
 11. Кінетична енергія вирваних електронів залежить від частоти  
 А. прямо пропорційно.  
 Б. лінійно.  
 В. обернено пропорційно.  
 Г. не залежить (стала).  
 Д. квадратично.

12. Металева пластинка освітлюється ультрафіолетовим світлом. Заряд якого знаку буде мати ця пластинка в результаті фотоелектричного ефекту?

- А. Негативний. Б. Нейтральний. В. Позитивний. Г. Позитивний і негативний.  
 Д. Знак заряду може бути різний залежно від інтенсивності світла.

13. Рівняння Ейнштейна для фотоелектричного ефекту записується так:

А.  $h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вих}}$ . Б.  $h\nu = \frac{mv^2}{2}$ . В.  $h\nu = eU_3$ . Г.  $h\nu = A_{\text{вих}}$ . Д.  $h \frac{c}{\lambda} = A_{\text{вих}}$ .

14. Довжина хвилі, що відповідає червоній межі фотоелектричного ефекту визначається так:

А.  $\lambda = \frac{h}{v}$ . Б.  $\lambda = \frac{h\nu}{A_{\text{вих}}}$ . В.  $\lambda = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}$ . Г.  $\lambda = \frac{h\nu}{A_{\text{вих}}}$ . Д.  $\lambda = \frac{A_{\text{вих}}}{hc}$ .

15. Енергія фотона визначається так:

А.  $\frac{h\nu}{c}$ . Б.  $\frac{hc}{\lambda}$ . В.  $\frac{h\lambda}{c}$ . Г.  $\frac{hc}{v}$ . Д.  $mc$ .

16. Маса фотона визначається так:

А.  $\frac{h\nu}{c^2}$ . Б.  $\frac{hc}{v}$ . В.  $\frac{h\nu}{c}$ . Г.  $\frac{h\lambda}{c}$ . Д.  $\frac{hc}{\lambda}$ .

17. Визначте енергію фотона, якщо  $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$  м.

- А.  $13,28 \cdot 10^{-20}$  Дж.  
 Б.  $6,64 \cdot 10^{-20}$  Дж.  
 В.  $6,64 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
 Г.  $13,28 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
 Д.  $19,92 \cdot 10^{-20}$  Дж.

18. Визначте масу фотона з частотою  $\nu = 9 \cdot 10^{14}$  Гц.

- А.  $6,64 \cdot 10^{-35}$  кг.  
 Б.  $6,64 \cdot 10^{-30}$  кг.  
 В.  $6,64 \cdot 10^{-34}$  кг.  
 Г.  $6,64 \cdot 10^{-36}$  кг.  
 Д.  $6,64 \cdot 10^{-37}$  кг.

19. Установіть відповідність між явищами і теоріями світла, що їх описують.

- |                           |                                   |
|---------------------------|-----------------------------------|
| А. Інтерференція.         | 1. Хвильова теорія світла.        |
| Б. Фотоелектричний ефект. | 2. Корпускулярна теорія світла.   |
| В. Ефект Комптона.        | 3. Класична механіка.             |
| Г. Дифракція.             | 4. Релятивістська механіка.       |
| Д. Поляризація.           | 5. Спеціальна теорія відносності. |

# АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА





## Розділ 5 Атомна і ядерна фізика

- Історія вивчення атома
- Квантові постулати Бора
- Модель атома Гідрогену за Бором. Труднощі теорії Бора
- Спектроскоп. Спектральний аналіз
- Рентгенівське випромінювання
- Атомне ядро. Ядерні сили. Енергія зв'язку атомних ядер
- Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду
- Ядерні реакції
- Ланцюгова реакція поділу ядер Урану
- Фізичні основи ядерної енергетики
- Дія радіоактивного випромінювання на живий організм
- Елементарні частинки, їх класифікація та характеристика

### § 43. ІСТОРІЯ ВИВЧЕННЯ АТОМА

З попередніх класів вам вже багато відомо про атом, його будову і властивості. Тому ми коротко зупинимося на історичних етапах вивчення атома.

**Г. Гейгер**, колега та учень знаменитого фізика **Е. Резерфорда**, згадуючи якось про важливу подію в історії фізики, що відбулася у перших числах 1911 р., написав у листі до іншого учня свого вчителя, **Дж. Чедвіка**: «Одного разу Резерфорд увійшов у мою кімнату у досить гарному настрої і сказав, що він тепер знає, який вигляд має атом...»

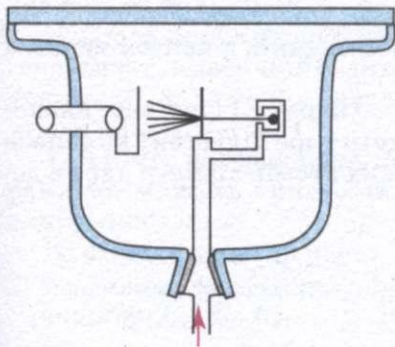
Модель Резерфорда була не першою в історії фізики. Учитель Резерфорда, **Дж. Томсон**, який відкрив існування в атомах електронів — найменших частинок, що несуть негативний заряд, пропонував вважати атом позитивно зарядженою кулею-сферою, в якій «плавають» електрони. Позитивний заряд в уяві Томсона був розподілений по всьому об'єму кулі.

Німецький фізик **Ф. Ленард** у 1903 р. запропонував модель «пустого» атома, всередині якого літають якісь ніким не встановлені (ні раніше, ні тепер) нейтральні частинки, складені із взаємно зрівноважених позитивних та негативних зарядів. Ленард навіть придумав назву для цих неіснуючих частинок — дінаміді.

Проте модель атома Резерфорда була єдиною, право на існування якої доводилося строгими, простими і красивими дослідами. До свого відкриття Резерфорд прийшов не відразу. Працюючи майже все перше десятиліття XX ст. у Канаді (до переїзду в Англію) разом із хіміком **Ф. Содді**, Резерфорд вивчав явище радіоактивного розпаду атомів Радію, відкрите в останні роки XIX ст. у Франції **А. Беккерелем** та подружжям **Кюрі**. Як відомо, **П. Кюрі** і **М. Склодовська-Кюрі**, пропускаючи випромінювання від радію через магнітне поле, встановили, що частина променів відхиляється вгору від початкової траєкторії, а шлях інших залишається прямолінійним.

Резерфорд та Содді помістили шматок радію у більш сильне магнітне поле, ніж в експериментах, описаних вище, і з подивом помітили, що та частина випромінювання, яка до цього часу, вважалася, рухається прямолінійно, також розділилася на дві складові: одна частина летіла і далі прямолінійно, а інша — поверталася вниз від уявної лінії між полюсами магніту. Таким чином, із атомів Радію спонтанно випромінюються три види частинок або променів: негативно заряджені (ті, що відхиляються вгору), нейтральні і позитивно заряджені.

Знаючи силу магнітного поля та величину відхилення в полі частинок-променів, використовуючи спектральний аналіз (де природу речовини визначають за характерним для неї світінням), Резерфорд і Содді довели, що позитивно заряджена частина випромінювання, що отримала назву  $\alpha$ -випромінювання, являє собою потік йонізованих атомів Гелію. Знаменитий англійський хімік **В. Рамзай** підтвердив висновки молодих учених.



Мал. 186

Всі експерименти і досліди Е. Резерфорда було виконано досить просто (мал. 186).  $\alpha$ -випромінювання від шматка радю, відхилене магнітним полем, проходило через тоненьку фольгу з алюмінію, міді, свинцю та інших металів і попадало на напівпрозорий екран, покритий шаром люмінофора.

У місцях попадання  $\alpha$ -частинок екран світився точковими спалахами. Кількість спалахів залежала від атомної маси елемента, з якого була зроблена фольга, — чим елемент важчий, тим менше і рідше світився екран.

Резерфорд попросив одного із своїх учнів, який спостерігав за спалахами (під час проведення цих дослідів ученому допомагали Гейгер і Марсден), особливо уважно слідкувати за віддаленими від центра частинами екрана, де, як спочатку здавалося, спалахи не відбуваються. До великої радості та гордості Резерфорда, ці спалахи, хоча їх було і небагато, вдалося помітити. Крім того, дослідники зареєстрували, що деякі із  $\alpha$ -частинок відскакують назад, і тому екран потрібно ставити перед фольгою, щоб було видно ці незвичайні випадки (мал. 187).

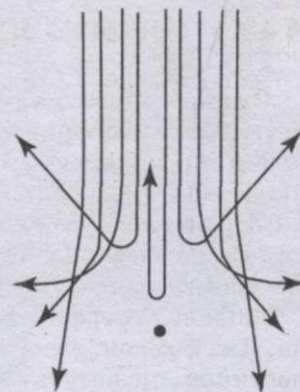
Одна із восьми частинок, що пролітала, поверталася назад. Можна лише дивуватися, як вченим вдалося не лише розгледіти це, а й підрахувати число таких випадків.

Це могло означати лише одне: в центрі будь-якого атома є маленьке, щільне, позитивно заряджене ядро, що відхиляє пролітаючу  $\alpha$ -частинку (також позитивно заряджену) близько від нього на досить великі кути, а інколи і взагалі повертає назад до джерела частинок, — і тоді виникають спалахи у дальніх частинах екрана, або на екрані, розміщеному перед фольгою.

Результати дослідів, які привели Резерфорда до планетарної будови атома, вчений виклав у великій статті «Розсіювання альфа- і бета-частинок у Речовині і Структура Атома», опублікованій у травні 1911 р. в англійському «Філософському журналі».

Резерфорд продовжував працювати далі, і завдяки клопіткій роботі він виводить формулу, що зв'язує число  $\alpha$ -частинок, відхилених на певний кут, із зарядом ядер речовини фольги-мішені. Тепер вже можна було дослідно визначити природу матеріалу мішені. У руках дослідників з'явився перший ядерний метод хімічного аналізу!

Вдалося нарешті оцінити розміри найменшого ядра — Гідрогену, навколо якого обертається лише один електрон. Діаметр ядра Гідрогену виявився трохи більшим, ніж  $1,3 \cdot 10^{-13}$  см. У більш важких атомів діаметр ядра в декілька тисяч разів більший.



Мал. 187

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Хто з учених займався вивченням будови атома?
2. Які існували моделі атома?
3. У чому суть дослідів Резерфорда?
4. Які розміри має атом Гідрогену?

**§ 44. КВАНТОВІ ПОСТУЛАТИ БОРА**

Отже, тепер вам відомо, що англійський фізик Е. Резерфорд у 1911 р. експериментально довів існування в атомі позитивно зарядженого ядра. Виявлення атомного ядра привело Резерфорда до припущення, що атом складається з центрального ядра, в якому зосереджені майже вся маса атома і весь його позитивний заряд. Навколо ядра, подібно до планет навколо Сонця, рухаються окремі електрони. Число електронів у кожному атомі таке, що їх сумарний негативний заряд дорівнює позитивному заряду ядра, тому в цілому атом нейтральний. Ця модель будови атома отримала назву планетарної.

Дослід Резерфорда, звичайно, нічого не говорив про рух електронів. Але оскільки статична модель атома, що складається з позитивного ядра і електронів, неможлива (електрони притягнуться до позитивного ядра!), Резерфорд припустив, що електрони рухаються навколо ядра.

Подальше вивчення планетарної моделі атома Резерфорда показало, що в рамках класичної фізики вона суперечить ряду відомих експериментальних фактів.

Перша суперечність полягає в тому, що, згідно з теорією Максвелла, будь-який електричний заряд, що рухається прискорено, повинен безперервно випромінювати електромагнітні хвилі. Електрони, які обертаються навколо ядра, рухаються з доцентровим прискоренням і, отже, згідно з електродинамікою Максвелла, повинні безперервно випромінювати електромагнітні хвилі, у той час як у нормальному стані атоми не випромінюють.

Другою суперечністю є те, що повсякденний досвід свідчить про стійкість атомів. Проте внаслідок випромінювання електромагнітних хвиль енергія електронів повинна безперервно зменшуватися і вони повинні наближатися до ядра і врешті-решт «впасти» на нього. Розрахунки показують, що процес «падіння» електронів на ядро має завершитися за  $10^{-8}$  с. Таким чином, факт тривалого існування атомів несумісний з планетарною моделлю атома Резерфорда, якщо її розглядати з позиції класичної електродинаміки.

Ці суперечності свідчать про те, що класична електродинаміка і механіка Ньютона непридатні до пояснення явищ в атомі.

Тому видатний датський фізик **Н. Бор** у 1913 р. запропонував новий підхід до пояснення випромінювання світла атомами, який заснований на квантових уявленнях **М. Планка**.

Н. Бор залишив планетарну модель, але доповнив її положеннями, які, хоча і суперечать класичній електродинаміці Максвелла, відповідають дослідним даним. Ці положення, названі **постулатами Бора**, можна сформулювати таким чином.

**1. Атоми, не зважаючи на те, що електрони в них рухаються з прискоренням, можуть тривалий час знаходитися в станах, в яких вони не випромінюють.**

Ці стани отримали назву — **стаціонарний, або дозволений стан**.

**У кожному із стаціонарних станів атом може мати тільки строго певну енергію:  $E_1, E_2, E_3, \dots$**

Цим енергіям відповідають, як виявилось, стаціонарні, або дозволени, орбіти електронів, радіуси яких відносяться як квадрати чисел натурального ряду:



$$R_1 : R_2 : R_3 : \dots = 1^2 : 2^2 : 3^2 : \dots$$

2. Атом може переходити з одного стаціонарного стану в інший стаціонарний стан. Під час переходу атома з  $m$ -го стаціонарного стану з більшою енергією в  $n$ -й стан з меншою енергією атом випромінює. Частота випромінювання визначається формулою

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h},$$

де  $h$  — стала Планка,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с =  $4,136 \cdot 10^{-15}$  еВ  $\cdot$  с.

Для переходу атома із стаціонарного стану з меншою енергією в стаціонарний стан з більшою енергією атому необхідно передати порцію (квант) енергії:

$$E = E_m - E_n = h\nu.$$

Стан атома, якому відповідає найменша енергія  $E_1$ , називають **основним станом**, а стани, яким відповідають вищі енергії ( $E_2, E_3, \dots$ ), — **збудженими**.

Існування в атомі стаціонарних станів з різними енергіями отримало блискуче експериментальне підтвердження у тому ж 1913 р. у дослідях, проведених **Дж. Франком** і **Г. Герцем**.

Якщо постулати Бора справедливі, то при зіткненні з електроном атом повинен забирати енергію не від будь-яких електронів, а тільки від тих, які у момент зіткнення мають кінетичну енергію, що дорівнює різниці енергій атома в двох його стаціонарних станах:

$$\frac{m_e v^2}{2} = E_m - E_n.$$

У цьому випадку зіткнення атома з електроном буде непружним. Зіткнення атома з електронами, енергія яких менша за  $E_m - E_n$ , повинно відбуватися без передачі енергії атому (пружне зіткнення).

Якщо ж постулати Бора несправедливі, то зіткнення атома з електронами завжди повинне супроводжуватися передачею енергії.

У своїх дослідях Франк і Герц «обстрілювали» електронами атоми ртуті. Для цього з посудини, в якій знаходилася крапелька ртуті (мал. 188), ретельно відкачували повітря. Простір усередині трубки було заповнено в основному розрідженими парами ртуті. Джерелом електронів слугував підігрівний катод  $K$ . Прискорюючу напругу  $U$  підводили до ділянки катод  $K$  — циліндр  $A$ , що є в даному випадку анодом. Прискорюючу напругу можна було регулювати за допомогою потенціометра  $R$ . Набута електроном в прискорюючому полі кінетична енергія дорівнює роботі поля:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU.$$

Усередині циліндра електричного поля немає, і електрони, що влітають у нього, рухаються за інерцією з постійною швидкістю, але можуть стикатися з атомами ртуті.

Оскільки циліндр має достатньо велику довжину, то електрон під час руху в ньому неодмінно зазнає принаймні одне зіткнення з атомом. Для того, щоб встановити, якими є зіткнення електронів з атомами — пружними або непружними, — Франк і Герц застосували дотепний експериментальний метод, що отримав назву — **метод гальмівного поля**.

Ідея цього методу полягає в наступному. Якщо на електрод  $B$ , що знаходиться за циліндром зіткнень (мал. 188), названий колектором, подати невеликий (близько  $0,5\text{ В}$ ) негативний потенціал щодо циліндра, то електричне поле між циліндром зіткнень і колектором гальмуватиме рух електронів, які вилітають з циліндра. Подолати це гальмівне поле і досягти колектора можуть тільки ті електрони, кінетична енергія яких більша за  $0,5\text{ еВ}$ .

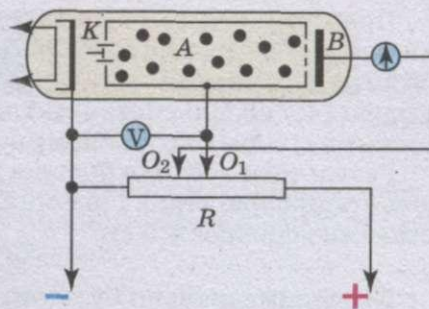
Під час досліду виявилось, що при плавному збільшенні напруги між катодом і циліндром сила струму в колі колектора, вимірювана мікроамперметром, змінюється так, як показано на графіку (мал. 189).

Спочатку зі зростанням прискорюючої напруги сила струму збільшується (ділянка  $OA$ ). Це означає, що зіткнення електронів з атомами ртуті відбуваються без передачі енергії (пружні зіткнення) і електрони, які вилітають з циліндра, долають гальмівне електричне поле на ділянці циліндр — колектор. Проте при прискорюючій напрузі  $4,9\text{ В}$  (точка  $A$  на графіку) сила струму в колі колектора різко зменшується.

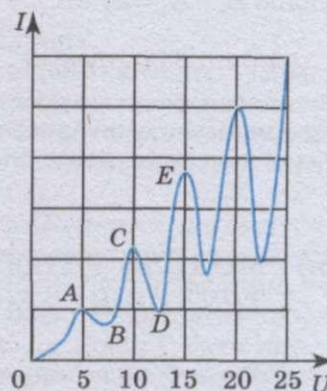
*Про що свідчить цей факт? Йому може бути тільки одне пояснення.* При кінетичній енергії, яка сягнула значення  $4,9\text{ еВ}$ , зіткнення електронів з атомами ртуті набули непружного характеру і атоми, забравши у електронів їх кінетичну енергію, перейшли у новий стаціонарний стан. Електрони ж, що віддали повністю свою кінетичну енергію, дифундують з циліндра, але не можуть подолати гальмівне електричне поле і врешті-решт осідають на циліндр.

При подальшому збільшенні напруги між катодом і циліндром сила струму в колі колектора знову зростає. Це означає, що при енергіях, більших за  $4,9\text{ еВ}$ , електрони, зазнавши непружних зіткнень з атомами і віддавши їм частину своєї енергії, зберігають ще достатню енергію для подолання гальмівного поля між циліндром і колектором. Наприклад, при напрузі між катодом і циліндром  $6\text{ В}$  електрон, що влітає в циліндр, має енергію  $6\text{ еВ}$ . Зіткнувшись з атомом ртуті, електрон віддає атому  $4,9\text{ еВ}$  і буде мати енергію  $6\text{ еВ} - 4,9\text{ еВ} = 1,1\text{ еВ}$ , якої досить для подолання гальмівного поля. Тому при напругах між катодом і циліндром, більших за  $4,9\text{ В} + 0,5\text{ В} = 5,4\text{ В}$ , сила струму в колі колектора знов зростає (ділянка  $BC$ ).

Проте при напрузі  $9,8\text{ В}$  знову спостерігається різке зменшення сили струму в колі колектора (ділянка  $CD$ ). Це викликано тим, що при такій напрузі кожен з електронів зазнає по два зіткнення з атомами і, віддавши кожному атому по  $4,9\text{ еВ}$ , не може подолати гальмівне поле між циліндром і колектором.



Мал. 188



Мал. 189

При напругах, більших за 9,8 В, сила струму в колі колектора знову почне зростати (ділянка  $DE$ ). Проте при напрузі 14,7 В знову спостерігатиметься зменшення сили струму в колі колектора. Це відбувається тому, що при енергії 14,7 еВ більшість електронів зазнають послідовно зіткнення з трьома атомами і, віддавши кожному по 4,9 еВ, не можуть подолати гальмівне поле.

Результати дослідів Франка і Герца підтверджують, що атоми ртуті мають стаціонарні стани і різниця енергії між двома першими енергетичними станами дорівнює 4,9 еВ:

$$E_2 - E_1 = 4,9 \text{ еВ.}$$

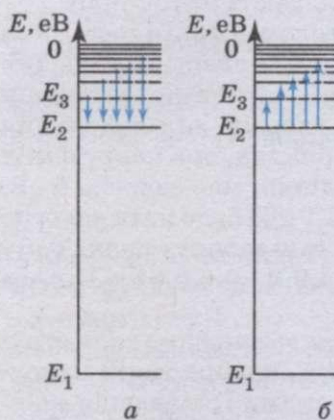
Експериментально було виявлено стаціонарні стани і у атомів інших елементів, а також виміряно різниці енергій між сусідніми станами. Так, виявилось, що для Калію  $E_2 - E_1 = 1,63 \text{ еВ}$ , для Натрію —  $E_2 - E_1 = 2,12 \text{ еВ}$ , для Гелію  $E_2 - E_1 = 21 \text{ еВ}$ .

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Вкажіть основні суперечності моделі атома Резерфорда положенням класичної фізики.
2. Сформулюйте постулати Бора і поясніть, для чого вони були введені.
3. Намалюйте схему і поясніть хід і результати дослідів Франка і Герца.

## § 45. МОДЕЛЬ АТОМА ГІДРОГЕНУ ЗА БОРОМ. ТРУДНОЩІ ТЕОРІЇ БОРА

Використовуючи закони механіки І. Ньютона і правило квантування, яке визначає можливі стаціонарні стани, Н. Бор зумів розрахувати допустимі радіуси орбіт електрона і енергії стаціонарних станів, які мають свій порядковий номер 1, 2, 3... . Мінімальний радіус орбіти визначає розміри атома. На мал. 190,  $a, б$  значення енергій стаціонарних станів (електрон-вольт) відкладено на вертикальних осях, у вигляді горизонтальних прямих наведено енергетичні стани або енергетичні рівні.



Мал. 190

Другий постулат Бора дає можливість розрахувати за відомими значеннями енергій стаціонарних станів частоти випромінювання атома Гідрогену. Теорія Бора узгоджує значення цих частот з експериментом. Усі частоти випромінювання атома Гідрогену приводять до ряду серій, кожна з яких утворюється під час переходу атома в один з енергетичних станів з усіх верхніх енергетичних станів (станів з більшою енергією).

Переходи до першого збудженого стану (на другий енергетичний рівень) з верхніх рівнів утворюють серію Бальмера. На мал. 190,  $a$  ці переходи зображено стрілками.

Червона, зелена і дві сині лінії у видимій частині спектра Гідрогену (мал. 191) відповідають переходам

$$E_3 \rightarrow E_2, E_4 \rightarrow E_2, E_5 \rightarrow E_2, E_6 \rightarrow E_2.$$



Мал. 191

Цю серію названо ім'ям **І. Бальмера**, який ще в 1885 р. на основі експерименту встановив, що частоти чотирьох ліній у видимій частині спектра Гідрогену можуть бути розраховані за такою формулою:

$$\nu = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

де  $R$  — деяка стала величина, яку називають сталою Рідберга;  $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ ;  $m \geq n + 1$ .

Ця формула отримала назву — **формула Бальмера**.

Поглинання світла — процес, протилежний випромінюванню. Атом, коли поглинає світло, переходить з нижчих енергетичних станів на вищі. При цьому він поглинає ті самі частоти, які випромінює під час переходу з вищих енергетичних рівнів на нижчі. На мал. 190, б стрілками показано переходи атома з одних станів на інші з поглинанням світла.

На основі двох постулатів і правила квантування Бор визначив радіус атома Гідрогену і енергії стаціонарних станів атома. Це дало можливість обчислити частоти електромагнітних хвиль, що їх випромінює і поглинає атом.

Найбільший успіх теорія Бора, як уже зазначалося, мала при застосуванні до атома Гідрогену, для якого виявилось можливим побудувати кількісну теорію спектра. Проте побудувати кількісну теорію вже для наступного за Гідрогеном атома Гелію за допомогою постулатів Бора не вдалося. Щодо Гелію і складніших атомів теорія Бора давала змогу робити лише якісні висновки.

Справа в тому, що теорія Бора половинчаста, внутрішньо суперечлива. З одного боку, для побудови теорії атома Гідрогену використовують звичайні закони механіки Ньютона і давно відомий закон Кулона, а з другого — вводяться квантові постулати, зовсім не зв'язані з механікою Ньютона та електродинамікою Максвелла. Введення у фізику квантових уявлень вимагало радикальної перебудови механіки і електродинаміки, що й відбулося на початку другої чверті ХХ ст., коли було створено нові фізичні теорії: квантову механіку і квантову електродинаміку.

Постулати Бора виявилися цілком правильними. Проте вони вже виступали не як постулати, а тільки як наслідки основних принципів цих теорій. Правило ж квантування Бора виявилось наближеним висновком, який не завжди є застосовним.

Уявлення про певні орбіти, по яких рухається електрон в атомі Бора, дуже умовне. Насправді ж рух електрона в атомі має мало спільного з рухом планет по орбітах. Якби атом Гідрогену в найнижчому енергетичному стані можна було сфотографувати з великою витримкою, то ми побачили б хмарку неоднакової освітленості. Більшу частину часу електрон перебуває на певній відстані від ядра. Цю відстань грубо можна вважати радіусом орбіти. Фотографія атома була б зовсім не схожою на звичний малюнок Сонячної системи, а швидше нагадувала б розпливчасту пляму, нібито фотографували метелика, який безладно пурхає біля ліхтаря.

Тепер, спираючись на квантову механіку, можна дати відповідь на будь-яке запитання, що стосується будови і властивостей електронних оболонок атомів. Але кількісна теорія дуже складна і ми не будемо її торкатися. Якісну характеристику електронних орбіт атомів наведено в курсі хімії.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. У чому виявляються суперечності між постулатами Бора і законами класичної фізики?
2. Яке випромінювання відбувається під час переходів електрона в атомі Гідрогену на нижчий енергетичний рівень? Зобразіть ці переходи стрілками на схемі енергетичних рівнів.

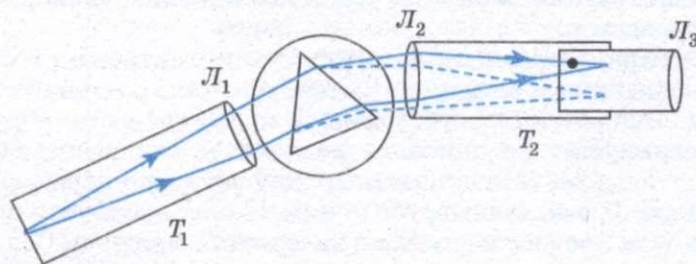
## § 46. СПЕКТРОСКОП. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Явище дисперсії світла покладено в основу пристрою призматичних спектральних приладів: спектроскопів і спектрографів. Схема призматичного спектроскопа показана на мал. 192. Він складається з труби коліматора  $T_1$ , трикутної призми і зорової труби  $T_2$ . Досліджуване світло, пройшовши через щілину і лінзу  $L_1$  труби коліматора, падає на призму, в якій відбувається спектральне розкладання світла. Лінза  $L_2$  зорової труби  $T_2$  дає зображення спектра, яке розглядається через лінзу  $L_3$  як через лупу. У спектрографах спектр фотографується на кольорову або високочутливу чорно-білу плівку. Для цього фотоапарат встановлюється на місце ока спостерігача.

Поставимо перед щілиною спектроскопа електричну лампу розжарення і за допомогою спектроскопа вивчатимемо випромінюване нею світло. При незначній силі струму нитка лампи має червоний колір. У цей момент спектр випромінюваного нею світла є смужкою червоного кольору. Поступово збільшуючи силу струму, який тече через нитку лампи, зазначаємо, що в спектрі її світла з'являться спочатку оранжева, потім по черзі жовта, блакитна, синя і, нарешті, фіолетова частини (мал. 193, 1).

Під час фотографування спектра за допомогою спеціальних фотоапаратів на фотоплівках було виявлено, що перед областю червоного світла і за областю фіолетового світла є невидимі області спектра, що отримали відповідно назву інфрачервоної і ультрафіолетової областей.

Вивчення цих несприйманих оком областей спектра показало, що ультра-



Мал. 192

фіолетовій області відповідають довжини хвиль у діапазоні від 1 до 380 нм, а інфрачервоній області — довжини хвиль у діапазоні від 760 нм до 1 мм.

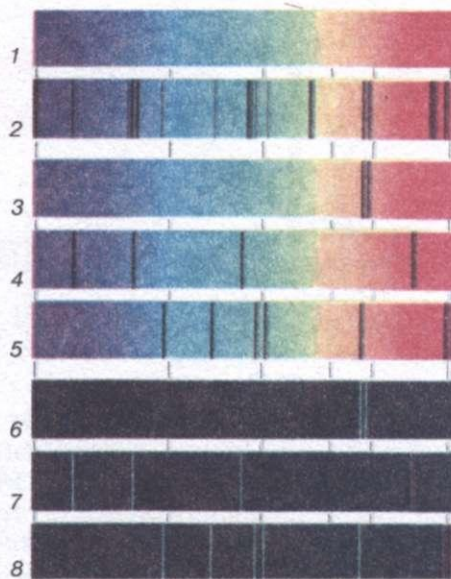
Враховуючи, що видима частина спектра лежить в межах від 380 до 760 нм, доходимо висновку, що для світла, яке випромінюється сильно нагрітим тілом, довжини хвиль лежать в інтервалі від 1 нм до 1 мм. Істотно, що в цьому інтервалі немає незайнятих проміжків, тобто спектр цього випромінювання є суцільним.

Помістимо перед щілиною спектроскопа трубку, наповнену воднем при низькому тиску (мал. 194). Під час під'єднання трубки до джерела високої напруги в ній відбувається електричний розряд і з трубки випромінюється червонувате світло. Спектр цього світла складається з декількох світлих ліній на темному фоні (мал. 193, 7). Такий спектр отримав назву **лінійчастого спектра випромінювання**.

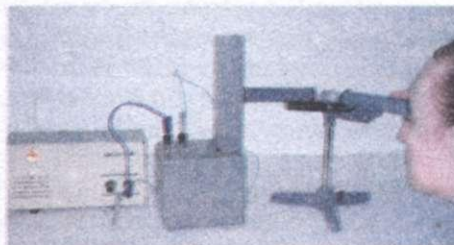
Поставивши між щілиною спектроскопа і лампою розжарення трубку, заповнену воднем (мал. 195), на тлі суцільного спектра випускання нитки лампи розжарення ми виявимо в червоній його частині декілька темних (чорних) ліній (мал. 193, 4). Такі спектри отримали назву **лінійчастих спектрів поглинання**, а самі темні лінії — **лінії поглинання**. Спектри поглинання вперше спостерігав **Г. Кірхгоф**.

Лінійчасті спектри утворюються, якщо світло випускається або поглинається речовиною в газоподібному атомарному стані. Положення темних ліній у спектрі поглинання речовини при даній температурі точно збігаються з положеннями світлих ліній у спектрі випускання цієї ж речовини при тій же температурі. Інакше кажучи, речовина в атомарному газоподібному стані при даній температурі випускає і поглинає хвилі однакових частот (**правило Кірхгофа**).

Існують ще **смугасті спектри**, які складаються з окремих смуг, розділених темними проміжками. За допомогою дуже досконалого спектрального апарата можна виявити, що кожна смуга — це сукупність великої кількос-



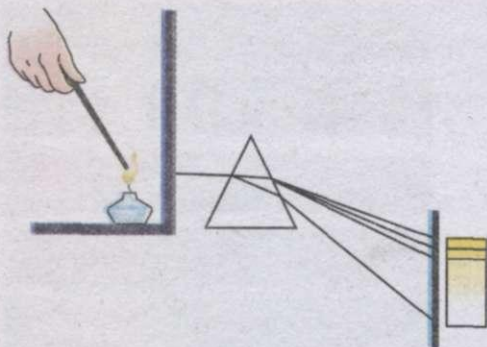
Мал. 193



Мал. 194



Мал. 195



Мал. 196

ті щільно розміщених ліній. На відміну від лінійчастих спектрів, смугасті спектри утворюються не атомами, а молекулами, що слабо зв'язані або не зв'язані між собою.

Склад речовини може бути визначений за спектром випускання (емісійний метод) або за спектром поглинання (метод абсорбції).

Якщо в затемненому приміщенні перед щілиною спектроскопа поставити спиртівку, що горить, то побачимо суцільний спектр дуже малої яскравості. Джерелом світла, що зумовлює

цей суцільний спектр, є розжарені тверді частинки в полум'ї.

Внесемо у полум'я спиртівки крупинку кухонної солі ( $\text{NaCl}$ ). Зазначимо, що полум'я забарвиться в інтенсивний жовтий колір, а в його спектрі з'являться дві дуже близько розташовані яскраві жовті лінії, що знаходяться в жовтій частині спектра (мал. 196). Те саме можна спостерігати, якщо замість кухонної солі внести до полум'я спиртівки крупинку глауберової солі ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), йодиду натрію ( $\text{NaI}$ ), сульфиду натрію ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) або карбонату натрію ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Будь-яка сіль натрію, будучи введена в полум'я спиртівки, забарвлює його в жовтий колір, в жовтій частині спектра з'являються дві яскраві, близько розташовані жовті лінії. Іншими словами, характерною межею натрію є те, що його розжарені пари дають спектр, в якому завжди присутні дві яскраві лінії в жовтій частині спектра.

Якщо через пари натрію, які знаходяться в скляній трубці, пропустити електричний струм, то ці пари світитимуться жовтим кольором. У спектрі цього випромінювання також будуть присутні вказані вище дві жовті лінії.

У 1860 р. німецькі учені Г. Кірхгоф і Р. Бунзен, вивчаючи спектри металів, встановили, що кожен метал у пароподібному стані має свій характерний лінійчастий спектр. Введення у полум'я пальника будь-якої солі одного і того ж металу завжди приводить до появи однакового лінійчастого спектра випускання.

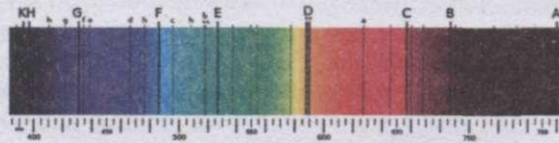
Окремі лінії у спектрах різних елементів можуть випадково збігатися, але в цілому спектр кожного елемента є його постійною і строго індивідуальною характеристикою.

Разом з тим виявилось, що при внесенні до полум'я суміші солей різних металів у спектрі одночасно з'являються всі характерні для цих металів лінії. Яскравість спектральних ліній залежить від концентрації елемента в даній суміші речовин.

Так був відкритий новий метод визначення хімічного складу речовини — **спектральний аналіз**.

**Спектральним аналізом** називають метод визначення хімічного складу складних речовин, заснований на вивченні лінійчастих спектрів цих речовин.

Виявлення в спектрі досліджуваного зразка нових, незнайомих ліній означало, що у зразку присутні домішки невідомих у той час елементів. За допомогою спектрального аналізу були відкриті спочатку Рубідій і Цезій,



Мал. 197

а потім Талій, Індій, Галій. Усього методом спектрального аналізу було відкрито 24 хімічних елементи.

Якщо сфотографувати спектр сонячного світла, отриманий за допомогою якісного спектроскопа, то на знімку будуть спостерігатися чіткі лінії поглинання (мал. 197). Вперше ці лінії описав німецький фізик **Й. Фраунгофер**, і тому вони отримали назву — **лінії Фраунгофера**. Поява цих ліній пов'язана з проходженням сонячного світла через атмосферу Сонця і частково з проходженням через атмосферу Землі. Таким чином, спектр сонячного світла — **спектр поглинання**.

Зіставляючи лінії Фраунгофера з лініями випускання різних елементів, можна встановити, які елементи входять до складу атмосфери Сонця. Зокрема, цим методом був вперше виявлений в атмосфері Сонця елемент Гелій. Пізніше Гелій виявили і на Землі.

Спектральний аналіз за спектрами поглинання використовують при вивченні хімічного складу речовин. Для проведення спектрального аналізу абсорбції досліджувану речовину спалюють в полум'ї, світло від якого прямує в спектроскоп або спектрограф. Одночасно через полум'я пропускають світло від еталонної спектральної трубки. Якщо в спектрі з'являться лінії поглинання, то це свідчить про речовину, що міститься в спектральній трубці досліджуваної речовини.

Спектральний аналіз має наступні переваги над хімічним аналізом: висока чутливість, швидкість, простота визначення і невелика маса речовини, необхідної для його проведення.

Чутливість спектрального аналізу дуже висока: з його допомогою можна виявити елемент, домішка якого в речовині становить всього одну мільйонну частку відсотка. За сприятливих умов вдається виявити речовину, яка міститься в пробі масою  $10^{-6}$  г.

Швидкість спектрального аналізу значно більша за швидкість хімічного аналізу. Тому спектральний аналіз застосовують як експрес-аналіз у металургії, в криміналістиці. Для проведення спектрального аналізу потрібно декілька десятків мікрограмів речовини. Величезне значення спектрального аналізу полягає в тому, що його можна провести, не вступаючи в безпосередній контакт з досліджуваною речовиною: в спектральному аналізі досить проаналізувати світло, яке досліджувана речовина випускає або поглинає.

## ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Накресліть схему спектроскопа і поясніть принцип його роботи.
2. Як можна отримати суцільний і лінійчастий спектри?
3. Який спектр називається смугастим?



4. Сформулюйте правило Кірхгофа.
5. Намалуйте принципову схему установки для проведення спектрального аналізу: а) емісійного; б) абсорбції.
6. Назвіть основні переваги спектрального аналізу над хімічним.



### Це цікаво знати

**Розвиток вчення про спектральний аналіз.** Кольори спектра, отримані при пропусканні пучка сонячних променів крізь призму, не чисті. Окремі кольори накладаються один на одного і одержуються змішані кольори. Ще І. Ньютон наголошував про необхідність отримання чистого спектра, в якому б кольори не накладалися один на одного. Саме у чистому спектрі добре видно, чи існують всі переходи кольорів від червоного до фіолетового, або деякі із кольорів відсутні.

У 1802 р. англійський фізик **В. Вульстен** (1766—1828) опублікував працю про заломлювальну та розсіювальну здатності різних тіл. У цій праці вчений повідомляв, що сонячний спектр не являє собою неперервний ряд усіх кольорів від червоного до фіолетового, а перерізається безліччю темних ліній. Те саме вчений спостерігав у спектрах, які давали різні розжарені тіла. І тут спектр не був неперервним, а складався зі світлих смуг з темними проміжками. Проте Вульстен не зумів пояснити походження цих темних ліній.

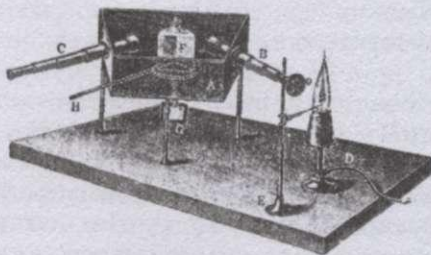
Дане явище більш детально було вивчено **І. Фраунгофером**. Учений у своїх дослідах пропускав сонячне світло через вузьку щілину в темній кімнаті. Пучок світла попадав на призму, і, виходячи з неї, поступав до зорової труби. Із об'єктива труби у полі зору з'являвся чистий спектр, який розглядали за допомогою окуляра як збільшувального скла. Фраунгофер відтворив малюнок збільшеного спектра, який він

спостерігав у зорову трубу. Наявність темних ліній у сонячному спектрі, очевидно, свідчила про відсутність у ньому певних кольорових променів. Дійсно, коли б у спектрі були всі переходи кольорів від крайнього фіолетового до крайнього червоного, то спектр мав би бути неперервний (суцільний).

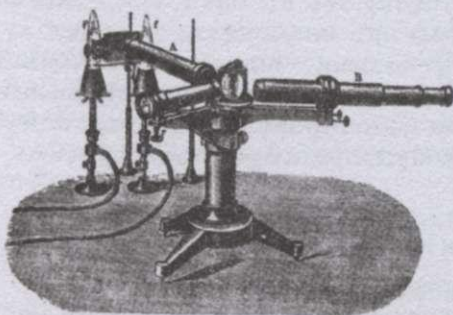
До появи робіт Кірхгофа і Бунзена не було достатньо обґрунтовано той факт, що спектральні лінії можуть характеризувати розжарену у полум'ї речовину. У доведенні цього факту вченим допоміг сконструйований ними **спектроскоп**.

Перший спектроскоп Кірхгофа і Бунзена мав конструкцію, показану на мал. 198: *F* — скляна призма, трубка *B* на одному кінці, оберненому до полум'я, мала щілину, а на другому — збиральну лінзу, яка робила паралельними промені, що йшли від щілини. Ці промені заломлювалися призмою і отримуваний спектр розглядався зоровою трубою *C* з 8-кратним збільшенням.

За допомогою спектроскопа Кірхгоф і Бунзен дослідили багато речовин, особливо



Мал. 198



Мал. 199

металів. Досліджувану речовину закріплювали на платиновій дротині і нагрівали у полум'ї бунзенової спиртівки. При високій температурі речовина перетворювалася на пару, і світло цієї розігрітої пари досліджували. Ці спостереження привели до відкриття двох нових елементів: Цезія та Рубідія. Пізніше за допомогою спектроскопа було відкрито декілька інших елементів, а саме Талій, Галій, Індій, Гелій.

Професор **Штейнгель** із Мюнхена удосконалив спектроскоп Кірхгофа, надавши йому форми, зображеної на мал. 199.

Пуста призма була замінена на масивну скляну, а крім коліматора та зорової труби з'явилася ще третя труба. Ця труба на кінці, оберненому до призми, має збиральну лінзу, а на другому кінці закрита скляною пластинкою із дрібними поділками. Промені, що виходять із цієї труби, падають на поверхню призми і відбиваються у зорову трубу так, що спостерігач бачить у полі зору, вище або нижче спектра, поділки, за допомогою яких може точно визначити положення спектральних ліній.

**Секрет Страдіварі.** Таємниця скрипок Страдіварі розгадана! Шведські хіміки стверджують, що інструменти мали таке гарне звучання тому, що майстер покривав їх особливим лаком. Склад цього лаку вдалося визначити за допомогою декількох видів аналізу, в тому числі і *спектрографічного*. Маленький шматочок лаку 200-літньої давності вдалося розкласти на основні компоненти. Потім із таких самих хімічних сполук отримали свіжий лак і покрили ним сучасні скрипки. Музичні експерти не змогли відрізнити їх за звучанням від давніх інструментів.

### Лабораторна робота №6

#### СПОСТЕРЕЖЕННЯ НЕПЕРЕРВНОГО І ЛІНІЙЧАСТОГО СПЕКТРІВ РЕЧОВИНИ

**Мета роботи:** ознайомитися з методом якісного спектрального аналізу.

**Прилади і матеріали:** спектроскоп двотрубний з відліковим мікрометричним гвинтом, трубки спектральні, прилад для засвічування спектральних трубок «Спектр», джерело електроживлення для практикуму ИВПІ-І, ключ, комплект з'єднувальних провідників, дротина із клаптиком вати на підставці, колба зі спиртом, сіль кухонна, сірники.

#### Хід роботи

1. Вставити трубку з гелієм у тримач приладу для засвічування спектральних трубок і приєднати прилад через вимикач до джерела постійного струму з напругою близько 6 В. Щілину коліматора спектрографа підвести впритул до спектральної трубки і ввімкнути джерело живлення.

2. Спостерігати через окуляр зорової труби спектроскопа, обертаючи мікрометричний гвинт, щоб поступово побачити всі спектральні лінії гелію. Переміщенням окуляра добитися їх чіткого зображення.

3. Мікрометричним гвинтом повернути зорову трубу вправо так, щоб у полі зору з'явилася крайня червона спектральна лінія. Сумістити зображення вертикальної нитки з цією лінією і записати покази мікрометра в таблицю. Мікрометричний гвинт має крок 1 мм, його головку поділено на 50 рівних частин, отже, ціна поділки шкали на головці становить 0,02 мм. Цілі міліметри відлічуйте за нерухомою шкалою на циліндрі, а соті частки — за шкалою на головці гвинта.

Колір лінії	Покази мікрометра, мм	Довжина хвилі за довідником, нм
Червона		728
Оранжева		668
Жовта		588
Зелена		502
Зелена		492
Блакитна		471
Синя		447

4. Обертаючи мікрометричний гвинт, пересувати зорову трубу до суміщення нитки з кожною з наступних спектральних ліній. Для кожної лінії записати покази мікрометра у таблицю проти зазначених довжин хвиль гелію, взятих з довідника.

5. За записами показів мікрометричного гвинта і довжинами хвиль, які відповідають цим показам, побудувати криву. Для цього на осі абсцис відкласти покази мікрометра, а на осі ординат — довжину світлових хвиль, взявши відповідний масштаб. Через знайдені точки провести плавну криву.

6. Змочити вату на дротині спиртом і закріпити її за допомогою підставки на висоті щілини коліматора. Запалити вату і спостерігати слабкий суцільний спектр. Посипати вату, на якій горить спирт, дрібною кухонною сіллю і спостерігати появу на фоні суцільного спектра яскравої жовтої лінії пари натрію. Сумістити з нею нитку і записати покази мікрометричного гвинта. Користуючись побудованою кривою, визначити довжину хвилі жовтої лінії натрію. Для цього на осі абсцис відкласти показ мікрометричного гвинта, з цієї точки опустити перпендикуляр і продовжити його до перетину з побудованою кривою. Опустити з точки перетину перпендикуляр на вісь ординат і зазначити відповідне значення довжини хвилі.

7. За результатами досліджень зробити висновок.

#### Для допитливих

1. Чому атоми кожного хімічного елемента мають строго визначений лінійчастий спектр випромінювання і поглинання?

### § 47. РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

На початку 80-х років XIX ст. український фізик І. Пуллой провів серію експериментів із газорозрядними трубками власної конструкції. У праці «Промениста електродна матерія» (1880—1882) він описав і подав схему так званої рентгенівської трубки, що являла собою скляну трубку, всередині якої містилася під кутом слюдяна пластинка, вкрита сірчаним кальцієм; під пластиною розміщувався алюмінієвий диск, що відігравав роль катода. Пуллой використовував цю трубку як флуоресцентну трубку, але вона була потужним джерелом X-променів. Зазначимо, що цю трубку Пуллой сконструював у 1882 р.

У 1896 р. німецький вчений **В. Рентген** видав свою першу працю «Попереднє повідомлення», де подав 17 тез про X-промені. До відкриття Рентгена трубками Пулюя користувалися фізики, але, на жаль, не було публікацій про виявлення за їх допомогою цих таємничих X-променів. Згодом вони отримали назву — **рентгенівське випромінювання**. І. Пулюй стверджував про існування невидимих променів і наводив їх властивості, а саме, що вони виникають на стінках скляної трубки, куди потрапляють катодні промені; не заломлюються у призмах із різних матеріалів; не відхиляються магнітним полем.

Того ж року на місяць пізніше Пулюй публікує статті «Про походження рентгенівських променів та їх фотографічну дію», а також «Додаток до праці «Про походження рентгенівських променів та їх фотографічну дію». У цих двох працях Пулюй наводить важливі експериментальні дані, яких не можна було отримати за місяць після публікацій Рентгена. Цей факт свідчить про невтомну попередню багаторічну працю українського вченого у даній галузі досліджень. Пулюй першим встановив, що X-промені викликають йонізацію газів, подав пояснення природи X-променів, за допомогою власноручно сконструйованих газорозрядних трубок першим отримав знімки скелета людини.

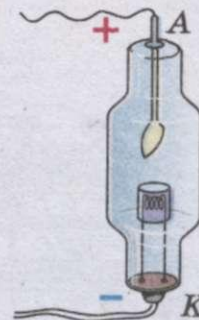
Проводячи досліди з вакуумними двоелектродними трубками, в яких площина анода (А) не паралельна площині катода (К) (мал. 200), Рентген виявив, що, коли до електродів прикладена висока напруга, навпроти катода трубки спостерігається ряд явищ, які можна пояснити лише дією деякого нового (для того часу) випромінювання: свічення скла, потемніння розчину хлористого срібла, йонізація повітря тощо. Джерелом рентгенівського випромінювання виявився анод вакуумної двоелектродної трубки.

Відразу звернула на себе увагу проникна здатність рентгенівського випромінювання. Воно викликало згадані явища навіть у тому випадку, коли трубка екранувалася чорним папером, картоном та іншими матеріалами.

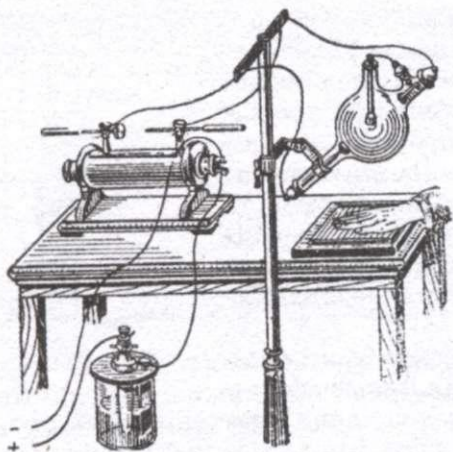
Поглинання рентгенівських променів речовиною виявилось залежним від густини речовини. Чим більша її густина, тим сильніше вона поглинає рентгенівські промені. Зокрема, м'які тканини організму людини поглинають рентгенівські промені слабше, ніж кістки. Це дозволило Рентгену зробити перший знімок кисті руки у відкритих їм невидимих променях (мал. 201).

На мал. 202 схематично показано пристрій сучасної рентгенівської трубки. У вакуумній трубці розташовані електроди: підігрівний катод і антикатод. Поверхня антикатада скошена, не паралельна поверхні катода. Катод приєднують до негативного, а антикатод до позитивного полюса джерела високої напруги. При цьому поверхня антикатада випускає пучок рентгенівських променів. Напрямок випромінювання перпендикулярний до поверхні антикатада.

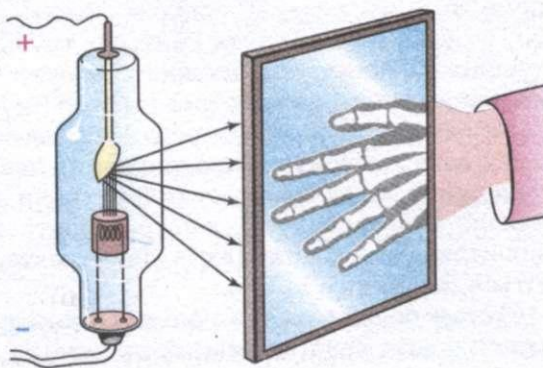
Природа рентгенівського випромінювання залишалася нез'ясованою до 1906 р., до того часу, поки не було відкрито його поляризацію. Пізніше, у 1912 р., німецькому фізику **М. Лауе** вдалося виявити дифракцію рентгенівського випромінювання. Схема досліду Лауе наведена на мал. 203, а. Пучок рентгенівського випромінювання, виділеного діафрагмами  $D_1$  і



Мал. 200



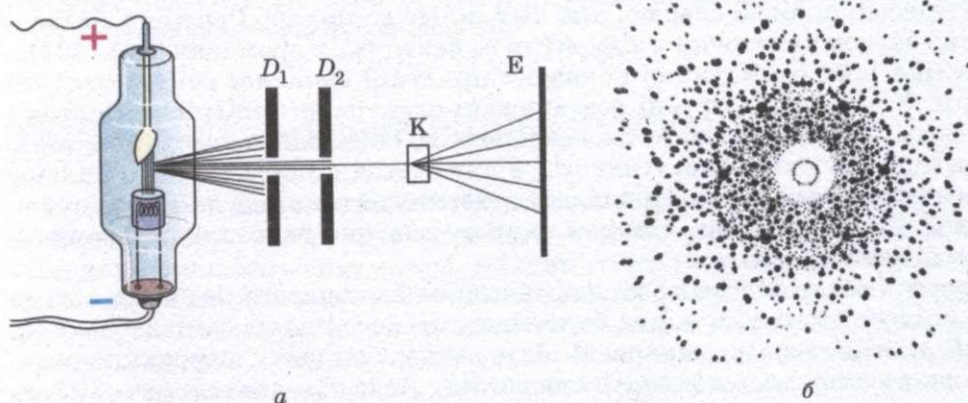
Мал. 201



Мал. 202

$D_2$ , проходячи крізь монокристал  $K$ , потрапляє на екран  $E$ . На екрані спостерігається картина, зображена на мал. 203, б, яка отримала назву — лауеграма. Лауеграма нагадує дифракційну картину, яка спостерігалася при проходженні світла крізь дві схрещені (паралельно одна одній, але так, щоб їх щілини були взаємно перпендикулярні) дифракційні ґратки.

Утворення лауеграми можна пояснити таким чином. Монокристал являє собою для рентгенівських променів своєрідні дифракційні ґратки. Вузли кристалічної ґратки слугують перешкодами, а міжвузловини залишаються прозорими. Рентгенівське випромінювання дифрагує на кристалічній ґратці і утворює дифракційні максимуми і мінімуми. Таким чином було встановлено, що рентгенівське випромінювання має хвильову природу. Відкриття поляризації рентгенівського випромінювання вказувало на те, що рентгенівське випромінювання — це поперечні хвилі. Дослідження інших властивостей цього випромінювання підтвердило, що воно має електромагнітну природу. Рентгенівські промені виявилися електромагнітним випромінюванням, подібним до світлового, але зі значно меншою довжиною хвилі.



Мал. 203

Вивчення дифракційних картин дозволило виміряти довжину хвилі рентгенівського випромінювання. Виявилось, що вона охоплює інтервал від  $10^{-14}$  до  $10^{-7}$  м.

Дослідження показали, що рентгенівське випромінювання виникає при гальмуванні речовиною антикатада швидких електронів, що випускаються катодом і розганяються електричним полем. При гальмуванні електронів їх кінетична енергія перетворюється на енергію випромінювання. Тому таке випромінювання називають гальмівним. Спектр гальмівного рентгенівського випромінювання є суцільним (мал. 204). З боку малих довжин хвиль він має різку межу.

Положення цієї межі залежить від прискорюючої напруги, тобто від енергії електронів: чим більша енергія електронів, тим менша відповідно до цієї межі довжина хвилі. Існування короткохвильової межі для гальмівного рентгенівського випромінювання легко пояснити, якщо допустити, що рентгенівське випромінювання, як і світлове, має квантовий характер, і енергія одного фотона  $E = h\nu$  визначається кінетичною енергією  $Ek = eU$  одного електрона. При такому припущенні  $eU = h\nu_{\max}$ , звідки

$$\nu_{\max} = \frac{eU}{h}.$$

Оскільки  $\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}}$ , то

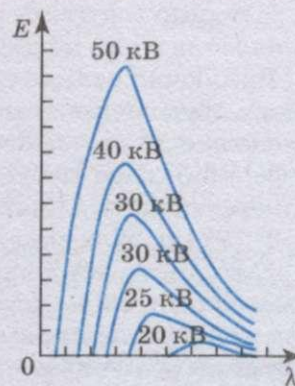
$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eU}.$$

Отримана формула виключно точно підтверджена експериментально, що доводить правильність припущення про квантовий характер рентгенівського випромінювання.

Крім того, оскільки  $\lambda_{\min}$  і  $U$  можна дуже точно виміряти на досліді, а значення швидкості поширення світла і заряду електрона були з високою точністю визначені за допомогою спеціальних експериментів, цю формулу часто використовують для визначення сталої Планка:

$$h = \frac{\lambda_{\min} eU}{c}.$$

Всім відоме використання рентгенівського випромінювання для отримання знімків окремих органів людини з метою визначення захворювань органів людини, переломів кісток (**рентгенодіагностика**). Використовують рентгенівські промені також і для лікування злоякісних пухлин (**рентгенотерапія**). Проблеми використання X-променів у медицині досліджував український вчений **М. Пильчиков**, який одним із перших почав застосовувати X-промені для потреб медицини (просвічування та діагностики захворювань). Цікаво те, що у своїх дослідях Пильчиков використовував трубку Пулюя, вдосконаливши її. М. Пильчиков провів в Україні перші дослідження проблеми радіоактивності.



Мал. 204

У техніці рентгенівськими променями просвічують деталі машин з метою виявлення в них можливих дефектів.

Виключно велике значення рентгенівського випромінювання для вивчення будови кристалів. Саме дифракційна картина, що утворюється при проходженні рентгенівських променів крізь кристали, містить найповнішу інформацію про їх будову. За дифракційною картиною визначені основні константи кристалічних ґраток.

У 1971 р. була виявлена зірка, що дає електромагнітне випромінювання в рентгенівському діапазоні. На сьогодні у Всесвіті вже виявлено понад 200 джерел рентгенівського випромінювання, крім того, існує так зване фонове рентгенівське випромінювання, що приходить на Землю з усіх ділянок неба. Космічне рентгенівське випромінювання несе цікаву і нову інформацію про процеси у Всесвіті.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Хто є відкривачем Х-променів?
2. Намалуйте схему рентгенівської трубки і поясніть, що є джерелом рентгенівських променів.
3. Яка природа рентгенівського випромінювання?
4. Поясніть механізм рентгенівського випромінювання.
5. Перерахуйте основні властивості рентгенівського випромінювання і назвіть їх практичне використання.

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. Атом випромінює фотон. Чи змінилася від цього швидкість атома?

#### Розв'язання

Змінилась на  $\frac{hv}{mc}$ , де  $m$  — маса атома,  $v$  — частота кванта, як наслідок за законом збереження імпульсу.

2. З'ясуйте, який спектр і чому виникне у газі при рекомбінаціях позитивних йонів з вільними електронами.

#### Розв'язання

Суцільний. Не зв'язані з атомом електрони до рекомбінації можуть мати будь-яку кінетичну енергію. Рекомбінуючи, вони випромінюють фотони найрізноманітніших енергій — суцільний спектр.

Спектр рентгенівського випромінювання за будь-яких напруг у короткохвильовій частині різко обривається. Поясніть цю особливість.

#### Розв'язання

Коли електрон всю свою кінетичну енергію витрачає на випромінювання, то  $\frac{mv^2}{2} = \frac{hc}{\lambda_m}$ , де  $\lambda_m$  — короткохвильова межа спектра. У деяких електронів частина їх енергії переходить у внутрішню енергію анода та інші види. Ці електрони стають джерелом рентгенівського випромінювання з довжинами хвиль  $\lambda > \lambda_m$ .

**Рівень А**

361. Які фізичні явища свідчать про складну будову атома?
362. Що називають енергією йонізації атома?
363. Під час переходу атома Гідрогену з одного енергетичного стану в інший він випустив фотон із довжиною хвилі 490 нм. На скільки зменшилась енергія атома?
364. Переходячи з деякого стану збудження в інший збуджений стан, атоми Гідрогену випромінюють фотони з енергією 1,89 еВ. Яка довжина хвилі цього випромінювання? Яким кольором світиться водень?
365. Атом Гідрогену, який перебував у другому стаціонарному стані, внаслідок поглинання фотона з енергією 2,86 еВ (фіолетова лінія спектра), переходить у п'ятий стаціонарний стан. Яка довжина хвилі цієї лінії?
366. Атом Гідрогену перебуває у стаціонарному стані з порядковим номером  $n = 3$ . Скільки фотонів із різними енергіями може випустити цей атом при переході в основний стан?
367. Внаслідок електричного розряду в розрідженому водні один із його атомів перейшов з основного стану в збуджений так, що порядковий номер стаціонарного стану змінився з  $n = 1$  на  $n = 4$ . Надалі атом повернувся із цього стану в основний, випустивши послідовно 3 фотони. Що можна сказати про енергію, яку поглинув атом, та енергію фотонів, які він випромінював?
368. Що треба зробити з крупинкою твердої речовини, щоб встановити її хімічний склад за допомогою спектрального аналізу?
369. Чому, проводячи спектральний аналіз, досліджувану речовину вміщують у полум'я газового пальника або вводять в електричну дугу?
370. Який спектр випромінювання електричної лампи розжарення? З яких променів складається це проміння? Чи є у спектрі електричної лампи розжарення ультрафіолетова частина?
371. Інертний газ гелій вперше було виявлено не в земних умовах, а на Сонці, звідки й походить його назва (з грец. *геліос* — сонячний). Поясніть, як могло відбутись таке відкриття.
372. Визначте кінетичну енергію електрона, що досяг анода рентгенівської трубки, яка працює під напругою 50 кВ.
373. Електрони, що досягли анода рентгенівської трубки, мають швидкість  $1 \cdot 10^8$  м/с. Під якою напругою працює трубка?
374. Коли крізь йонізовані шари атмосфери проходять супутники чи космічні кораблі, то вони стають джерелами рентгенівського випромінювання. Як це пояснити?
375. В електронному промені телевізійної трубки електрони, досягнувши екрана, раптово зупиняються. Чи не може виникнути при цьому рентгенівське випромінювання? Чи безпечно у зв'язку з цим дивитися телевізійні передачі?
376. Чому рентгенівську плівку зберігають у свинцевій коробці, а під час знімання її закладають в алюмінієву касету?

**Рівень В**

377. Які результати дослідів із розсіювання  $\alpha$ -частинок речовиною дозволили Резерфорду запропонувати «планетарну» модель будови атома?
378. Які експериментальні дані були покладені в основу постулатів Бора?
379. Атом Гідрогену перебував у першому збудженому стані з енергією — 3,38 еВ. Після поглинання фотона з довжиною хвилі 490 нм він перейшов у третій збуджений стан. Яка енергія атома в цьому стані?
380. Атом Оксигену внаслідок переходу із стаціонарного стану з енергією  $E_4 = -0,85$  еВ у стаціонарний стан з енергією  $E_2 = -3,38$  еВ випромінював фотон. Визначте довжину хвилі фотона.

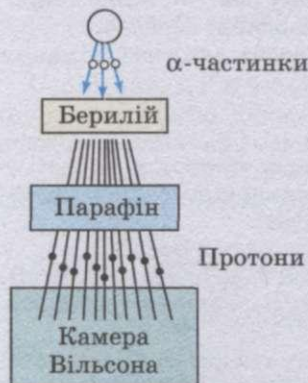


381. Згідно з теорією Бора, радіус орбіти електрона в атомі Гідрогену, який перебуває в другому стаціонарному стані, дорівнює 212 пм. Яка кінетична енергія електрона в цьому стані?
382. Для йонізації атома Нітрогену необхідна енергія 14,5 еВ. Визначте довжину хвилі випромінювання, яке може спричинити йонізацію.
383. Газовий лазер, робочим тілом якого є суміш гелію і неону, випромінює світловий пучок потужністю 50 мВт. На якій довжині хвилі працює лазер, якщо впродовж 1 хв він випромінює  $9,5 \cdot 10^{18}$  фотонів?
384. Як зміниться частота обертання електрона в атомі Гідрогену при його переході із першої орбіти на другу?
385. За допомогою спектроскопа дістали суцільний спектр. Що можна за цим спектром визначити: 1) хімічний склад речовини; 2) агрегатний стан речовини; 3) температуру речовини?
386. Яким способом можна встановити, солі яких металів присутні у воді в невеликих кількостях?
387. Які спектральні лінії з'являться під час збудження атомарного водню електронами з енергією 14 еВ?
388. Чому розріджені гази поглинають випромінювання лише певних частот, які утворюють дискретний спектр, а випромінювання інших частот проходить через них, не зазнаючи поглинання?
389. Які фізичні та хімічні властивості речовини? Яким чином вони можуть бути встановлені за допомогою спектрального аналізу?
390. Поясніть збіг спектрів випромінювання атома Гідрогену на основі теорії атома Гідрогену Бора.

#### § 48. АТОМНЕ ЯДРО. ЯДЕРНІ СИЛИ. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ АТОМНИХ ЯДЕР

У 1932 р. сталася дуже важлива для всієї ядерної фізики подія. Учень Е. Резерфорда, англійський фізик **Д. Чедвік** відкрив нову частинку — **нейтрон**.

Під час бомбардування  $\alpha$ -частинками берилію протони не виникали. Але були виявлені якісь дуже проникні промені, здатні долати таку перешкоду, як свинцева пластинка товщиною 10—20 см. Було припущено, що це  $\gamma$ -промені, які мають велику енергію.



Мал. 205

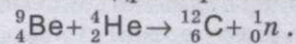
**І. Жоліо-Кюрі та Ф. Жоліо-Кюрі** виявили, що коли на шляху випромінювання берилію поставити парафінову пластинку, то йонізуюча здатність цього випромінювання різко зростає. Вони припустили, що випромінювання берилію вибиває з парафінової пластинки протони, яких багато в парафіні — речовині, що містить водень. За допомогою камери Вільсона (схему досліду наведено на мал. 205) подружжя Жоліо-Кюрі виявили ці протони і за довжиною пробігу оцінили їхню енергію. Якщо припустити, що протони прискорювалися внаслідок зіткнень з  $\gamma$ -квантами, то енергія цих квантів має бути величезною — близько 55 МеВ.

Чедвік спостерігав у камері Вільсона треки ядер Нітрогену, що зазнавали зіткнень з випромінюванням берилію. За його оцінкою енергія  $\gamma$ -квантів, здатних надати ядрам швидкість, що відповідає спостереженням, мала б дорівнювати 90 MeV. Подібні спостереження в камері Вільсона треків ядер Аргону привели до висновку, що енергія зазначених гіпотетичних  $\gamma$ -квантів має бути 150 MeV. Припускаючи, що ядра починають рухатися внаслідок зіткнень з частинками, які не мають маси спокою, дослідники помітили явні суперечності: одним і тим самим  $\gamma$ -квантам доводилося приписувати різну енергію.

Стало очевидним, що припущення про випромінювання берилієм  $\gamma$ -квантів, які не мають маси спокою, необґрунтоване. Під дією  $\alpha$ -частинок з берилію вилітають якісь досить важкі частинки, бо лише від зіткнення з важкими частинками протони або ядра Нітрогену й Аргону могли набути такої величезної енергії, яка спостерігалася. Оскільки ці частинки мали велику проникну здатність і безпосередньо не йонізували газ, то, очевидно, вони були електрично нейтральні. Адже заряджена частинка сильно взаємодіє з речовиною і тому швидко втрачає свою енергію.

Нову частинку назвали **нейтроном**. Її існування передбачав Резерфорд більш ніж за 10 років до дослідів Чедвіка. За енергією та імпульсом ядер, що стикаються з нейтронами, визначили їхню масу. Виявилось, що вона трохи більша від маси протона — 1838,6 електронних мас проти 1836,1 для протона.

Через попадання  $\alpha$ -частинок в ядра Берилію відбувається така реакція:



Заряд нейтрона дорівнює нулю, а відносна маса — приблизно одиниці.

Одразу після того, як у досліді Чедвіка було відкрито нейтрон, відомі фізики **Д. Іваненко** і **В. Гейзенберг** у 1932 р. запропонували **протонно-нейтронну модель ядра**, згідно з якою ядра атомів складаються з елементарних частинок двох видів: **протонів і нейтронів**.

Кількість протонів в ядрі дорівнює кількості електронів в атомній оболонці, тому що в цілому атом нейтральний. Отже, кількість протонів в ядрі дорівнює атомному номеру елемента  $Z$  у Періодичній таблиці елементів **Д. І. Менделєєва**.

Масовим числом  $A$  називають суму числа протонів  $Z$  і числа нейтронів  $N$  в ядрі:

$$A = Z + N.$$

Маси протона і нейтрона близькі між собою і кожна з них приблизно дорівнює атомній одиниці маси. Маса електрона в атомі значно менша від маси ядра. Тому масове число ядра дорівнює округленій до цілого числа відносній атомній масі елемента. Масові числа можна визначити грубим вимірюванням мас ядер навіть не дуже точними приладами.

**Ізотопи** — це ядра з одним і тим самим значенням  $Z$ , але з різними масовими числами  $A$ , тобто з різною кількістю нейтронів  $N$ .

Оскільки ядра досить стійкі, то протони і нейтрони мають триматися в ядрі якимись силами, причому дуже великими. *Що це за сили?* Завчасно можна сказати, що це не гравітаційні сили, які занадто слабкі. Стійкість ядра не можна пояснити також електромагнітними силами, тому що між однойменно зарядженими протонами діє електричне відштовхування, а нейтрони не мають електричного заряду.

Отже, між ядерними частинками — протонами і нейтронами (нуклонами) — діють особливі сили. Назва для них знайшлася сама по собі — **ядерні сили**.

Ці сили приблизно в 100 разів більші від електромагнітних. Це найпотужніші сили з усіх, що є в природі. Тому **взаємодію ядерних частинок часто називають сильною взаємодією**. Причому сильна взаємодія не зводиться лише до взаємодії нуклонів в ядрі. Це особливий вид взаємодії, властивий багатьом елементарним частинкам разом з електромагнітною взаємодією.

Інша важлива особливість ядерних сил — це їх короткодіючий характер. Електромагнітні сили порівняно повільно зменшуються з відстанню.

Дуже важливу роль в усій ядерній фізиці відіграє поняття — **енергія зв'язку ядра**. Під енергією зв'язку ядра розуміють ту енергію, яка потрібна для повного розщеплення ядра на окремі нуклони. Спираючись на закон збереження енергії, можна також стверджувати, що **енергія зв'язку дорівнює тій енергії, яка виділяється під час утворення ядра з окремих частинок**. Енергія зв'язку атомних ядер дуже велика. *Але як її визначити?*

Зробити відповідні розрахунки можна лише, застосувавши співвідношення Ейнштейна між масою і енергією:

$$E = mc^2.$$

Точні вимірювання мас ядер показують, що маса спокою ядра  $M_{\text{я}}$  завжди менша від суми мас спокою його протонів і нейтронів:

$$M_{\text{я}} < Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}}.$$

Існує так званий дефект мас:

$$\Delta M = Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}} - M_{\text{я}},$$

різниця мас додатна. Зокрема, для Гелію маса ядра на 0,75% менша від суми мас двох протонів і двох нейтронів. Отже, для одного моля Гелію  $\Delta M = 0,03$  г.

Зменшення маси під час утворення ядра з частинок означає, що при цьому зменшується енергія цієї системи частинок на значення енергії зв'язку  $E_{\text{зв}}$ :

$$E_{\text{зв}} = \Delta Mc^2 = (Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}} - M_{\text{я}})c^2.$$

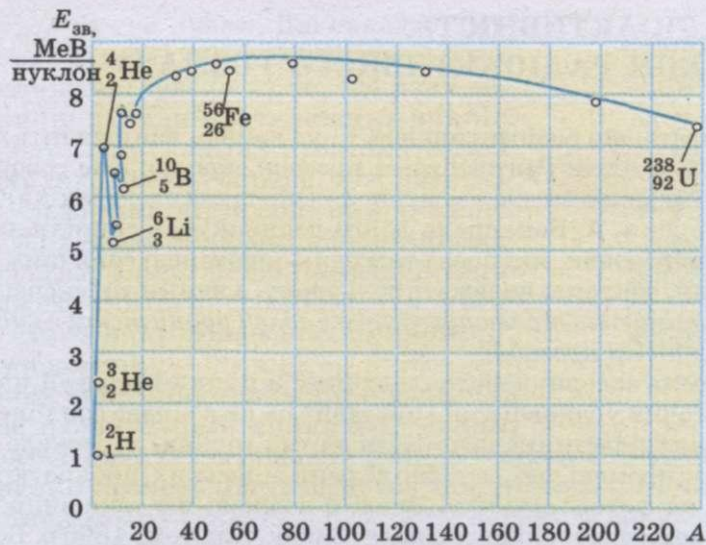
*Але куди при цьому зникає енергія  $E_{\text{зв}}$  і маса  $\Delta M$ ?*

Під час утворення ядра з частинок вони під дією ядерних сил на малих відстанях прямують одна до одної з величезним прискоренням. Випромінювані при цьому  $\gamma$ -кванти мають енергію  $E_{\text{зв}}$  і масу:

$$\Delta M = \frac{E_{\text{зв}}}{c^2}.$$

Про значення енергії зв'язку можна судити з такого прикладу: під час утворення 4 г гелію виділяється стільки ж енергії, як від згоряння 1,5—2 вагонів кам'яного вугілля.

Важливу інформацію про властивості ядер дає експериментально виміряна залежність **питомої енергії зв'язку**, тобто енергії зв'язку, що припадає на один нуклон, від масового числа  $A$ .



Мал. 206

З мал. 206 добре видно, що коли не брати до уваги найлегші ядра, то питома енергія зв'язку приблизно стала і дорівнює 8 MeV/нуклон. Зазначимо, що енергія зв'язку електрона з ядром в атомі Гідрогену, яка дорівнює енергії йонізації, майже в мільйон разів менша. Крива на мал. 206 має слабо виявлений максимум. Максимальну питому енергію зв'язку (8,6 MeV/нуклон) мають елементи з масовим числом від 50 до 60, тобто залізо і близькі до нього за порядковим номером елементи. Ядра цих елементів найстійкіші.

Зменшення питомої енергії зв'язку для легких елементів пояснюється поверхневими ефектами. Нуклони, які містяться на поверхні ядра, взаємодіють з меншою кількістю сусідів, ніж нуклони всередині ядра, оскільки ядерні сили короткодіючі. Тому енергія зв'язку нуклонів на поверхні менша, ніж у нуклонів усередині ядра. Чим менше ядро, тим більша частина загальної кількості нуклонів виявляється на поверхні. Через це енергія зв'язку в середньому на один нуклон менша в легких ядрах.

У важких ядрах питома енергія зв'язку зменшується внаслідок зростання із збільшенням  $Z$  кулонівської енергії відштовхування протонів. Кулонівські сили намагаються розірвати ядро.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що дало поштовх для створення протонно-нейтронної моделі ядра атома? Хто з учених до цього причетний?
2. Що таке нуклон?
3. Що таке енергія зв'язку атомних ядер? Як вона визначається?
4. Розгляньте графік залежності питомої енергії зв'язку від масового числа (мал. 206). Вкажіть елементи, які мають питому енергію зв'язку 5—8 MeV/нуклон.

## § 49. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ

Ви вже знаєте, що радіоактивність — це явище, яке свідчить про складну будову атомного ядра. Рентгенівські промені, про що вже говорили в § 47, вперше були одержані внаслідок зіткнення швидких електронів з антикатодом розрядної трубки. А. Беккерель довго досліджував споріднене явище — післясвічення речовин, які перед тим були опромінені сонячним світлом. До таких речовин, зокрема, належать солі урану, з якими він експериментував.

*А чи не виникають після опромінення солей урану разом з видимим світлом і рентгенівські промені?*

А. Беккерель загорнув фотопластинку в цупкий чорний папір, зверху поклав шматочки уранової солі і виставив це на яскраве сонячне світло. Під час проявлення пластинка почорніла на тих місцях, де лежала сіль. Отже, уран випускає промені, які, подібно до рентгенівських, пронизують непрозорі тіла і діють на фотопластинку. Вчений вважав, що таке випромінювання виникає під впливом сонячного світла. Однак, в лютому 1896 р. Беккерелю не вдалося зробити черговий дослід і він поклав пластинку, на якій лежав мідний хрест, вкритий сіллю урану, в ящик стола. Проявивши на всяк випадок пластинку через два дні, він виявив на ній почорніння у вигляді виразної тіні хреста. Це означало, що солі урану спонтанно, без впливу зовнішніх чинників утворюють якесь проміння.

Незабаром Беккерель виявив, що промені уранової солі йонізують повітря так само, як і рентгенівські, і тому розряджають електроскоп. Випробовуючи різні хімічні сполуки урану, він установив дуже важливий факт: інтенсивність випромінювання визначається лише кількістю урану в препараті і зовсім не залежить від того, до яких сполук він входить. Отже, це властивість не сполук, а хімічного елемента урану, його атомів.

У 1898 р. у Франції Марія Склодовська-Кюрі та інші вчені виявили випромінювання торію. Особливо плідною у пошуках нових елементів виявилася праця подружжя Марії і П'єра Кюрі. Систематичне дослідження руд, що містять уран і торій, дало їм можливість виділити новий, ще невідомий хімічний елемент полоній, названий так на честь батьківщини Марії Склодовської-Кюрі — Польщі.

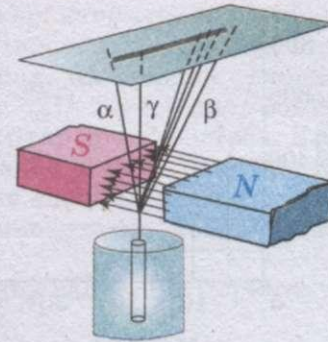
Нарешті, було відкрито ще один елемент, якому властиве дуже інтенсивне випромінювання. Його назвали радієм (тобто променистим). Саме ж явище спонтанного випромінювання подружжя Кюрі назвало **радіоактивністю**.

Після відкриття радіоактивних елементів почалося дослідження фізичної природи їхнього проміння. Крім Беккереля й подружжя Кюрі, над цим питанням почав працювати Резерфорд.

Класичний дослід, який допоміг виявити склад радіоактивного випромінювання, полягав у такому. Радіоактивний препарат вміщували на дно вузького каналу в шматку свинцю. Проти каналу розташовували фотопластинку. На проміння, яке виходило з каналу, діяли сильним магнітним полем (мал. 207), перпендикулярним до нього. Всю установку розміщали у вакуумі.

Якщо не було магнітного поля, то на проявленій пластинці було виявлено одну тільки темну пляму, точно проти каналу. У магнітному ж полі пу-

чок розпадався на три пучки. Дві складові первинного потоку відхилялись у протилежні боки. Це переконливо вказувало на те, що вони мають електричні заряди протилежних знаків. При цьому негативну складову проміння магнітне поле відхиляло значно більше, ніж позитивну. Третю складову магнітне поле не відхиляло. Позитивно заряджена складова випромінювання отримала назву альфа-випромінювання, негативно заряджена — бета-випромінювання, а нейтральна — гамма-випромінювання ( $\alpha$ -промені,  $\beta$ -промені,  $\gamma$ -промені).



Мал. 207

Ці три види випромінювання дуже різняться між собою за проникною здатністю, тобто за тим, наскільки інтенсивно їх поглинають різні речовини. Найменшу проникну здатність мають  $\alpha$ -промені. Шар паперу товщиною близько 0,1 мм для них вже непрозорі. Якщо отвір у свинцевій пластинці прикрити аркушиком паперу, то на фотопластинці не буде плями, що відповідає  $\alpha$ -променям.

Значно менше поглинаються речовиною  $\beta$ -промені. Алюмінієва пластинка затримує їх цілком лише тоді, коли її товщина досягає кількох міліметрів. Найбільшу проникну здатність мають  $\gamma$ -промені. Інтенсивність їх поглинання збільшується зі зростанням атомного номера речовини-поглиначка. Але й шар свинцю товщиною сантиметр — не перешкода для цих променів. Від проходження крізь таку пластинку їхня інтенсивність зменшується лише в два рази. Це пов'язано з тим, що фізична природа  $\alpha$ -,  $\beta$ - і  $\gamma$ -променів різна.

А. Ейнштейн і Ф. Содді встановили, що атомам деяких елементів властивий спонтанний розпад, який супроводжується випромінюванням величезної кількості енергії порівняно з енергією, яка вивільняється в процесі звичайних молекулярних видозмін.

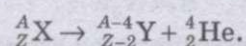
Після того як було відкрито атомне ядро, відразу стало зрозуміло, що саме воно зазнає змін під час радіоактивних перетворень. Адже  $\alpha$ -частинок взагалі немає в електронній оболонці, а зменшення кількості електронів оболонки на одиницю перетворює атом в йон, а не на новий хімічний елемент. Виліт ж електрона з ядра змінює заряд ядра (збільшує його) на одиницю.

Спонтанне перетворення одних ядер в інші, яке супроводжується випромінюванням різних частинок, отримало назву **радіоактивність**.

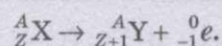
Перетворення ядер відбуваються за так званим правилом зміщення, яке вперше сформулював Содді:

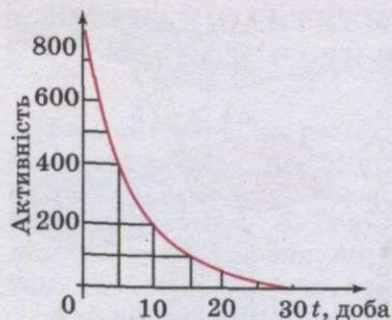
під час  $\alpha$ -розпаду ядро втрачає позитивний заряд  $2e$  і маса його зменшується приблизно на чотири одиниці атомної маси. Отже, елемент зміщується на дві клітинки до початку Періодичної таблиці елементів Д. І. Менделєєва.

Символічно це можна записати так:



У випадку  $\beta$ -розпаду з ядра вилітає електрон. Тому заряд ядра збільшується на одиницю, а маса залишається майже незмінною:





Мал. 208

Після  $\beta$ -розпаду елемент зміщується на одну клітинку ближче до кінця Періодичної таблиці елементів Д. І. Менделєєва.

Під час  $\gamma$ -випромінювання не відбувається зміни заряду; маса ж ядра змінюється надзвичайно мало.

Правила зміщення показують, що під час радіоактивного розпаду зберігається електричний заряд і наближено зберігається відносна атомна маса ядер.

Нові ядра, що утворюються під час радіоактивного розпаду, звичайно, також є радіоактивними.

Досліджуючи перетворення радіоактивних речовин, Резерфорд експериментально встановив, що їх активність з часом зменшується. Так, активність радону зменшується в два рази вже через 1 хв. Активність таких елементів, як Уран, Торій і Радій, також з часом зменшується, але значно повільніше. Для кожної радіоактивної речовини є певний інтервал часу, протягом якого активність зменшується у два рази. Цей інтервал називається періодом піврозпаду.

**Період піврозпаду  $T$**  — це той час, за який розпадається половина всієї кількості наявних радіоактивних атомів.

Адже зменшення активності препарату в два рази можна досягти простим поділом його на дві рівні частини.

Графік спаду активності, тобто кількості розпадів за секунду, залежно від часу для однієї з активних речовин наведено на мал. 208, період піврозпаду цієї речовини — 5 діб.

Знайдемо тепер математичну формулу закону радіоактивного розпаду. Нехай кількість радіоактивних атомів у початковий момент часу ( $t = 0$ ) дорівнює  $N_0$ . Тоді по закінченні періоду піврозпаду їх кількість дорівнюватиме  $N_0/2$ , а ще через один такий інтервал часу їх кількість становитиме:

$$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

Через інтервал часу  $t = nT$ , тобто через  $n$  періодів піврозпаду  $T$ , радіоактивних атомів залишиться

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}.$$

Оскільки  $n = \frac{t}{T}$ , то

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Це і є основний закон радіоактивного розпаду.

За формулою  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$  знаходять кількість атомів, які ще не розпались, для будь-якого моменту часу.

Період піврозпаду — основна величина, що характеризує швидкість радіоактивного розпаду. Чим менший період піврозпаду, тим менший час життя атомів, тим швидше відбувається розпад. Для різних речовин значення його дуже розрізняються: Так, для урану  $^{239}_{92}\text{U}$   $T \approx 4,5$  млрд років. Саме через це активність урану за кілька років помітно не змінюється. Для радію  $T \approx 1600$  років. Тому активність радію значно більша, ніж урану. Чим менший період піврозпаду, тим інтенсивніше відбувається розпад. Є радіоактивні елементи, в яких період піврозпаду становить мільйонні частки секунди.

Закон радіоактивного розпаду — це статистичний закон. Він справджується в середньому для великої кількості частинок.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке радіоактивність?
2. Які види випромінювання ви знаєте?
3. Хто сформулював правила зміщення?
4. Що таке період піврозпаду?
5. У чому полягає закон радіоактивного розпаду?

## § 50. ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ

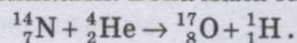
Попередньо ми з'ясували, що внаслідок взаємодії частинок відбуваються реакції, які отримали назву ядерних.

Зміна атомних ядер внаслідок їх взаємодії з елементарними частинками і між собою називається ядерною реакцією.

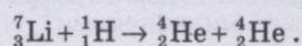
Ядерні реакції відбуваються тоді, коли частинки впритул наближаються до ядра і потрапляють у сферу дії ядерних сил. Одноіменно заряджені частинки взаємно відштовхуються. Тому зближення позитивно заряджених частинок з ядрами (чи ядер між собою) можливе, якщо цим частинкам (або ядрам) надати великої кінетичної енергії. Таку енергію надають протонам, дейтронам,  $\alpha$ -частинкам та іншим важчим ядрам за допомогою прискорювачів елементарних частинок та йонів.

Для здійснення ядерних реакцій вони ефективніші, ніж  $\alpha$ -частинки, що їх випромінюють природні радіоактивні елементи. Їм можна надати значно більшої енергії (порядку  $10^5$  MeV), ніж та, яку мають  $\alpha$ -частинки (максимально 9 MeV). Можна використати також протони, які не з'являються в процесі радіоактивного розпаду. А також можна прискорити ядра, важчі, ніж ядра Гелію.

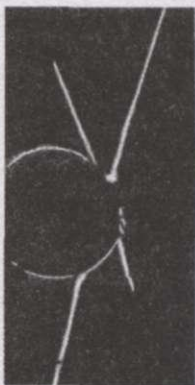
Першу штучну ядерну реакцію здійснив Е. Резерфорд, який «бомбардував» ядра Нітрогену  $\alpha$ -частинками. Вона мала такий вигляд:



Перше перетворення атомних ядер за допомогою протонів великої енергії, добутих на прискорювачі, було здійснене в 1932 р., коли вдалося розщепити Літій на дві  $\alpha$ -частинки:







Мал. 209

Як видно на фотографії треків у камері Вільсона (мал. 209), ядра Гелію розлітаються в різні боки вздовж однієї прямої відповідно до закону збереження імпульсу (імпульс протона значно менший від імпульсів  $\alpha$ -частинок, що виникають).

У розглянутій ядерній реакції кінетична енергія двох утворених ядер Гелію виявилась більшою від кінетичної енергії протона, який вступив у реакцію, на 7,3 MeV. Перетворення ядер супроводжується зміною їх внутрішньої енергії (енергія зв'язку). У реакції питома енергія зв'язку в ядрах Гелію більша від питомої енергії зв'язку в ядрі Літію. Тому частина внутрішньої енергії ядра Літію перетворюється в кінетичну енергію  $\beta$ -частинок, які розлітаються.

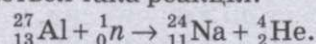
Зміна енергії зв'язку ядер означає, що сумарна енергія спокою частинок і ядер, які беруть участь у реакціях, не залишається сталою. Адже енергія спокою ядра  $M_{\text{я}}c^2$  відповідно до формули  $E_{\text{зв}} = \Delta Mc^2 = (Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}} - M_{\text{я}})c^2$  посередньо виражається через енергію зв'язку. За законом збереження енергії зміна кінетичної енергії в процесі ядерної реакції дорівнює зміні енергії спокою ядер і частинок, які беруть участь у реакції.

Енергетичним виходом ядерної реакції називається різниця енергії спокою ядер і частинок до реакції і після реакції.

Отже, енергетичний вихід ядерної реакції дорівнює також зміні кінетичної енергії частинок, що беруть участь у реакції.

Відкриття нейтрона було поворотним пунктом у дослідженні ядерних реакцій. Оскільки нейтрони не мають заряду, то вони без перешкод проникають в атомні ядра і спричиняють їх перетворення.

Наприклад, спостерігається така реакція:



Відомий італійський фізик **Е. Фермі**, який першим почав вивчати реакції, що спричиняються нейтронами, виявив наступне: ядерні перетворення зумовлюються навіть повільними нейтронами. Причому ці повільні нейтрони здебільшого навіть ефективніші, ніж швидкі. Тому швидкі нейтрони доцільно спочатку сповільнювати. Сповільнюються нейтрони до теплових швидкостей у звичайній воді. Цей ефект пояснюється тим, що у воді є багато ядер Гідрогену — протонів, маса яких майже дорівнює масі нейтронів. А під час зіткнення куль однакової маси найбільш інтенсивно передається кінетична енергія. Під час центрального зіткнення нейтрона з протоном, що перебуває в стані спокою, він повністю передає протону свою кінетичну енергію.

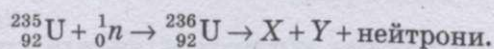
### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке ядерна реакція?
2. Які ядерні реакції були проведені вперше?
3. Що таке енергетичний вихід ядерної реакції?
4. У чому полягає основна відмінність ядерних реакцій на нейтронах від ядерних реакцій, спричинених зарядженими частинками?

### § 51. ЛАНЦЮГОВА РЕАКЦІЯ ПОДІЛУ ЯДЕР УРАНУ

Поділ атомних ядер — це особливий вид ядерних реакцій, коли ядро важкого елемента ділиться на дві частини, одночасно випромінюючи дватри нейтрони,  $\gamma$ -промені і значну кількість енергії. Це дає можливість здійснити ланцюгову ядерну реакцію.

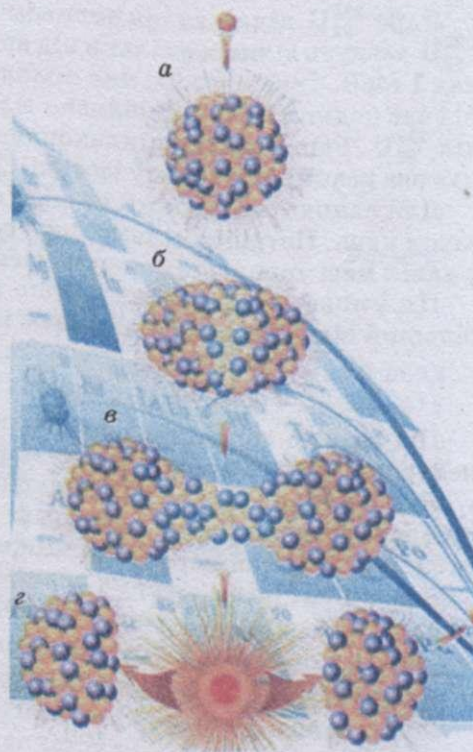
Поділ ядер Урану відкрили в 1938 р. німецькі вчені **О. Ган** і **Ф. Штрассман**. Їм удалося встановити, що під час бомбардування Урану нейтронами виникають елементи середньої частини Періодичної системи: Варій, Криптон та ін. Проте правильно пояснили цей факт, а саме, як поділ ядра Урану, що захопило нейтрон, — англійський фізик **О. Фріш** і австрійський фізик **Л. Мейтнер** у 1939 р. Вони вважали, що ядро Урану, захопивши повільний нейтрон, перетворюється в ядро радіоактивного ізотопа Урану  ${}_{92}^{239}\text{U}$ , яке розпадається на дві приблизно рівні частини  $X$  і  $Y$ , при цьому виділяється декілька нейтронів. Реакція відбувається за схемою:



Процес поділу атомного ядра можна пояснити за допомогою краплинної моделі ядра. За цією моделлю згусток нуклонів має нагадувати краплину зарядженої рідини (мал. 210, *a*). Ядерні сили між нуклонами короткодійчі, подібно до сил, що діють між молекулами рідини. Одночасно з великими силами електростатичного відштовхування між протонами, які намагаються розірвати ядро на частини, діють ще більші ядерні сили притягання. Ці сили не дають ядру розпастися.

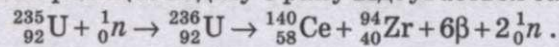
Ядро Урану має форму кулі. Захопивши зайвий нейтрон, ядро збуджується і починає деформуватися, набуваючи витягнутої форми (мал. 210, *b*). Ядро розтягується доти, поки сили відштовхування між кінцями витягнутого ядра не переважатимуть сили зчеплення, які діють на перешийку (мал. 210, *в*). Розтягуючись дедалі дужче, ядро розривається на дві частини (мал. 210, *г*). Під дією кулонівських сил відштовхування ці частини, чи уламки, розлітаються зі швидкістю, що дорівнює  $1/30$  швидкості світла.

Більш пізні дослідження показали, що внаслідок бомбардування ядер Урану нейтронами можуть утворюватися уламки 80 «сортів». Причому найбільш вірогідним виявляється поділ на уламки, маси яких відносяться приблизно, як 2:3.



Мал. 210

з можливих реакцій поділу Урану відбувається за схемою:



Кінетичний вихід такої реакції становить 208 МеВ.

Для порівняння вкажемо, що енергія, яка виділяється при одному акті Гідрогену в Оксигені, дорівнює 10 еВ.

Отже, реакція поділу ядер Урану відбувається з виділенням енергії. Ця енергія відноситься уламками і нейтронами у вигляді їх кінетичної енергії,  $\gamma$ -випромінюванням під час супроводу цієї реакції.

### ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яке ланцюгова ядерна реакція?

2. Відкрив і пояснив поділ ядер Урану?

3. Елементи утворюються під час поділу ядер Урану?

4. Енергія виділяється під час поділу ядер Урану?

## ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Елемент Уран складається переважно з двох ізотопів:  ${}_{92}^{235}\text{U}$  і  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Але  ${}_{92}^{235}\text{U}$  становить лише 1/140 частину набагато поширенішого ізотопу

${}_{92}^{238}\text{U}$  діляться під впливом швидких і повільних нейтронів. Ядра ж  ${}_{92}^{235}\text{U}$  можуть ділитися тільки під впливом швидких нейтронів з енергією понад 1 МеВ. Таку енергію має приблизно 60% нейтронів, що вивільняються при поділі. Проте приблизно тільки один нейтрон з п'яти спричинює поділ. Решта нейтронів захоплюється цим ізотопом без поділу. Тому ланцюгова реакція у чистому ізотопі  ${}_{92}^{238}\text{U}$  неможлива.

Ланцюгової реакції не обов'язково, щоб кожний нейтрон спричинив поділ. Потрібно тільки, щоб середня кількість вивільнених нейтронів за часі урану не зменшувалася з часом.

Коефіцієнт розмноження нейтронів  $k$  визначається, якщо  $k \geq 1$ , то реакція виконується, якщо  $k < 1$ , реакція зупиняється,  $k = 1$  від одиниці або дорівнює їй.

Коефіцієнт розмноження нейтронів називають відношення кількості нейтронів в наступному поколінні до кількості нейтронів попереднього покоління.

Важливою мірою «покоління» розуміють поділ ядер, при якому поглинаються нейтрони старого покоління і народжуються нові нейтрони.

Якщо  $k \geq 1$ , то кількість нейтронів з часом збільшується або не змінюється. Якщо  $k < 1$ , кількість нейтронів з часом зменшується і ланцюгова реакція неможлива.

Коефіцієнт розмноження визначається такими чотирма чинниками:

1. Коефіцієнт розмноження повільних нейтронів ядрами  ${}_{92}^{235}\text{U}$  з наступним поділом їх або захопленням швидких нейтронів ядрами  ${}_{92}^{235}\text{U}$  та  ${}_{92}^{238}\text{U}$  також з наступним поділом.

2. Коефіцієнт розмноження нейтронів ядрами  ${}_{92}^{238}\text{U}$  і  ${}_{92}^{235}\text{U}$  без поділу.

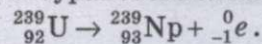
3. Коефіцієнт розмноження нейтронів продуктами поділу, сповільнювачем та конструктивними елементами установки.

4. Втрати нейтронів назовні з речовини, яка ділиться.

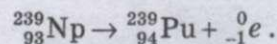
Тільки перший процес супроводиться збільшенням кількості нейтронів (переважно за рахунок поділу  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ). У решті процесів кількість нейтронів зменшується. У чистому ізотопі  ${}^{238}_{92}\text{U}$  ланцюгова реакція неможлива, оскільки при цьому  $k < 1$  (нейтронів, що захоплюються ядрами без поділу, більше, ніж нейтронів, що знову утворюються при поділі ядер).

Для стаціонарної ланцюгової реакції коефіцієнт розмноження нейтронів має дорівнювати одиниці. І цієї умови потрібно дотримуватись з великою точністю. Якщо  $k$  буде дорівнювати 1,01, то майже вмиг станеться вибух.

Важливе значення має захоплення повільних нейтронів ядрами ізотопу Урану  ${}^{238}_{92}\text{U}$  без поділу. Після захоплення утворюється радіоактивний ізотоп  ${}^{239}_{92}\text{U}$  з періодом піврозпаду 23 хв. Розпад відбувається з випромінюванням електрона і виникненням трансуранового елемента — **Нептунію**:



Нептуній у свою чергу  $\beta$ -радіоактивний з періодом піврозпаду близько двох днів. У процесі розпаду Нептунію утворюється інший трансурановий елемент — **Плутоній**:



Плутоній відносно стабільний, оскільки його період піврозпаду великий — порядку 24 000 років. Важливою властивістю Плутонію є те, що він ділиться під впливом повільних нейтронів, так само як ізотоп  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Тому за допомогою Плутонію також можна здійснити ланцюгову реакцію, що супроводиться виділенням величезної кількості енергії.

**Пристрій, в якому підтримується керована реакція поділу ядер, називається ядерним (або атомним) реактором.**

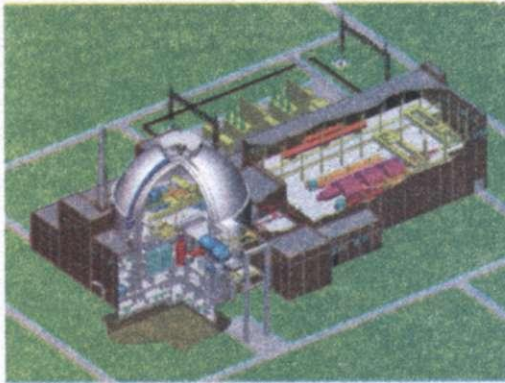
Ядра Урану, особливо ядра ізотопу  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , найбільш ефективно захоплюють повільні електрони. Причому ймовірність захоплення повільних нейтронів у сотні разів більша, ніж швидких. Тому в ядерних реакторах, що діють на природному Урані, застосовують сповільнювачі нейтронів і цим підвищують коефіцієнт розмноження нейтронів. Процеси, що відбуваються в ядерному реакторі, схематично подано на мал. 211.

На мал. 212, а показано розріз АЕС, 212, б — схему енергетичної установки з ядерним реактором, на мал. 212, в — будову ядерного реактора.

Основні елементи ядерного реактора: **ядерне паливе** ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ,



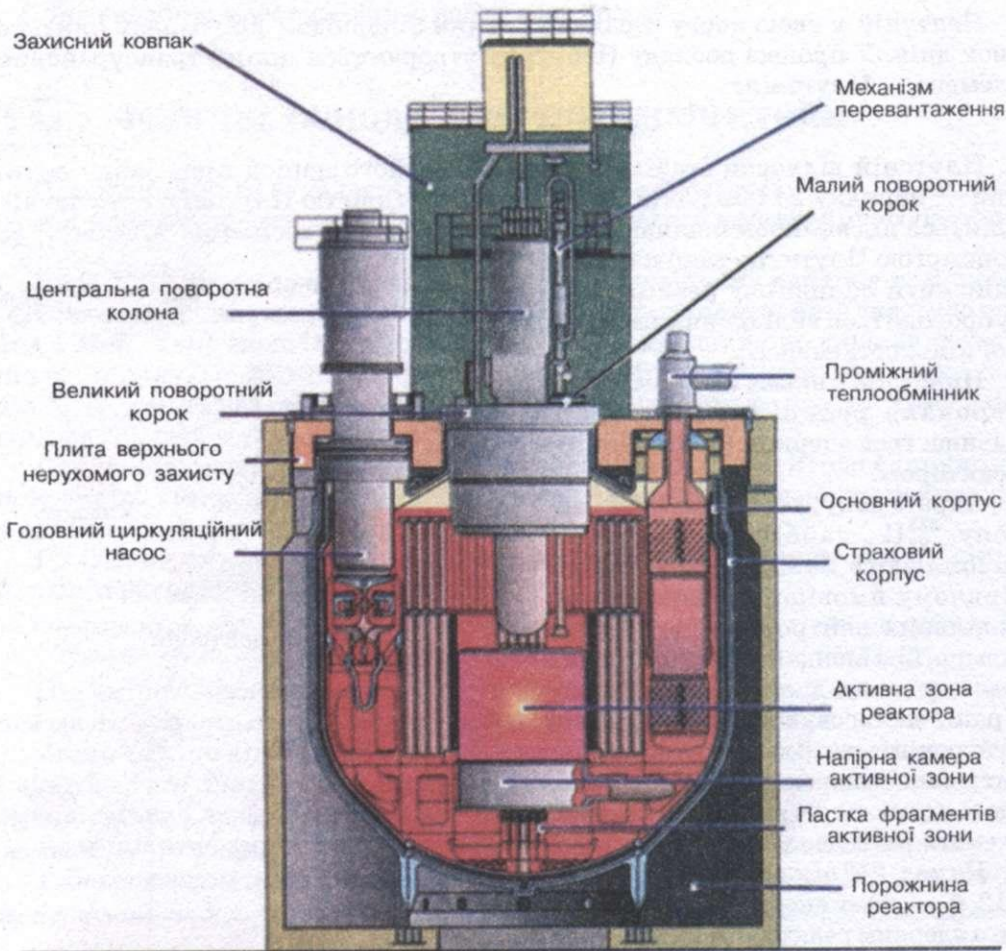
Мал. 211



а



б



в

Мал. 212

$^{238}_{92}\text{U}$  та ін.), сповільнювач нейтронів (важка або звичайна вода, графіт та ін.), теплоносії для виведення теплоти, що утворюється під час роботи реактора (вода, рідкий натрій та ін.), і пристрій для регулювання швидкості реакції (стержні, які вводять у робочий простір реактора; вони містять кадмій чи бор — речовини, які добре поглинають нейтрони).

Зовні реактор оточують захисною оболонкою, що затримує  $\gamma$ -промені і нейтрони, її роблять з бетону із залізним заповнювачем.

Найкращий сповільнювач — **важка вода**. Звичайна ж вода сама захоплює значну кількість нейтронів і перетворюється на важку воду. Добрим сповільнювачем є також графіт, ядра якого не поглинають нейтронів.

Коефіцієнт розмноження  $k$  може дорівнювати одиниці лише за умови, що розміри реактора і відповідно маса Урану більші від деяких критичних значень.

Критичною масою називають найменшу масу речовини, що ділиться, при якій може відбуватися ланцюгова ядерна реакція.

Якщо розміри реактора малі, то через поверхню його активної зони (об'єм, в якому розміщуються стержні з Ураном) вилітає дуже багато нейтронів.

Із збільшенням розмірів системи кількість ядер, що беруть участь у поділі, зростає пропорційно об'єму, а кількість нейтронів, яка втрачається внаслідок вильоту, збільшується пропорційно поверхні. Тому, збільшуючи систему, можна добитися, що коефіцієнт розмноження буде більший від одиниці ( $k \geq 1$ ). Система матиме критичні розміри, якщо кількість нейтронів, втрачених внаслідок захоплення і вильоту, дорівнюватиме кількості нейтронів, що утворюються в процесі поділу. При цьому  $k = 1$ . Критичні розміри визначаються типом ядерного пального, сповільнювачем та конструктивними особливостями реактора.

Для сферичного шматка чистого (без сповільнювача) Урану  $^{235}_{92}\text{U}$  критична маса — близько 50 кг. Радіус такої сфери дорівнює приблизно 9 см (Уран дуже важка речовина). Застосуванням сповільнювачів нейтронів і берилієвої оболонки, що відбиває нейтрони, критичну масу вдалося зменшити до 250 г.

Керують реактором за допомогою стержнів, в яких міститься кадмій чи бор. Якщо стержні вийняті з активної зони реактора, то  $k > 1$ , а якщо вони повністю всунуті, то  $k < 1$ . Вставляючи стержні в активну зону, можна в будь-який момент припинити ланцюгову реакцію.

Є реактори, які працюють без сповільнювача на швидких нейтронах. Оскільки ймовірність поділу, спричиненого швидкими нейтронами, мала, то такі реактори не можуть працювати на природному урані. Реакцію можна підтримувати лише в збагаченій суміші, яка містить не менше ніж 15% ізотопу  $^{235}_{92}\text{U}$ . Перевага реакторів на швидких нейтронах така, що під час їх роботи утворюється значна кількість плутонію, який можна використовувати як ядерне паливо. Такі реактори називають **реакторами-розмножувачами**, оскільки вони утворюють матеріал, придатний для поділу. Будують реактори з **коефіцієнтом відтворення** до 1,5. Це означає, що з 1 кг ізотопу  $^{235}_{92}\text{U}$  виходить до 1,5 кг плутонію.

У звичайних реакторах коефіцієнт відтворення досягає 0,6—0,7.

Уперше ланцюгову ядерну реакцію поділу Урану було здійснено у США в грудні 1942 р. колективом учених під керівництвом Е. Фермі.



Мал. 213

Перший ядерний реактор було запущено 25 грудня 1946 р. колективом фізиків, який очолював видатний учений **І. Курчатов**.

На сьогодні існують різні типи реакторів, що відрізняються один від одного як потужністю, так і призначенням. Найбільш перспективними є реактори-розмножувачі на швидких нейтронах.

На атомних станціях України (мал. 213): Запорізькій, Південно-Українській, Рівненській, Хмельницькій АЕС встановлені реактори, які мають потужність 500—1000 МВт. Чорнобильську АЕС закрито з 2000 р.

Атомні електростанції мають ряд переваг порівняно з тепловими електростанціями, що працюють на органічному паливі. Вони не вимагають дефіцитного органічного палива, атмосферного кисню, не засмічують середовище золюю та іншими продуктами згоряння. Проте розміщення АЕС в густонаселених районах має потенційну загрозу.

Ядерній енергетиці властиві шкідливі або навіть небезпечні чинники впливу на навколишнє середовище. Складні проблеми виникають у зв'язку з потребою захоронення радіоактивних відходів і демонтажем атомних станцій, які відпрацювали свій термін.

Досвід експлуатації АЕС у всьому світі свідчить, що при нормальному режимі експлуатації біосфера надійно захищена від радіаційного впливу. Проте вибух реактора на Чорнобильській АЕС мал. 214, а показав, що ризик руйнування активної зони реактора внаслідок помилок персоналу і прорахунків в конструкції реакторів залишається реальністю. Сьогодні найбільшою проблемою японців є атомні електростанції. Внаслідок сейсмологічної катастрофи, що відбулася 11 березня 2011 року, підземними поштовхами були



Мал. 214

пошкоджені системи охолодження реакторів на АЕС «Фукусіма-1» і «Фукусіма-2», що створило реальну загрозу ядерного вибуху (мал. 214, б).

### 2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке коефіцієнт розмноження?
2. Що таке критична маса?
3. Що являє собою ядерний реактор?
4. Які види палива використовуються в ядерному реакторі?
5. Назвіть, які АЕС побудовані в Україні і де вони знаходяться.

## § 53. ДІЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЖИВИЙ ОРГАНІЗМ

У 9 класі ви одержали багато відомостей про дози випромінювання, а також про дію радіоактивного випромінювання на людину. Тому на цьому питанні ми зупинимося коротко.

Радіоактивне випромінювання згубно діє на всі живі істоти — від бактерій і вірусів до високорозвинутих організмів — тварин і людину. Ступінь і характер впливу на живий організм радіоактивного випромінювання залежать від дози випромінювання і від виду частинок. Одне і те ж випромінювання по-різному діє на різні живі організми, на їх окремі органи.

Мінімальна смертельна доза (доза, під час опромінення якою гине 50 % організмів одного виду) становить від 50 до 300 р (рентген). Менші дози викликають різні захворювання, що об'єднуються терміном «променева хвороба».

Первинні процеси йонізації, як правило, не викликають великих порушень в тканинах організму. Згубна дія йонізуючого випромінювання зв'язана з вторинними біохімічними реакціями, в які вступають продукти йонізації.

Крім йонізації, опромінення організму супроводжується й іншими ефектами. При поглинанні тканинами організму йонізуючого випромінювання частина атомів і молекул не йонізується, а тільки переходить у збуджений



стан. Через деякий інтервал часу ці атоми повертаються в нормальний стан, а надлишок енергії випромінюють у вигляді квантів ультрафіолетового випромінювання, що поглинається потім тканинами організму. Загальна кількість енергії, що поглинається при цьому тканинами, становить всього приблизно 250 Дж. Проте навіть така нікчемна порція енергії випромінювання має катастрофічні наслідки для людського організму. Це пояснюється тим, що невелика частина молекул білка або нуклеїнової кислоти переходить у збуджений стан. При цьому в молекулах нуклеїнових кислот руйнуються азотисті з'єднання з пірамідом, а в молекулах білка — групи SH. Ці групи, відірвавшись від молекул нуклеїнових кислот і білка, вступають у реакції з атомарним киснем, воднем і радикалами OH, що виникають при йонізації води. Внаслідок цього утворюється нова молекула і новий радикал, який, у свою чергу, вступає в нове з'єднання і так далі. За рахунок порівняно невеликої кількості енергії випромінювання в організмі людини відбувається ланцюгова біохімічна реакція. Кінцевим результатом такої реакції є руйнування структури молекул нуклеїнових кислот і білка. Поєднання цих двох чинників — первинної йонізації і ланцюгової біохімічної реакції — призводить до виникнення променевої хвороби.

Розглянемо дію різних доз радіоактивного випромінювання на людський організм:

- 0—25 Р — відсутність видимих змін в організмі;
- 20—50 Р — можлива зміна складу крові;
- 50—100 Р — зміна складу крові, пошкодження органів;
- 100—200 Р — пошкодження органів, можлива втрата працездатності;
- 200—400 Р — непрацездатність, можлива смерть;
- 400 Р — смертність становить 50 %;
- 600 Р — смертельна доза.

У людини найбільш чутливі до опромінення кровотворні органи (кістковий мозок, селезінка, лімфатичні вузли) і слизова оболонка кишечника. Якщо доза радіоактивного випромінювання близька до смертельної, смерть настає внаслідок руйнування клітин кісткового мозку (лейкемія). При дозах, що значно перевищують смертельну, смерть настає внаслідок ураження кишечника. При дозах, менших за смертельну, на початкових етапах настає гострий період променевої хвороби (недокрів'я, опіки і виразки, випадання волосся, важке ураження очей, гортані), потім різко знижується опір організму інфекційним захворюванням, можливе виникнення ракових пухлин, організм швидко старіє.

Середня річна доза опромінювання, що отримується людиною від різних джерел, становить:

- природний фон — 67,2 %;
- опромінення в медичних установах під час обстежень — 30,5 %;
- випадання радіоактивних осадів — 0,6 %;
- випромінювання атомних електростанцій — 0,6 %;
- інші джерела — 0,5 %;
- професійне опромінення — 0,6 %.

Для того, щоб захистити людину і все живе від радіоактивного випромінювання, всі джерела випромінювання — радіоактивні препарати, прилади,



Мал. 215



Мал. 216



Мал. 217

що містять радіоактивні препарати, — розміщують в спеціальних захисних блоках, контейнерах або камерах (мал. 215).

Фахівці, що працюють з радіоактивними препаратами, носять спеціальний захисний одяг (мал. 216, а); у кожного з них обов'язково є дозиметр — прилад, за допомогою якого визначається ступінь радіоактивного забруднення і доза опромінення (мал. 216, б).

Якщо до вас випадково потрапить будь-який предмет із знаком, зображеним на мал. 217, у жодному разі не торкайтеся і не розбирайте його — це небезпечно!

#### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Як діє радіоактивне випромінювання на живі організми?
2. Що застосовують для захисту від радіоактивного випромінювання?

### § 54. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ, ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА

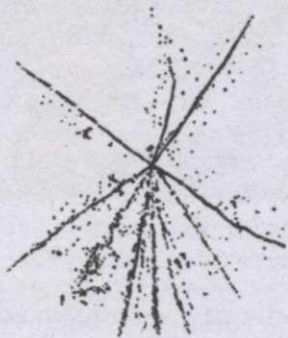
Вивчаючи фізику, ми не раз говорили про існування в природі частинок, які називаються **елементарними**. Ви вже ознайомилися з електроном, фотоном, протоном і нейтроном. *Але що ж таке елементарна частинка?*

У самому слові елементарна закладено подвійний зміст. З одного боку, елементарний — це найпростіший. З другого боку, під елементарним розуміють щось фундаментальне, що лежить в основі речей (саме в цьому розумінні і називають **субатомні частинки** (частинки, з яких складаються атоми) елементарними).

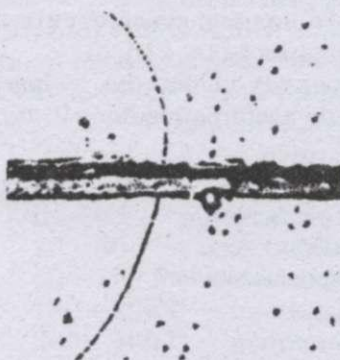
Вважати відомі на сьогодні елементарні частинки подібними до незмінних атомів Демокріта не дозволяє такий простий факт. Жодна з частинок не існує вічно. Більшість елементарних частинок не може проіснувати більше від двох мільйонних частинок секунди, навіть тоді, коли немає ніякого зовнішнього впливу. Наприклад, вільний нейтрон (нейтрон поза атомним ядром) існує в середньому 15 хв.

Тільки такі частинки, як фотон, електрон, протон і нейтрино, могли б залишитися незмінними, якби кожна з них була одна на світі.

Але разом з електронами і протонами існують **позитрони** і **антипротони**, від зіткнення з якими частинки взаємно знищуються і утворюються нові.



Мал. 218



Мал. 219



Мал. 220

**Фотон**, випромінений настільною лампою, існує не довше від  $10^{-8}$  с. Це той час, який йому потрібен, щоб долетіти до сторінки книжки і поглинутися папером.

Лише **нейтрино** майже вічне, тому що воно надзвичайно слабо взаємодіє з іншими частинками. Але й нейтрино гинуть від зіткнення з іншими частинками, хоч такі зіткнення трапляються рідко. Усі елементарні частинки перетворюються одна в одну, і ці взаємні перетворення — основний факт їх існування.

На мал. 218 ви бачите результат зіткнення ядра Карбону, що мало енергію 60 млрд. еВ (жирна верхня лінія), з ядром Аргентуму фотоемульсії. Ядро розпадається на уламки, які розлітаються в усі боки. Одночасно народжується багато нових елементарних частинок — **піонів**.

За сучасними уявленнями елементарні частинки — це первинні частинки, які далі не розкладаються, — з них складається вся матерія. Проте неподільність елементарних частинок не означає, що вони не мають внутрішньої структури.

Існування двійника електрона — **позитрона** — теоретично передбачив англійський фізик П. Дірак у 1931 р. Коли зустрічаються позитрон і електрон, обидві частинки зникають — **анігілюють**, народжуючи фотони великої енергії. Може бути і зворотний процес — утворення **електронно-позитронної пари**, наприклад, коли стикається фотон досить великої енергії (його маса має бути більшою від суми мас спокою народжуваних частинок) з ядром.

Через два роки позитрон виявили за допомогою камери Вільсона, вміщеної в магнітне поле. Напрямок викривлення треку частинки вказував на знак її заряду, а за радіусом кривизни й енергією частинки визначили відношення її заряду до маси. Воно за значенням таке саме, як і для електрона. На мал. 219 ви бачите першу фотографію, яка довела існування позитрона. Частинка рухалася вгору і, пройшовши через свинцеву пластинку, втратила частину своєї енергії. Тому кривизна траєкторії збільшилася.

Процес утворення пари електрон—позитрон  $\gamma$ -квантом у свинцевій пластинці — видно на фотографії, поданій на мал. 220. У камері Вільсона, вміщеній у магнітне поле, пара залишає характерний слід у вигляді дворогої вилки.

Те, що зникнення одних частинок і поява інших під час реакції між елементарними частинками — це перетворення, а не просто виникнення нової комбінації складових частин старих частинок, особливо наочно виявляється саме під час анігіляції пари **електрон—позитрон**. Обидві ці частинки мають певну масу в стані спокою — електричні заряди.

Порівняно недавно виявили **антипротон** і **antineйтрон**. Електричний заряд антипротона негативний.

Атоми, ядра яких складаються з **антинуклонів**, а оболонка — з **позитронів**, утворюють **антиречовину**. У 1969 р. уперше було одержано **антигелій**.

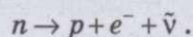
Під час  $\beta$ -розпаду з ядра вилітає електрон. Але електрона в ядрі немає. *Звідки ж він береться?* Після того як електрон вилітає з ядра, заряд ядра, а отже, і кількість протонів збільшується на одиницю. Масове число ядра не змінюється. Це означає, що кількість нейтронів зменшується на одиницю. Отже, у  $\beta$ -радіоактивних ядрах нейтрон здатний розпадатися на протон і електрон. Протон залишається в ядрі, а електрон вилітає назовні. Лише в стабільних ядрах нейтрони стійкі.

Швейцарський фізик **В. Паулі** припустив, що разом з протоном і електроном під час розпаду нейтрона народжується якась частинка «невидимка», що й виносить із собою енергію, якої не вистачає. Цю частинку прилади не реєструють, оскільки вона не має електричного заряду і маси спокою. Отже, вона не може йонізувати атоми, розщеплювати ядра, тобто не може спричинювати ефекти, за якими можна судити про виникнення частинки.

Цю частинку Фермі назвав **нейтрино**, що означає «нейтрончик». Виявилось, що маса спокою нейтрино, як і передбачав Паулі, дорівнює нулю. За цими словами ховається простий зміст: нейтрино в стані спокою немає. Ледь з'явившись на світ, вони одразу рухаються зі швидкістю 300 000 км/с. Розраховуючи взаємодію нейтрино з речовиною в шарі певної товщини, одержали досить невтішний результат щодо можливості виявити цю частинку експериментально. Земна куля для нейтрино прозоріша, ніж найкраще скло для світла.

Роль нейтрино не зводиться лише до пояснення  $\beta$ -розпаду ядер. Багато елементарних частинок у вільному стані спонтанно розпадається, випромінюючи нейтрино. Передусім так поводить себе нейтрон. Тільки у ядрах нейтрон внаслідок взаємодії з іншими нуклонами набуває стабільності. Вільний нейтрон живе в середньому 15 хв. Це довели експериментально лише після того, як було побудовано ядерні реактори, що дають потужні пучки нейтронів.

Як і інші частинки, нейтрино  $\nu$  має античастинку, яка називається **antineйтрино** —  $\bar{\nu}$ . Під час розпаду нейтрона на протон і електрон випромінюється саме antineйтрино:



Енергія нейтрона завжди більша від суми енергій протона й електрона. Надлишкову енергію виносить із собою antineйтрино.

Розпад частинки — зовсім не ознака того, що вона не елементарна. Нейтрон, незважаючи на свою нестабільність, вважається елементарною частинкою, а **дейтрон**, без сумніву, складається з нейтрона і протона, хоч він і стабільний.

Відкриття нової елементарної частинки завжди було і зараз є визначним тріумфом науки. Але вже давно до кожного чергового тріумфу почало домішуватися занепокоєння. Оскільки тріумфи відбувалися буквально один за одним.

Було відкрито групу «дивних» частинок: *K*-мезонів і гіперонів з масами, більшими від маси нуклонів. У 70-ті роки ХХ ст. до них приєдналася велика група «зачарованих» частинок, які мають ще більші маси. Крім того, було відкрито частинки з коротким життям — порядку  $10^{-22}$  —  $10^{-23}$  с. Ці частинки назвали **резонансами**; їх було більше 200.

Якщо до таблиці елементарних частинок не вносити резонанси і «зачаровані» частинки, то матимемо 39 частинок.

Усі частинки поділяються на групи:

1. **Фотон.**

2. **Лептони.** Сюди входять 12 частинок (з античастинками). Є 3 види нейтрино: **електронне нейтрино** народжується разом з електронами, **мюонне нейтрино** — з  $\mu$ -мезонами і  **$\tau$ -мезонне нейтрино** — з  $\tau$ -мезонами. Далі йдуть **електрон**,  $\mu$ -**мезон** і  $\tau$ -**мезон**, відкритий у 1975 р. Хоча  $\tau$ -мезон має дуже велику масу, він входить до групи лептонів, тому за всіма іншими властивостями він до них близький. Основна властивість, яка споріднює його з лептонами, полягає в тому, що ця частинка, як і інші лептони, не бере участі в сильних взаємодіях. Що ж до  $\tau$ -мезонного нейтрино, то його експериментально поки не виявлено, хоч сумніву в його існуванні немає.

3. **Мезони.** Ця група має 8 частинок. Найлегші з них  $\pi$ -**мезони**: **позитивні**, **негативні й нейтральні**. Їх маси становлять 264 ( $\pi^0$ ) і 273 ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) електронних мас. **Піони** — це кванти ядерного поля, подібно до того, як фотони є квантами електромагнітного поля. Ще є 4 *K*-мезони і один  $\eta^0$ -мезон.

4. **Баріони.** До цієї групи входять 18 частинок із 39. Найлегші баріони — це протони і нейтрони. За ними йдуть так звані **гіперони**. Таблицю замикає  $\Omega^-$  (омега мінус)-частинка, відкрита у 1964 р. Її маса в 3273 рази більша від маси електрона.

Існування великої кількості частинок наводить на думку, що не всі вони однаково елементарні.

Ще в 1963 р. **М. Гелл-Манн** і **Дж. Цвейг** запропонували модель, за якою всі частинки, що беруть участь у сильних (ядерних) взаємодіях, народжених з фундаментальніших (або первинних) частинок — **кварків**. Крім фотонів і лептонів, усі інші відкриті на сьогодні частинки є складними.

Спочатку було висловлено гіпотезу про існування трьох кварків (і відповідно трьох антикварків). Кваркам приписувалися дробові електричні заряди, їх позначають літерами: *u*, *d*, *s*. Перший — *u*-кварк — має заряд  $2/3 e$ , а *d*- і *s*-кварк мають однакові заряди по  $-1/3 e$  (де *e* — модуль заряду електрона). Протон складається з двох *u*-кварків і одного *d*-кварка; піони складаються з комбінації **кварк—антикварк** і т. д. Дивні частинки (**каони і гіперони**) містять важчий *s*-кварк; його називають «дивним».

Передбачалося існування четвертого *s*-кварка; його назвали «зачарованим». Потім експериментально виявили частинки, до яких входить цей кварк. Маса *s*-кварка більша від маси *s*-кварка.

Досліді з розсіяванням нейтрино і електронів надвисоких енергій на нуклонах підтвердили кваркову структуру і протонів, і нейтронів. Але розщепити на кварки нуклони не вдалося.

Кварки шукали і шукають серед материкових порід, відкладень на дні океану, в місячному ґрунті. Але вільних кварків не виявлено.

Очевидно, міжкваркові сили з відстанню не зменшуються, як усі інші, а збільшуються. Якщо це так, то розщепити нуклони та інші частинки на кварки не вдасться ніколи. Протон та інші частинки мають складну структуру, але розщепити їх на частини не можна.

За сучасними уявленнями, всі лептони, як і кварки, не мають внутрішньої структури. У цьому розумінні лептони і кварки можна вважати справді елементарними частинками. Без античастинок відкрито шість лептонів. Відкрито п'ять кварків. П'ятий — це так званий *b*-кварк, маса якого більша від маси *s*-кварка. Припускають, що є ще й шостий кварк, масивніший за *b*-кварк. Теоретичний аналіз приводить до висновку про те, що має бути кварк-лептонна симетрія: речовина, побудована з шести різних лептонів і шести різних кварків. Разом з їх античастинками цих справжніх елементарних частинок налічується 24.

До них треба ще додати квант електромагнітного поля — фотон — і кванти поля, що зумовлює міжкваркові взаємодії. Частинки міжкваркового поля називаються **глюонами**. Експериментально глюони поки що не виявлені. Нарешті, мають бути кванти поля слабких взаємодій — **векторні бозони**. Вони також поки що не виявлені.

Отже, картина будови матерії на самому глибокому рівні виявилася досить складною. Побудова кількісної теорії міжкваркових сил ще не завершена. Можливо, згодом будуть виявлені ще масивніші кварки і лептони.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Електрон — найлегша із заряджених частинок. За яким з відомих вам законів не можна перетворити електрон у фотони?
2. Під час анігіляції електрона і позитрона, які рухаються повільно, утворилося два  $\gamma$ -кванти. Під яким кутом один відносно одного вони розлітаються?
3. Яка частота  $\gamma$ -квантів, що виникають за умов, зазначених у попередньому запитанні?
4. Чому вільний нейтрон розпадається на протон, електрон та антинейтрино, а вільний протон не може розпастися на нейтрон, позитрон і нейтрино?
5. Чи можна в камері Вільсона спостерігати трек зарядженої частинки з часом життя  $10^{-23}$  с?
6. Що таке кварк?

### Задачі та вправи

#### Розв'язуємо разом

1. Чому нейтрони є найкращими снарядами для руйнування ядра атома, ніж протони, електрони,  $\alpha$ -частинки?

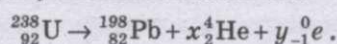
#### Розв'язання

Нейтрон завдяки своїй нейтральності з будь-якою енергією (від часток до кількох мільонів електрон-вольт), вільно проникає в будь-яке ядро, включаючи і важкі. Але в кожному конкретному випадку частинки-снаряди повинні мати відповідну енергію.

2. Скільки відбувається  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпадів під час радіоактивного розпаду  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , якщо він перетворюється в  ${}^{198}_{82}\text{Pb}$ ?

**Розв'язання**

Радіоактивний розпад урану можна записати так:



Нагадаємо, що  $\alpha$ -частинка — це  ${}_2^4\text{He}$ , а  $\beta$ -частинка — це  ${}_{-1}^0\text{e}$ .

Застосовуючи закон збереження зарядових чисел, можна записати

$$92 = 82 + 2x - 1y.$$

Застосовувши закон збереження масових чисел, отримаємо

$$238 = 198 + 4x.$$

Розв'язуючи отримані рівняння як систему, маємо  $x = 10$  і  $y = 10$ , тобто відбувається десять  $\alpha$ -розпадів і десять  $\beta$ -розпадів.

3. При зіткненні  $\alpha$ -частинки з ядром бора  ${}_{5}^{10}\text{B}$  відбулась ядерна реакція, внаслідок якої утворилося два нових ядра. Одним з цих ядер було ядро атома Гідрогену  ${}_1^1\text{H}$ . Визначте порядковий номер і масове число другого ядра, дайте символічний запис ядерної реакції і визначте її енергетичний ефект.

**Розв'язання**

Позначимо невідоме ядро символом  ${}_Z^AX$ . Знаючи, що  $\alpha$ -частинка — це ядро Гелію  ${}_2^4\text{He}$ , запис реакції матиме вигляд  ${}_2^4\text{He} + {}_{5}^{10}\text{B} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_Z^AX$ .

Застосовувши закон збереження числа нуклонів, отримаємо рівняння  $4 + 10 = 1 + A$ , звідки  $A = 13$ .

Застосовувши закон збереження заряду, маємо  $2 + 5 = 1 + Z$ , звідки  $Z = 6$ .

Отже, невідоме ядро є ядром атома ізоотопу Карбону  ${}_6^{13}\text{C}$ .

Тепер рівняння можна записати в кінцевому вигляді  ${}_2^4\text{He} + {}_{5}^{10}\text{B} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_6^{13}\text{C}$ .

Енергетичний ефект ядерної реакції визначається за формулою

$$Q = 931[(m_{\text{He}} + m_{\text{B}}) - (m_{\text{H}} + m_{\text{C}})].$$

Використовуючи табличні значення маси атомів, отримаємо

$$Q = 931[(4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335)] \text{ MeV} = 4,06 \text{ MeV}.$$

$$Q = 4,06 \text{ MeV}.$$

4. Визначте добові витрати урану  ${}_{92}^{238}\text{U}$  атомною електростанцією потужністю 7 МВт, якщо ККД електростанції 20 %. При кожному розпаді виділяється енергія 200 МеВ.

**Розв'язання**

Якщо при кожному розпаді виділяється енергія  $E_0$ , то при розпаді за добу, припустимо  $N$  атомів (ядер), виділиться енергія  $E = NE_0$ . Нехай  $N$  атомів відповідає масі урану  $m$  кг, тоді  $N = \frac{mN_A}{\mu} E_0$ , де  $N_A$  — число Авогадро;  $\mu$  — молярна маса урану.

Енергія, яка виділяється за добу, розраховується за формулою:  $E_1 = NE_0 = \frac{mN_A}{\mu} E_0$ ,

а повна енергія:  $E = \eta E_1 = Pt$ , де  $P$  — потужність електростанції,  $t = 1$  доба = 86 400 с.

Тоді  $Pt = \eta \frac{mN_A}{\mu} E_0$ , звідки  $m = \frac{Pt\mu}{\eta N_A E_0}$ .

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо

$$m = 36,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

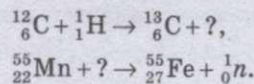
## Рівень А

391. Який склад Натрію  ${}^{23}_{13}\text{Na}$ , Аргентуму  ${}^{107}_{47}\text{Ag}$ , Іоду  ${}^{53}_{126}\text{I}$ , Францію  ${}^{223}_{87}\text{Fr}$ , Урану  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , Менделевію  ${}^{256}_{101}\text{Md}$  ?
392. Який склад мають ізотопи Гелію  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^5_2\text{He}$  ?
393. Який склад ядра  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  ? Напишіть рівняння  $\alpha$ -розпаду цього ядра.
394. Який склад ядра  ${}^{209}_{84}\text{Po}$  ? Напишіть рівняння  $\alpha$ -розпаду цього ядра.
395. Який склад ядра  ${}^{22}_{11}\text{Na}$  ? Напишіть рівняння  $\beta$ -розпаду цього ядра.
396. Який склад ядра  ${}^{209}_{82}\text{Pb}$  ? Напишіть рівняння  $\beta$ -розпаду цього ядра.
397. Для ядра  ${}^7_3\text{Li}$  визначте: 1) дефект маси; 2) енергію зв'язку.
398. Який дефект маси ядра  ${}^{12}_6\text{C}$  ? Яка мінімальна енергія потрібна для розщеплення цього ядра на окремі нуклони?
399. Кількість ядер деякого хімічного елемента в радіоактивному зразку зменшилась у 8 разів упродовж 1 доби. Який період піврозпаду цього елемента?
400. Період піврозпаду  ${}^{137}_{55}\text{Cs}$  дорівнює 30 років. За який інтервал часу на забрудненій після Чорнобильської катастрофи території кількість ядер  ${}^{137}_{55}\text{Cs}$  зменшиться в 4 рази?
401. Радіоактивний зразок містить  $3 \cdot 10^{17}$  ядер  ${}^{52}_{25}\text{Mn}$ . Період піврозпаду  ${}^{52}_{25}\text{Mn}$  дорівнює 5,6 доби. Яка кількість ядер  ${}^{52}_{25}\text{Mn}$  залишиться у зразку через 8,4 діб?
402. Період піврозпаду радіоактивних ядер  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  становить 27,7 року. Через який інтервал часу після початку спостереження за радіоактивним зразком у ньому залишиться 25 % ядер  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ ?
403. Напишіть позначення, яких не вистачає у рівняннях реакції:
- $${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow ? + {}^4_2\text{He},$$
- $${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ? + {}^4_2\text{He},$$
- $$? + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He},$$
- $${}^{55}_{23}\text{Mn} + ? \rightarrow {}^{26}_{10}\text{Si} + {}^1_0\text{n}.$$
404. Визначте енергетичний ефект ядерної реакції:
- $${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}.$$
- Поглинається чи виділяється енергія в реакції?
405. Яку мінімальну енергію повинна мати  $\alpha$ -частинка, щоб відбулась ядерна реакція:
- $${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} ?$$
406. Яка енергія виділяється під час ядерної реакції:
- $${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n} ?$$
407. Як пояснити, що в камері Вільсона  $\beta$ -частинки від одного і того ж радіоактивного ізотопу не мають сталої довжини пробігу?
408. Хімічних елементів, що мають заряд ядер  $Z$ , який дорівнює 0, 43, 61, 85 і понад 92 протонні одиниці, немає в природі, але їх одержано штучно. Які це елементи?
409. Радіоактивний ізоотп Технецію  ${}^{95}_{43}\text{Tc}$ , якого не виявлено у природі, було одержано штучно внаслідок реакції:
- $${}^{94}_{42}\text{Mo} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{95}_{43}\text{Tc} + ?$$
- Поясніть реакцію. Яка частинка викидається?

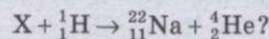


## Рівень В

410. Чи змінюються масове число, маса та порядковий номер елемента при випусканні ядром  $\gamma$ -кванта?
411. Як змінюються масове число та номер елемента при вильоту з ядра протона? Нейрона? Позитрона?
412. Який склад ядра  ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ ? Обчисліть для цього ядра: 1) дефект маси; 2) енергію зв'язку на нуклон.
413. Який склад ядра  ${}^{118}_{50}\text{Sn}$ ? Обчисліть для цього ядра: 1) дефект маси; 2) енергію зв'язку на нуклон.
414. Радіоактивний ізотоп  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  перетворився на ізотоп  ${}^{212}_{83}\text{Bi}$ . Скільки відбулося  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпадів під час цього перетворення?
415. У який ізотоп перетворюється ізотоп  ${}^{235}_{92}\text{U}$  внаслідок п'яти  $\alpha$ - і двох  $\beta$ -розпадів?
416. У який ізотоп перетвориться ізотоп  ${}^{238}_{92}\text{U}$  внаслідок  $\alpha$ -розпаду і двох  $\beta$ -розпадів?
417. Атомна маса хлору 35,5. Хлор має два ізотопи  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$  та  ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ . Визначте їх відсотковий вміст.
418. Скільки відсотків ядер розпадеться у радіоактивному зразку  ${}^{131}_{53}\text{I}$  через 18 діб, якщо період піврозпаду  ${}^{131}_{53}\text{I}$  становить 6 діб?
419. Період піврозпаду  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  дорівнює 5,26 року. Яка кількість ядер  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  розпадається впродовж 7,89 року в зразку масою 30 мкг?
420. Період піврозпаду Ітрію-90 дорівнює 64 год. На скільки відсотків зменшиться інтенсивність радіоактивного випромінювання препарату Ітрію-90 за 24 год?
421. Напишіть позначення, яких не вистачає в рівняннях ядерної реакції:

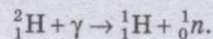


422. Чому нейтрони легше проникають у ядра атомів, ніж інші частинки?
423. Яка енергія виділяється під час термоядерної реакції синтезу дейтрона  ${}^2_1\text{H}$  і тритона  ${}^3_1\text{H}$ , якщо один із продуктів реакції нейтрон?
424. Запишіть рівняння ядерної реакції бомбардування ядер  ${}^{14}_7\text{N}$   $\alpha$ -частинками, внаслідок якої отримують протони. Обчисліть енергетичний ефект реакції. Виділяється чи поглинається енергія у цій реакції?
425. Внаслідок бомбардування якого ядра X протонами можлива реакція:

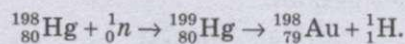


Який енергетичний ефект цієї реакції? Поглинається чи виділяється енергія в реакції?

426. Визначте найменшу енергію  $\gamma$ -кванта, потрібну для проведення реакції:



427. Під час анігіляції електрона і позитрона утворилося два однакових  $\gamma$ -кванта. Знайдіть довжину хвилі, нехтуючи кінетичною енергією частинок до реакції.
428. Поясніть лабораторну реакцію добування золота з ртуті:




Чому цю реакцію не можна застосовувати в промислових масштабах?

## ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

**Контрольні запитання**

1. Смугасті спектри молекул складаються з окремих ліній, що в межах однієї смуги близько розміщені одна біля одної. Який висновок з цього факту можна зробити про число можливих енергетичних рівнів молекул? Чи дуже різняться модулі енергій окремих рівнів?
2. Чому атоми ізотопів хімічно цілком тотожні один одному?
3. Чому в основу систематизації хімічних елементів покладено не масу, а заряд ядер?
4. У першому наближенні енергію зв'язку ядра можна вважати пропорційною числу нуклонів у ньому. Чому це так?
5. Альфа-частинку поглинула речовина. Де поділась альфа-частинка?
6. Чому виникає  $\gamma$ -квант у ядрі атома в процесі його радіоактивного розпаду?
7. З'ясуйте, чому ядра атомів при опроміненні їх нейтронами стають радіоактивними?
8. Чому в ядерних реакторах повільні (теплові) нейтрони більш ефективно захоплюються ядрами Урану, ніж швидкі?
9. Поясніть, чому для здійснення термоядерної реакції найзручніше використати ядра Гідрогену, особливо його важкі ізотопи: дейтерій і тритій.
10. Що відбудеться, коли електрон зіткнеться з протоном?
11. Існують радіоактивні ядра атомів. А чи існують радіоактивні елементарні частинки? Наведіть приклади.
12. Чи можна трактувати закон збереження електричних зарядів як закон збереження числа елементарних зарядів, тобто збереження суми елементарних зарядів кожного знаку окремо?

 **Що я знаю і вмію робити**
**Я знаю, що таке спектральний аналіз**

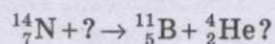
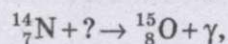
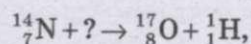
1. Пояснюючи практичне використання спектрального аналізу, учень сказав: «Щоб визначити склад сплаву, дротину з нього дуже нагрівають струмом і ставлять біля щілини спектроскопа. За результатами аналізу смужки спектра роблять висновки про склад сплаву». У чому помилився учень?
2. На матовому склі спектроскопа наведено спектр гарячого газу у вигляді окремих яскравих тонких ліній. Що змінюватиметься при значному підвищенні густини газу?

**Я знаю, що таке радіоактивні перетворення**

3. Внаслідок радіоактивного розпаду ядро  ${}^{238}_{92}\text{U}$  перетворилося на ядро  ${}^{210}_{84}\text{P}$ . Скільки  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпадів відбулося?
4. Нейтрон розпадається за схемою  $n \rightarrow p + e^{-} + \nu$ . Одночасно він відновлюється за схемою  $p + \nu \rightarrow e^{+} + n$ . Якщо ці реакції відбуватимуться послідовно, то дістанемо вихідний нейтрон і, крім того, електрон та позитрон. Чи не суперечить це законам збереження?

**Я вмію пояснювати, як проходять ядерні реакції**

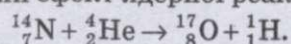
5. Яку бомбардуючу частинку застосовували в кожній із таких реакцій:



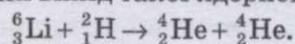
6. Яка мінімальна енергія потрібна для розщеплення ядра Оксигену  ${}^{17}_8\text{O}$ , якщо маса протона 1,00728 а.о.м, нейтрона 1,00867 а.о.м, електрона  $5,48 \cdot 10^{-4}$  а.о.м, маса Оксигену 19,99913 а.о.м?

**Я вмію визначати енергетичний вихід ядерних реакцій**

7. Визначте енергетичний ефект ядерної реакції:



8. Визначте енергетичний вихід такої ядерної реакції:



9. Визначте енергетичний вихід ядерної реакції  ${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0n$ . Виділяється чи поглинається енергія? Маса ізопів: Літійу — 7,01601 а.о.м; дейтерію — 2,01410 а.о.м, Берилію — 8,00531 а.о.м.

**Я вмію застосовувати закон радіоактивного розпаду**

10. За 8 год початкова кількість радіоактивного ізопіву зменшилась утричі. У скільки разів вона зменшиться за добу?

11. У двох зразках у початковий момент містилась однакова кількість радіоактивних атомів. Період піврозпаду атомів першого зразка дорівнює 10 хв, а другого — 40 хв. Визначте відношення кількості радіоактивних атомів у зразках через 2 год.

12. Радіоактивний препарат має  $10^3$  ядер. Яка частка їх залишиться через час, що дорівнює половині періоду піврозпаду?

**Я знаю, як застосувати фізичні закони**

13. Оцінити густину ядерної речовини.

14. Який закон електродинаміки постулює той факт, що при перетворенні нейтрона на протон виникає саме електрон, що вилітає з ядра як  $\beta$ -частинка?

### ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

#### Варіант I

- Згідно з моделлю Дж. Томсона, атом складається з
  - рівномірно розподіленого за всім об'ємом позитивного заряду, в який вкраплено електрони.
  - рівномірно розподіленого за всім об'ємом негативного заряду, в який вкраплено протони.
  - диполя.
  - нерівномірно розподіленого позитивного заряду з вкрапленими електронами.
  - нерівномірно розподіленого негативного заряду з вкрапленими протонами.

2. Модель атома Резерфорда така.
- Ядро розмірами  $10^{-15}$  м, навколо якого обертаються протони.
  - Ядро розмірами  $10^{-10}$  м, навколо якого обертаються електрони.
  - Ядро розмірами  $10^{-15}$  м, навколо якого обертаються електрони.
  - Ядро розмірами  $10^{-9}$  м, навколо якого обертаються електрони.
  - Ядро розмірами  $10^{-10}$  м, навколо якого обертаються протони.
3. Заряд ядра є
- позитивним.
  - негативним.
  - нейтральним.
  - позитивним і негативним.
  - відсутнім.
4. Перший постулат Бора визначає існування
- електронів у атомі.
  - ядра.
  - стаціонарних станів атома.
  - протонів у ядрі.
  - нейтронів у ядрі.
5. Перехід атома з вищого енергетичного рівня на нижчий супроводжується
- поглинанням кванта енергії.
  - випромінюванням кванта енергії.
  - без затрат енергії.
  - з випромінюванням двох квантів енергії.
  - з випромінюванням дев'яти квантів енергії.
6. Лінійчасті спектри характерні для
- молекулярних газів.
  - рідин.
  - твердих тіл.
  - атомних газів.
  - плазми.
7. На які стаціонарні орбіти переходять електрони в атомі Гідрогену під час випускання ультрафіолетових променів?
- Першу.
  - Другу.
  - Третю.
  - Четверту.
  - П'яту.
8. Другий постулат Бора визначається співвідношенням
- $h\nu = \frac{1}{E_n} - \frac{1}{E_m}$ .
  - $\frac{1}{h\nu} = \frac{1}{E_n} - \frac{1}{E_m}$ .
  - $\frac{1}{h\nu} = E_n - E_m$ .
  - $h\lambda = E_n - E_m$ .
  - $h\nu = E_n - E_m$ .
9. При центральному зіткненні  $\alpha$ -частинки з ядром найменша відстань, на яку підлітає частинка, дорівнює
- $r = \frac{ze^2}{\pi\epsilon_0 m_\alpha v_\alpha^2}$ .
  - $r = \frac{\pi\epsilon_0 m_\alpha v_\alpha^2}{ze^2}$ .
  - $r = \frac{\pi\epsilon_0 ze^2}{m_\alpha v_\alpha^2}$ .
  - $r = \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{\pi\epsilon_0 ze^2}$ .
  - $r = 0$ .
10. Довжина хвилі, що супроводжує рух частинки, визначається співвідношенням
- $\lambda = \frac{mv}{h}$ .
  - $\lambda = \frac{mv}{hc}$ .
  - $\lambda = \frac{h}{mv}$ .
  - $\lambda = \frac{hc}{mv}$ .
  - $\lambda = \frac{h}{v}$ .
11. Атомне ядро складається з
- протонів і електронів.
  - нейтронів та електронів.
  - нейтронів, протонів та електронів.
  - електронів.
  - нейтронів і протонів.

12. Масове число ядра визначається кількістю

- А. нейтронів.
- Б. протонів.
- В. нейтронів і протонів.
- Г. електронів.
- Д. електронів і нейтронів.

13. Енергія зв'язку атомного ядра дорівнює ( $m_p$  — маса протона,  $m_n$  — маса нейтрона,  $M_y$  — маса ядра):

А.  $E_{зв} = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_y)c^2$ .

Б.  $E_{зв} = ((A - Z)(m_p + m_n) - M_y)c^2$ .

В.  $E_{зв} = M_y c^2$ .

Г.  $E_{зв} = (Zm_p + (A - Z)m_n)c^2$ .

Д.  $E_{зв} = ((A - Z)m_p - M_y)c^2$ .

14. Період піврозпаду радіоактивних ядер — це час, за який

- А. розпадаються всі ядра.
- Б. розпадається половина ядер.
- В. розпадається третина ядер.
- Г. розпадається четверта частина усіх ядер.
- Д. кількість ядер зменшується в  $e$  разів.

15. Нейтрино виділяється при перетворенні

- А. протона в  $\alpha$ -розпаді.
- Б. протона в нейтрон і протон.
- В. нейтрона в протон і електрон.
- Г. протона в ядро Гідрогену.
- Д. протона в протон.

16. Енергетичним виходом ядерної реакції називається

- А. різниця енергій спокою всіх ядер і частинок до і після реакції.
- Б. різниця енергій всіх ядер і частинок до і після реакції.
- В. енергія спокою всіх ядер до реакції.
- Г. енергія спокою всіх ядер і частинок після реакції.
- Д. різниця мас спокою всіх ядер і частинок після і до реакції.

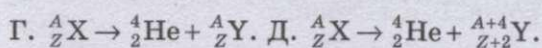
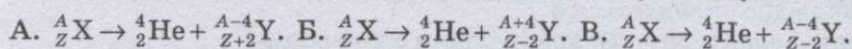
17. Ядерним реактором називається пристрій, в якому відбувається

- А. некерована ланцюгова ядерна реакція.
- Б. ядерна реакція.
- В. керована ланцюгова ядерна реакція.
- Г. згоряння газу.
- Д. перетворення механічної енергії в теплову.

18. Кількість електронів в атомі  ${}_{91}^{231}\text{Pa}$  становить

- А. 231. Б. 140. В. 322. Г. 91. Д. Відсутні.

19. Схему радіоактивного  $\alpha$ -розпаду наведено у такому вигляді:



## Варіант II

1. У дослідах Резерфорда досліджувалось розсіювання
  - А. електронів тонкими шарами речовини.
  - Б.  $\alpha$ -частинок тонкими шарами речовини.
  - В.  $\alpha$ -частинок товстими шарами речовини.
  - Г. електронів товстими шарами речовини.
  - Д. протонів тонкими шарами речовини.
2. Кількість електронів у атомі визначається
  - А. масовим числом.
  - Б. порядковим номером.
  - В. сумою масового числа і порядкового номера.
  - Г. різницею масового числа і порядкового номера.
  - Д. відсутні.
3. Електрон рухається навколо ядра завдяки силі
  - А. пружності. Б. всесвітнього тяжіння. В. тертя.
  - Г. Кулона. Д. відсутності дії сил.
4. Перехід атома з нижнього енергетичного стану на вищий супроводжується
  - А. поглинанням кванта енергії.
  - Б. випромінюванням кванта енергії.
  - В. без затрат енергії.
  - Г. з випромінюванням двох квантів енергії.
  - Д. з випромінюванням трьох квантів енергії.
5. Досліди Франка і Герца підтверджують
  - А. модель атома Гідрогену.
  - Б. модель атома Резерфорда.
  - В. перший постулат Бора.
  - Г. другий постулат Бора.
  - Д. постулати Бора.
6. На які стаціонарні орбіти переходять електрони в атомі Гідрогену під час випускання видимих променів?
  - А. Першу. Б. Другу. В. Третю. Г. Четверту. Д. П'яту.
7. На які стаціонарні орбіти переходять електрони в атомі Гідрогену під час випускання інфрачервоних променів?
  - А. Першу. Б. Другу. В. Третю і вище.
  - Г. Залишаються в стаціонарному стані.
  - Д. Падають на ядро.
8. Частота випромінювання світла визначається співвідношенням
  - А.  $\nu = \frac{h}{E_n - E_m}$ . Б.  $\frac{hc}{E_n - E_m} = \lambda$ . В.  $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$ . Г.  $\lambda = \frac{E_n - E_m}{h}$ . Д.  $\nu = \frac{hc}{E_n - E_m}$ .
9. Частоти всіх ліній у спектрі атома Гідрогену можна визначити за співвідношенням
  - А.  $\nu = R(n^2 - m^2)$ . Б.  $\nu = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ . В.  $\nu = c\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ . Г.  $\nu = \frac{1}{R}\left(\frac{1}{m^2} + \frac{1}{n^2}\right)$ .
  - Д.  $\nu = \frac{1}{R}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ .

10. Співвідношення між імпульсом частинки і довжиною хвилі записується так:

А.  $p = h\lambda$ . Б.  $p = \frac{h}{\lambda}$ . В.  $p = \frac{\lambda}{h}$ . Г.  $p = \frac{hc}{\lambda}$ . Д.  $p = \frac{\lambda}{hc}$ .

11. Заряд ядра визначається кількістю

А. нейтронів.

Б. нейтронів і протонів.

В. електронів і нейтронів.

Г. протонів.

Д. протонів і електронів.

12. Ізотопами називаються атоми, ядра яких мають

А. різні заряди, однакову масу.

Б. однакові заряди, різну масу.

В. однакові заряди, однакову масу.

Г. однакову масу і заряди.

Д. однакову кількість протонів і нейтронів.

13. Дефект маси дорівнює:

А.  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$ .

Б.  $\Delta m = M_{\text{я}} - Zm_p$ .

В.  $\Delta m = M_{\text{я}} - (A - Z)m_p$ .

Г.  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n$ .

Д.  $\Delta m = M_{\text{я}}$ .

14. Позитрон — це

А. античастинка електрона.

Б. античастинка протона.

В. електрон.

Г. протон.

Д. античастинка нейтрона.

15. Антинейтрино виділяється при перетворенні

А. протона в  $\alpha$ -розпаді.

Б. протона в нейтрон і протон.

В. нейтрона в протон і електрон.

Г. протона в ядро Гідрогену.

Д. протона в протон.

16. Для проведення термоядерного синтезу потрібна

А. висока температура.

Б. низька температура.

В. досягнення абсолютного нуля температур.

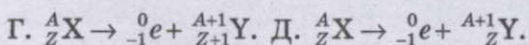
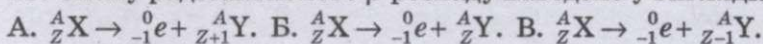
Г. кімнатна температура.

Д. температура, що досягається при згоранні природного газу.

17. Кількість нейтронів у ядрі  ${}^{96}_{40}\text{Zr}$  така:

А. 40. Б. 96. В. 136. Г. Відсутні. Д. 56.

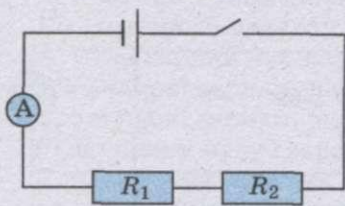
18. Схему радіоактивного  $\beta$ -розпаду наведено у вигляді:



## Для допитливих

1. Чи зміниться енергія зарядженого шкільного розсувного конденсатора, якщо відстань між його обкладками збільшити удвоє? Якщо зміниться, то за рахунок чого? У скільки разів?
2. Візьміть будь-який конденсатор. За написами на ньому визначте: 1) ємність конденсатора; 2) на яку напругу він розрахований; 3) який заряд він може накопичувати; 4) енергію, яку він може накопичити.

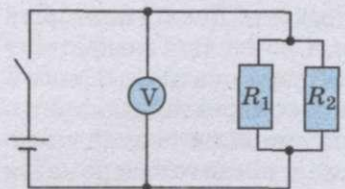
## РОБОТА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ



Мал. 222

**Мета роботи:** навчитися з'єднувати провідники послідовно і паралельно, визначати опір таких з'єднань, розподіл сил струмів і напруг.

**Прилади і матеріали:** батарея акумуляторів; дві електролампочки (опори); амперметр постійного струму на 2 А; вольтметр постійного струму на 4 В; реостат; перемикач; з'єднувальні провідники.



Мал. 223

## Хід роботи

1. Складіть електричне коло для вивчення послідовного з'єднання елементів за схемою (мал. 222).
2. Запишіть покази амперметра.
3. Вольтметр під'єднайте паралельно: а) до опору  $R_1$  і запишіть покази вольтметра  $U_1$ ; б) до опору  $R_2$  і запишіть покази вольтметра  $U_2$ ; в) до ділянки кола з обома опором і запишіть покази вольтметра  $U$ .
4. За даними амперметра і вольтметра визначте значення кожного опору і загальний опір кола.
5. Зробіть висновок, чи виконуються закони послідовного з'єднання елементів.
6. Складіть електричне коло для вивчення паралельного з'єднання елементів за схемою (мал. 223).
7. Запишіть покази вольтметра.
8. Амперметр під'єднайте послідовно: а) до опору  $R_1$  і запишіть покази амперметра  $I_1$ ; б) до опору  $R_2$  і запишіть покази амперметра  $I_2$ ; в) до ділянки кола з  $R_1$  і  $R_2$  і запишіть покази амперметра  $I$ .
9. За даними амперметра і вольтметра визначте значення кожного опору і загальний опір кола.
10. Зробіть висновок, чи виконуються закони паралельного з'єднання елементів.

## Для допитливих

Ви маєте три резистори, опір кожного з них 10 Ом. Які опори можна отримати за їх допомогою? Намалуйте ці з'єднання.



### РОБОТА № 3. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ

**Мета роботи:** обчислити довжину хвилі червоного і фіолетового кольорів у спектрі  $n$ -го порядку (вказаному вчителем); порівняти одержані результати з табличними даними.

Дифракційна ґратка закріплюється на одному кінці лінійки, ближче до другого кінця, приблизно на відстані 50 см від ґратки, розташовується сірий екран з вузькою вертикальною щілиною. Екран можна переміщувати по лінійці. Все закріплюється на штативі, як показано на малюнку 225.

Якщо подивитись крізь ґратку і щілину в екрані на джерело світла, то на темному фоні екрана можна спостерігати з обох боків від щілини дифракційні спектри 1, 2 і т.д. порядків.

Довжину світлової хвилі  $\lambda$  можна визначити з формули  $\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$ , де  $d$  — період дифракційної ґратки;  $k$  — порядок спектра;  $\varphi$  — кут, під яким спостерігається максимум світла відповідного кольору.

Оскільки кути, під якими спостерігаються максимуми 1 і 2 порядків не перевищують  $5^\circ$ , можна замість синусів користуватись тангенсами.

З мал. 224 видно, що  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$ . Відстань  $a$  відраховують від ґратки до екрана,

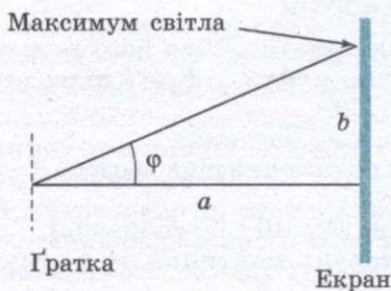
$b$  — по шкалі екрана від щілини до вибраної лінії спектра.

Остаточна формула матиме вигляд  $\lambda = \frac{db}{ka}$ .

**Прилади і матеріали:** дифракційна ґратка (період зазначено на ґратці), лінійка з тримачем, прикріпленим до неї, з екраном із вузькою вертикальною щілиною посередині, штатив з лапкою й муфтою, лампа розжарення (або свічка).

#### Хід роботи

- Зберіть вимірювальну установку (мал. 225). Екран встановіть на відстані 50 см від ґратки. Запишіть сталу дифракційної ґратки  $d = \dots$
- Дивлячись через дифракційну ґратку і щілину в екрані на джерело світла і пересуваючи ґратку в тримачі, встановіть її так, щоб дифракційні спектри розташовувались паралельно шкалі екрана.



Мал. 224



Мал. 225

3. За шкалою екрана визначте відстань  $b$  від щілини до лінії спектра визначеного вами кольору.

4. Обчисліть довжину хвилі  $\lambda$  світла в спектрі вибраного вами порядку за формулою

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

Те саме зробіть для визначення довжини хвилі світла іншого кольору та іншого порядку.

5. Виконайте розрахунки і зробіть висновки.

#### Для допитливих

1. Як впливає кількість штрихів дифракційної ґратки на відстані між світлими смугами і на їхні розміри в спектрі ґратки?
2. Чим відрізняється дифракційний спектр від дисперсійного?
3. Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?

### РОБОТА № 4. ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА

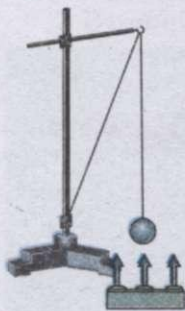
**Мета роботи:** визначити прискорення вільного падіння за допомогою маятника.

Під час виконання дослідів визначають прискорення вільного падіння, виходячи з формули періоду коливань математичного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Для цього необхідно виміряти період коливання і довжину підвісу маятника. Тоді за формулою  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$  можна розрахувати прискорення вільного падіння.

**Прилади і матеріали:** годинник із секундною стрілкою (секундомір), вимірювальна стрічка (рулетка), кулька з отвором, нитки, штатив з муфтою і кільцем.



Мал. 226

#### Хід роботи

1. Поставте на краю стола штатив. Біля його верхнього кінця закріпіть за допомогою муфти кільце і підвісьте до нього кульку на нитці (мал. 226).
2. Виміряйте довжину нитки  $l$  маятника.
3. Відхиліть маятник від положення рівноваги на 5—8 см і відпустіть його.
4. Виміряйте час коливань ( $N = 40—60$  коливань).
5. Визначте період коливань маятника за формулою

$$T = \frac{t}{N}.$$

6. Результати дослідів занесіть у таблицю:

Номер дослідів	$l$ , м	$\Delta l$ , м	$N$	$t$ , с	$t_{\text{сер}}$ , с	$\Delta t_{\text{сер}}$ , с	$T = \frac{t}{N}$ , с	$T_{\text{сер}}$ , с	$g_1$ , м/с <sup>2</sup>	$g_2$ , м/с <sup>2</sup>	$\Delta g_{\text{сер}}$ , м/с <sup>2</sup>	$\epsilon$ , %
1												
2												
3												
4												
5												

7. Після проведення наступних дослідів обчисліть середнє значення періоду коливань маятника.

8. Порівняйте визначене середнє значення  $g_{\text{сер}}$  з табличним значенням  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  і обчисліть похибки вимірювання:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} + \frac{2T_{\text{сер}}}{T_{\text{сер}}}; \Delta g = \epsilon g_{\text{сер}}.$$

9. Результати запишіть у такому вигляді:  $g = g_{\text{сер}} \pm \Delta g_{\text{сер}}$ . Зробіть висновки.

#### Для допитливих

- У розрахунках, що не потребують високої точності, формулу періоду математичного маятника можна записати так:  $T = 4l$ . Обґрунтуйте це наближення.
- До кульки математичного маятника вздовж нитки прикладено деяку силу  $\vec{F}$ . Чи вплине це на період коливання маятника?

### РОБОТА № 5. ВИВЧЕННЯ БУДОВИ ДОЗИМЕТРА І СКЛАДАННЯ РАДІОЛОГІЧНОЇ КАРТИ МІСЦЕВОСТІ

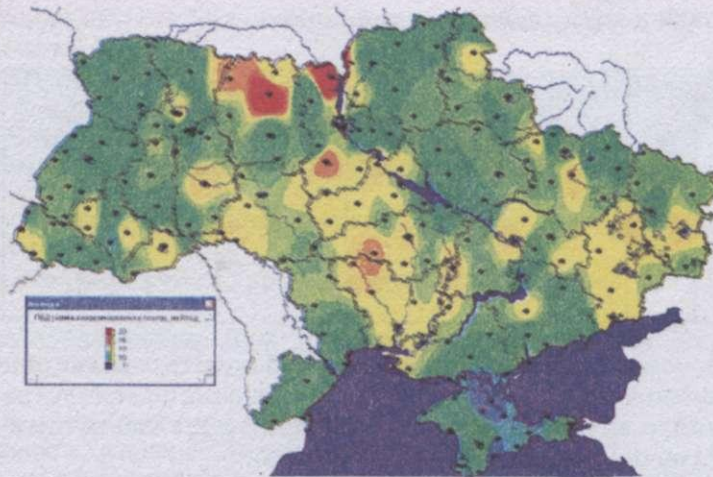
**Мета роботи:** вивчити будову дозиметра і скласти радіологічну карту своєї місцевості.

**Прилади і матеріали:** наявний у школі дозиметр (промисловий або саморобний).

#### Хід роботи

1. Ознайомтесь з картою радіаційного забруднення території України (мал. 227). Контрольний рівень радіаційного фону в Україні (потужність експозиційної дози) становить 25 мкР/год. Згідно з даними Міністерства охорони навколишнього середовища України потужність експозиційної дози опромінення вимірюється на постійних (стаціонарних) (вимірниках) постах. Усього таких стаціонарних постів вимірювань радіаційного фону в Україні — 155.

Як видно з карти, радіаційний фон не однаковий на території України. На значення радіаційного фону впливає ряд чинників. Основними є умови радіоактивного складу ґрунтів (наявність природних радіонуклідів і радіоактивних речовин, які потрапили в навколишнє середовище внаслідок діяльності людини: викиди теплових електростанцій, що працюють на



Мал. 227

вугіллі, металургійні підприємства і так далі). Також рівень радіаційного фону залежить від часу проведення вимірювань (наприклад, після дощу рівень потужності експозиційної дози може підніматися на 1–2 мкР/год за рахунок вимивання радіоактивних речовин з атмосфери).

Карта радіаційного фону України дає можливість візуального аналізу території. На ній видно істотно високі рівні фону на територіях, які були радіоактивно забруднені після аварії на Чорнобильській АЕС. Це території Київської і Житомирської областей. Відносно високі рівні радіаційного фону в центральних областях України — Кіровоградській і Дніпропетровській. Зробіть висновки.

2. За інструкцією до дозиметра вивчіть його будову і можливості для вимірювання радіаційного випромінювання.

3. Складіть карту (або використайте готову) своєї місцевості, виконайте відповідні вимірювання дозиметром і нанесіть на карту рівні радіоактивного забруднення.

4. Зробіть висновки.

#### РОБОТА № 6. ВИВЧЕННЯ ТРЕКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЗА ГОТОВИМИ ФОТОГРАФІЯМИ

**Мета роботи:** визначити напрям вектора індукції магнітного поля, виміряти радіуси кривизни треків, обчислити відношення заряду частинки до її маси.

За допомогою камери Вільсона спостерігають і фотографують треки (сліди) рухомих заряджених частинок. Трек частинки є ланцюжком з мікроскопічних крапельок води або спирту, перенасиченої пари цих рідин, що утворилася внаслідок конденсації на йонах. Йони ж утворюються внаслідок взаємодії зарядженої частинки з атомами і молекулами пари і газів, що знаходяться в камері.

Якщо камера Вільсона поміщена в магнітне поле, то на рухомі в ній заряджені частинки діє сила Лоренца, яка дорівнює (для випадку, коли швидкість частинки перпендикулярна до ліній поля):

$$F = qvB,$$

де  $q$  — заряд частинки;  $v$  — швидкість її руху;  $B$  — індукція магнітного поля. Правило лівої руки дозволяє показати, що сила Лоренца напрямлена завжди перпендикулярно до швидкості частинки і, отже, є доцентровою силою:

$$qvB = \frac{mv^2}{R},$$

де  $m$  — маса частинки;  $R$  — радіус кривизни її трека. Звідси

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Якщо частинка має швидкість набагато меншу, ніж швидкість світла (тобто частинка не релятивістська), то співвідношення між значенням її кінетичної енергії і радіусом кривизни має вигляд

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{B^2 R^2 q^2}{2m}.$$

#### Хід роботи

На фотографії видно треки ядер легких елементів (останні 22 см їх пробігу) (мал. 228, I—IV — треки різних частинок). Ядра рухалися в магнітному полі, індукція якого 2,17 Тл, напрямленому перпендикулярно до фотографії. Початкові швидкості всіх ядер однакові і перпендикулярні до ліній поля.

#### Завдання:

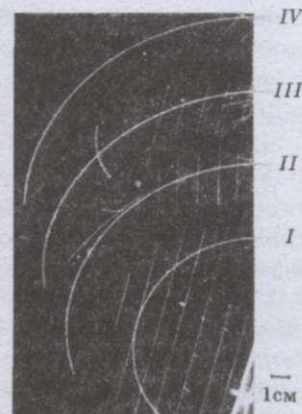
1. Визначте напрям вектора індукції магнітного поля. Поясніть, чому траєкторіями частинок є дуги кіл. Яка причина відмінності в кривизні траєкторій різних ядер? Чому кривизна кожної траєкторії змінюється від початку до кінця пробігу частинки?

2. Поясніть причини відмінності в товщині треків різних ядер. Чому трек кожної частинки товстіший наприкінці пробігу, ніж на його початку?

3. Виміряйте радіуси кривизни трека частинки I приблизно на початку і наприкінці пробігу і визначте, на скільки змінилася енергія частинки за час пробігу, якщо відомо, що частинка I ідентифікована як протон.

4. Виміряйте радіус кривизни трека частинки III на початку її пробігу. Знаючи, що початкова швидкість цієї частинки дорівнює початковій швидкості протона (нижній трек), обчисліть для частинки III відношення заряду до маси. За отриманим значенням визначте, ядром якого елемента є ця частинка.

Додаткове завдання. Решта треків належить ядрам дейтерію і тритію. Якому саме ядру належать трек II і трек IV?



Мал. 228

## УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ

### § 55. СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ

Ви завершили вивчення курсу фізики. Вивчений вами матеріал — це результат величезної дослідницької роботи, виконаної впродовж багатьох сторіч ученими всього світу з дослідження різних форм руху матерії, будови і властивостей матеріальних тіл.

У ході вивчення фізики та інших наук ви переконалися в тому, що, незважаючи на всю різноманітність, навколишньому світу властива єдність. Її характерна вона, перш за все, тим, що всі явища, якими б складними вони не здавалися, є різними за станами і властивостями рухомої матерії, але всі вони мають **матеріальне походження**. Єдність світу виявляється також у взаємозв'язку всіх явищ, можливостях взаємних перетворень форм матерії і руху, а разом з тим, в існуванні ряду загальних **законів руху матерії** (закони збереження енергії, імпульсу, електричного заряду, взаємозв'язку маси і енергії та ін.). Завдання фізики та інших природничих наук полягає в тому, щоб виявити найбільш загальні закони природи і пояснити на їх основі конкретні явища і процеси.

Відображенням єдності світу в пізнанні є синтез наукових знань, отриманих у процесі досліджень природи різними науками. На кожному етапі розвитку науки виникає необхідність об'єднання наукових знань в єдину систему знань про явища природи — у **природничо-наукову картину світу**. Під природничо-науковою картиною світу розуміють усю сукупність знань про предмети і явища природи, об'єднані основоположними ідеями, що отримали експериментальне підтвердження і зберегли свою об'єктивну цінність у розвитку людської думки.

Фізична картина світу надає частину всієї системи знань про природу, оскільки вона стосується тільки фізичних властивостей матеріальних тіл і фізичних форм руху матерії.

Фізична картина світу — сукупність уявлень про природу (матерію, рух, простір і час), заснованих на найбільш загальних принципах, гіпотезах і теоріях на певному етапі її розвитку.

Так, виникнення класичної механіки супроводжувалося створенням механічної, електродинаміки — електромагнітної, а теорії відносності і квантової механіки — квантово-релятивістської картини світу.

У розвитку людського пізнання і практичного освоєння світу завжди виявлялося прагнення сформулювати найбільш загальні закони і принципи, знання яких давало б ключ до пояснення всіх процесів. Розкриття таких законів завжди вважалося найважливішою умовою побудови єдиної наукової картини світу.

Основу єдності світу становить, перш за все, єдність будови матерії. З погляду сучасної фізики, існують дві основні форми матерії — **речовина і поле**. Речовина має переривчасту (дискретну) будову, а поле — неперервне. За відповідних умов частинки речовини можуть перетворюватися на кванти відповідних полів і, навпаки, кванти полів можуть перетворюватися на частинки речовини.

Усі атоми мають однакову структуру і побудовані з елементарних частинок трьох видів. У них є ядра з протонів і нейтронів, оточених електронами. Взаємодія між ядрами й електронами здійснюється електромагнітним полем, квантами якого є фотони. Взаємодію ж між протонами і нейтронами в ядрі здійснюють в основному  $\pi$ -мезони, які є квантами ядерного поля. При розпаді нейтронів з'являються нейтрино. Крім того, відкрито багато інших елементарних частинок. Але тільки при взаємодії частинок дуже великих енергій вони починають відігравати помітну роль.

У першій половині XX ст. було зроблено фундаментальне відкриття: усі елементарні частинки здатні перетворюватися одна в одну.

Після відкриття елементарних частинок і їх перетворень на перший план єдиної картини світу було поставлено єдність у будові матерії, в основу якої було покладено матеріальність усіх елементарних частинок. Різні елементарні частинки — це різні конкретні форми існування матерії.

Єдність світу виявляється і в законах руху частинок, і в законах їх взаємодії.

Незважаючи на дивовижну різноманітність взаємодій тіл одного з одним, у природі, за сучасними даними, є лише чотири типи сил: гравітаційні, електромагнітні, ядерні сили і сили слабкої взаємодії. Останні виявляються, головним чином, при розпаді елементарних частинок. З проявом усіх чотирьох типів сил ми зустрічаємося в безмежних просторах Всесвіту, у будь-яких тілах на Землі (у тому числі і в живих організмах), в атомах і атомних ядрах, при всіх перетвореннях елементарних частинок.

Револьюційна зміна класичних уявлень про фізичну картину світу відбулася після відкриття квантових властивостей матерії. З появою квантової фізики, що описує рух мікрочастинок, почали вимальовуватися нові елементи єдиної фізичної картини світу.

Поділ матерії на речовину, що має переривчасту будову, і неперервне поле втратило абсолютний сенс. Кожному полю відповідають кванти цього поля: електромагнітному полю — фотони, ядерному  $\pi$ -мезони і так далі. У свою чергу, всі частинки мають хвильові властивості. **Корпускулярно-хвильовий дуалізм властивий всім формам матерії.**

Отже, сучасна фізика акцентує на єдності природи. Проте багато що, можливо, навіть фізичну суть єдності світу, пояснити поки що не вдалося. Невідомо, чому існує так багато різних елементарних частинок, чому вони мають ті або інші значення мас, зарядів й інших характеристик. До цього часу всі ці величини визначаються тільки експериментально. Проте все виразніше вимальовується зв'язок між різними типами взаємодій. Електромагнітні і слабкі взаємодії вже об'єднані в рамках однієї теорії. З'ясована структура більшості елементарних частинок.

*«Тут приховані такі глибокі таємниці і такі піднесені думки, що, незважаючи на старання сотень кмітливих мислителів, що трудилися протягом тисяч років, ще не вдалося проникнути в них, і радість творчих пошуків і відкриттів все ще продовжує існувати».* Ці слова, сказані Г. Галілеєм близько чотирьох сторіч тому, аніскільки не застаріли.

Фундаментальні закони, що встановлюються у фізиці, за своєю складністю і спільністю набагато випереджають ті факти, з яких починається дослідження будь-яких явищ. Але вони такі ж достовірні і такі ж об'єктивні,

як і знання про прості явища, спостережувані безпосередньо. Ці закони не порушуються ніколи, ні за яких умов.

Матеріальна єдність світу виявляється також в абсолютності і відносності існування матерії, в її нестворюваності і незнищенності, підтверджених усім розвитком природознавства. Про це свідчать конкретні закони збереження і перетворення фізичних величин, що характеризують різні властивості матерії і її руху. Ці окремі закони є конкретними виразами об'єктивних загальних властивостей нестворюваності і незнищуваності матерії і руху.

Сучасна фізична картина світу є результатом узагальнення найважливіших досягнень усіх природничих наук. Проте, хоч ця картина світу і відрізняється великою узагальненістю і успішно пояснює багато явищ, все ж таки в природі існує невичерпна кількість явищ, які сучасна фізична картина світу пояснити не може. З числа таких утруднень слід, перш за все, вказати на ті, що пов'язані зі створенням єдиної теорії елементарних частинок, єдиної теорії поля, єдиної теорії електромагнітних явищ та інше. Тому не можна вважати сучасну фізичну картину світу скільки-небудь завершеною. Складність світу перевершує і завжди перевершуватиме складність людських уявлень про нього.

### ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке фізична картина світу?
2. Від чого залежить розвиток фізичної картини світу?
3. Що притаманне всім формам матерії?

## **§ 56. НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС І ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ**

Упродовж багатьох сторіч штучні, тобто антропогенні, джерела забруднення навколишнього середовища не впливали помітно на екологічні процеси, хоча деякі галузі індустрії, зокрема металургія і обробка металів, були досить поширені ще до нашої ери. Найбільше значення в ті часи мали виробництва металів (міді, срібла, золота, свинцю, олова, заліза, сурми, ртуті), скла, мила, гончарних виробів, фарб, хліба, вина і деяких інших продуктів. Як правило, вказані продукти отримували як результат окиснювально-відновних реакцій, умови протікання яких визначалися емпіричним шляхом. В атмосферу виділялися такі з'єднання, як оксиди вуглецю, сірки й азоту, пари металів, зокрема ртуть, у водойми потрапляли відходи фарбувальних і харчових виробництв.

Першим законом про охорону навколишнього середовища вважається вердикт англійського короля Едуарда IV (1273), який забороняв використання кам'яного вугілля для опалення помешкань Лондона. За його порушення мешканці підлягали страті.

До XVIII ст. основними джерелами забруднення навколишнього середовища були побутові стічні води, а також продукти згоряння палива, вживаного для опалювання приміщень: оксид і діоксид вуглецю, сажа, зола, а також сірчистий ангідрид у районах, де використовувалося кам'яне вугілля. Накопичення відходів тоді ще істотно не впливало на загальні екологічні умови.



Інтенсивне забруднення навколишнього середовища починається з другої половини ХІХ ст. З винаходом парової машини промисловість поступово стає дедалі значним забрудником, оскільки різко зростає споживання палива. Розвиток чорної металургії спочатку з використанням деревного вугілля, а потім коксу все сильніше і сильніше впливає на загальне забруднення атмосфери. Інтенсифікується розвиток зв'язаних з металургією галузей, таких як видобуток вугілля, добування і виробництво концентратів і шихтових матеріалів, нарешті, виникає коксохімія, що призводить до утворення стічних вод і твердих відходів. У зв'язку з розвитком залізниць все більшим джерелом забруднення атмосфери стає транспорт. У цей період число інгредієнтів-забруднювачів поволі збільшується разом із зростанням загальної їх кількості.

З появою двигунів внутрішнього згоряння і крупних теплових електростанцій, а також у зв'язку з подальшим розвитком хімічної промисловості якісний склад забруднювачів істотно змінився. У повітряний басейн почали викидати значну кількість оксидів азоту, сполук свинцю і ртуті, а також аміак, сірководень, вуглеводні, альдегіди, бензапірен тощо; у водойми потрапляла велика кількість різних хімічних сполук. Ростуть гори шлакових відходів і терикони, з'являються перші «білі моря» содового виробництва, будуються шлаконакопичувачі.

Споживацьким ставленням до природи, нерозсудливим втручанням в неї людина створила багато екологічних проблем, які тепер викликають виправдану тривогу.

Щорічно внаслідок спалювання палива в атмосферу потрапляє 20 млрд т діоксиду вуглецю. Тільки при використанні вугілля і мазуту виділяється більше ніж 150 млн т сірчистого газу. Щороку в річки скидається близько 160 км<sup>3</sup> промислових стоків. За такий же інтервал часу у ґрунти вноситься понад 500 млн т мінеральних добрив і приблизно 3 млн т отрутохімікатів, третина яких змивається у води суші й океану.

Спостерігаються небезпечні явища, які можуть радикально змінити зовнішність планети, загрожують існуванню багатьох видів рослин і тварин, являють собою небезпеку і для людського роду. Щорічно приблизно 6 млн га продуктивних земель перетворюються на пустелі. Через три десятиліття площа, що піддається, таким чином, запустинюванню, буде приблизно дорівнювати площі Саудівської Аравії. Щорічно знищується більше ніж 11 млн га лісу, і через три десятиліття площа загублених лісів буде приблизно дорівнювати площі Індії. Значна частина території, на якій раніше росли ліси, перетворюється на сільськогосподарські землі низької якості, які не можуть прогодувати людей, що живуть на цих землях.

У Європі кислі осадки знищують ліси і озера, спричиняють збитки художній і архітектурній спадщині націй; не виключається вірогідність того, що внаслідок підкиснення ґрунтам на величезних ділянках було завдано практично непоправної шкоди.

Унаслідок спалювання мінерального палива в атмосферу викидається діоксид вуглецю, що є причиною поступового потепління глобального клімату. Внаслідок такого «парникового ефекту» середні глобальні температури можуть зрости в ХХІ ст. настільки, що зміняться райони сільськогосподарського виробництва, моря вийдуть з берегів і затоплять прибережні міста, економіка зазнає серйозних втрат.

Інші гази промислового походження здатні пошкодити захисний озоновий шар планети, внаслідок чого різко зростає число захворювань людини і тварин раком.

**Озоновий екран (озоносфера)**, що знаходиться на висоті 10—50 км, — це атмосферна зона з максимальною кількістю озону. Своїм існуванням озоновий шар завдячує діяльності фотосинтезуючих рослин і дії на кисень ультрафіолетових променів, він захищає все живе на Землі від згубної дії цих променів. Останніми роками вчені стурбовані тим, що товщина озонового шару поступово зменшується.

У 1986 р. англійським дослідником **Дж. Фарманом** була виявлена озонова дірка — розрив у озоновому шарі атмосфери Землі (діаметром понад 103 км), що виник над Антарктидою і переміщується в населені райони Австралії. Озонова дірка виникла, ймовірно, внаслідок антропогенної дії, зокрема широкого використання в промисловості і побуті хладонів (фреонів), що руйнують озоновий шар. Озонова дірка несе небезпеку живим організмам, оскільки озоновий шар захищає поверхню Землі від надмірного ультрафіолетового випромінювання Сонця. У 1992 р. озонова дірка виявлена також над Арктикою, а в 1996 р. — і над центральною Європою.

Однією з актуальних і серйозних проблем, яку слід розв'язати негайно, є органічне забруднення. Це хлоровуглеці, діоксиди, вуглеводні, поліциклічні ароматичні вуглеводні, що є результатом спалювання природного палива. Всі вони мають мутагенні і канцерогенні властивості.

Учені Землі стурбовані такими процесами, що відбуваються в природі. Індустріалізація, що зростає, отруює атмосферу, забруднює річки, озера, моря. Видобуток корисних копалин руйнує покрив Землі. Гідроелектростанції змінюють географію цілих регіонів. Дуже часто нерозсудливо і безгосподарно вирубується ліс. Безграмотне ведення сільського господарства викликає ерозію ґрунтів. Різні хімікати змінюють склад землі і води. Ми будуємо міста і дороги, віднімаючи у живої земної рослинності все більшу територію — щодня один вид дрібних тварин, щороку — великих тварин відходять у небуття. Людство відчуває нестачу в землях, придатних для сільського господарства, адже населення Землі неухильно зростає.

Якщо станеться глобальне потепління на Землі тільки на один градус, то відразу ж постраждають нестійкі природні системи, розташовані в тропічній зоні. Достатньо лише, щоб на кілька відсотків скоротилася кількість опадів, і життя на значних територіях зникне. Так свого часу закінчила своє існування ціла цивілізація на території Сахари. Отже, треба знати не тільки існуючі тенденції зміни середовища, а й те, як вони трансформуватимуться в майбутньому. У 1875 р. австрійський геолог **Е. Зюсс** увів поняття «біосфера». Він виділив біосферу як самостійну оболонку Землі (разом з літосферою, гідросферою і атмосферою), в якій живі організми і місце їх існування органічно пов'язані і взаємодіють один з одним. Найбільший внесок у науку про біосферу зробив видатний природодослідник **В. Вернадський**. Ще в 1926 р. ним була опублікована книга «Біосфера», де він розглядав закономірності функціонування біосфери як єдиної системи з визначальною роллю живої речовини. Чітких меж біосфера не має. На континентах її нижня межа заглиблюється до 2—3 км, а під океанами сягає глибин 0,5—1 км. Верхньою межею біосфери слугує озоновий екран, розташований на висоті 23—25 км над рівнем моря.

Незважаючи на колосальні екологічні резерви біосфери, деякі антропогенні дії призводять до різко негативних наслідків, з якими вона справитися не в змозі (в усякому разі швидко). Стосовно цього найнегативніший вплив на забруднення навколишнього середовища спричиняється хімічними речовинами. Не менших, а іноді й більших збитків завдає інтенсивне, нераціональне використання природних ресурсів, під час якого може знищуватися навіть можливість природи до їх відтворення, якщо вони поновлювані; а непоновлювальні ресурси вичерпуються, виснажуються швидше, ніж людське суспільство буде в змозі перебудувати економіку, свою господарську діяльність. Екологи одними з перших усвідомили ці проблеми. До цього привертає їх увагу сама наука, що вивчає єдність життя, взаємовідносини природи і суспільства, тварин, рослин і людини та їх ставлення до місця свого існування, взаємини людини з навколишнім середовищем.

Людство підходить до такого рубежу, де його чекає революційний перехід (він уже розпочався) до природозберігаючих, екологічно обґрунтованих технологій, виробництв, проектів, до того, щоб діяльність людини вписувалася в природні процеси, а не пригнічувала їх.

На основі широкого використання новітніх досягнень науково-технічного прогресу з'являється можливість створення нової прогресивної технології, відповідного їй апаратного оформлення, на яких базуються виробництва, що за своєю суттю стають екологічно чистими, не завдають шкоди навколишньому середовищу. Реальним є одночасне розв'язання економічних, технічних, організаційних і екологічних проблем розвитку суспільного виробництва при менших витратах.

Розвиток біотехнології матиме велике значення для навколишнього середовища. Продукти генної інженерії можуть істотно поліпшити здоров'я людей і тварин. Дослідники знаходять нові ліки, методи терапії і способи боротьби з переносниками інфекцій. Нові високоурожайні види зернових, а також сорти, стійкі до несприятливих кліматичних умов, можуть привести до корінних змін у сільському господарстві. Доступнішими стануть комплексні методи боротьби з сільськогосподарськими шкідниками. Біотехнологія може також забезпечити екологічно нешкідливі й ефективні альтернативи багатьом неекономічним процесам і продуктам, які є джерелом забруднення. Нові методи обробки твердих і рідких відходів можуть допомогти розв'язати і нагальну потребу їх видалення.

Учені розробили оригінальний спосіб вирощування тіонових бактерій, здатних окиснити залізо і сульфідні рідких металів. Біомаса таких бактерій може використовуватися в біометалургії для вилуговування сульфідних руд і концентратів кольорових металів.

Досягнення в космічній технології також є багатообіцяючими. Прогнози погоди, що надаються через мережу супутників та інші засоби зв'язку, допомагають людям приймати рішення про те, коли сіяти, поливати, вносити добрива і збирати урожай. Дистанційне зондування і супутникові зйомки можуть забезпечити оптимальне використання ресурсів Землі, дозволяючи проводити моніторинг і оцінку довготермінових тенденцій у змінах клімату, забрудненні морського середовища, темпах ерозії ґрунту і рослинного покриву.

Особливо актуальною стає проблема комплексного, дбайливого використання природної сировини. До заходів щодо комплексного використання

природної сировини слід віднести створення і впровадження маловідхідних і замкнених технологій, організацію використання вторинних ресурсів. На сьогодні у світі проводиться робота із залучення до народногосподарського обороту шкідливих для навколишньої природи багатотоннажних відходів, які замінюють дефіцитні види сировини і матеріалів.

Основними напрямками використання відходів виробництва і уловлюваних очисними установками речовин є повернення їх у виробництво як сировини і напівпродуктів, використання як готового продукту і палива; у сільському господарстві — як регуляторів росту рослин і для нейтралізації ґрунтів; у виробництві будівельних матеріалів — як вихідну сировину. Таким чином, проблема раціонального використання вторинних матеріальних ресурсів (і на основі цього скорочення потреби в первинних, у тому числі і природних) поєднує інтереси охорони природи з підвищенням економічної ефективності виробництва.

Велике значення має використання нових, найбільш ефективних фізичних, хімічних або біологічних принципів дії в тому або іншому виробництві або процесі. Прикладом може слугувати вдосконалення методів водочищення за рахунок переходу від випарних систем до мембранних технологій. Ефективність витрат при розв'язанні завдань подібного класу зростає у 8—10 разів.

На сьогодні розроблені методи комплексного енерготехнічного використання низькосортного твердого палива, з якого за допомогою термічного розкладання отримують якісне тверде, рідке і газоподібне паливо, а також сировину для хімічної промисловості й виробництва будівельних матеріалів. Зольний залишок використовується в сільському господарстві.

Прискорення науково-технічного прогресу надає в розпорядження держави величезні можливості для розвитку продуктивних сил, удосконалення людської особистості, побудови гармонійних відносин з природою. Глобальна екологічна проблема може бути розв'язана. Але для цього потрібні мир, роззброєння, усвідомлені спільні зусилля всіх держав. Досвід співпраці країн земної кулі у благородній справі охорони навколишнього середовища свідчить про те, що зроблені лише перші кроки в потрібному напрямі.

## ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Покажіть, як впливає науково-технічний прогрес на екологічні процеси.
2. Які основні екологічні проблеми існують на сьогодні?
3. Які перспективи подолання екологічних проблем?
4. Назвіть екологічні проблеми вашого краю, пов'язані з науково-технічним прогресом.

## **§ 57.** ФІЗИКА І ЗАГАЛЬНОЛЮДСЬКІ ЦІННОСТІ

Фізика безпосередньо впливає на інші науки, як природничі, так і гуманітарні, забезпечує їх швидкий розвиток, а також сприяє виникненню нових наук.

Немає жодної людини, якій не доводилося б спостерігати за зірками на небі. І відразу ж виникає ряд цікавих запитань. *Що є Всесвіт? Що відбувається в далеких від нас світах? Чи існує межа у Всесвіті? Що таке зоряні скупчення? Чи самотні ми у Всесвіті?* Можна нескінченно милуватися небом і думати про нього, але відповіді не знайдеш, якщо не будеш використовувати фізичні

установки, прилади і застосовувати закони фізики. І людина створила такі прилади і відкрила такі закони. Спочатку були просто зорові труби, а на сьогодні це величезні радіотелескопи, які уловлюють випромінювання, що йдуть із Всесвіту з величезних відстаней (декількох мільярдів світлових років; світловий рік — це відстань, яку світло проходить із швидкістю  $3 \cdot 10^8$  м/с за один рік). Матеріал, отриманий за допомогою астрофізичної апаратури, розшифровують і дізнаються про абсолютно нові процеси, що відбуваються у Всесвіті.

Таким чином, на стику фізики й астрономії виникла нова наука — **астрофізика**, що досягла колосальних успіхів у другій половині ХХ ст.

Мозок людини — унікальне і дивовижне явище природи! У ньому народжуються думки, які є керівниками продуктивної людської діяльності. Проте механізм мислення до теперішнього часу ще мало вивчений, хоча за допомогою такого фізичного приладу, як електроенцефалограф, навчилися проводити різні дослідження.

А загадка спадковості, що мучила вчених багато років! *Чому, наприклад, дитина успадковує ознаки матері і батька?* Ця загадка була розгадана, коли за допомогою рентгенівського випромінювання була вивчена структура молекул, що є носіями спадковості. На стику фізики і біології виникла одна з перспективних на сьогодні наук — **біофізика**.

Бурхливий розвиток фізики в останні десятиліття, розширення сфери її застосування, впровадження нових методів дослідження й апаратури привели до того, що деякі розділи фізики отримали право на самостійне існування. До них відносять астрофізику, біофізику, геофізику, фізичну хімію, хімічну фізику, фізику напівпровідників тощо. Природно, що між різними розділами немає різкої межі, вони частково перекриваються, збагачуючи один одного. Широке практичне застосування отримали такі фізико-технічні науки, як радіоелектроніка, радіофізика, електроакустика, космічна фізика.

Сучасний фахівець, у якій би галузі він не працював, повинен бути всебічно розвиненим, знати основи наук, у тому числі й фізики. Це стосується не тільки тих, хто створює музичні інструменти, ставить експеримент або відтворює уявлення ілюзіону, а й тих, хто присвятив себе музиці, культурі і мистецтву, які, як може здатися на перший погляд, не пов'язані безпосередньо з фізикою.

Отже, фізичні методи дослідження проникли в багато наук, і тому фізика є на сьогодні лідером природознавства, що породжує виникнення нових наук.

Ми говорили про практичне значення фізики в житті сучасного суспільства. Цим її роль не вичерпується. Фізика стала основою для певних принципів наукового стилю мислення. Це і впевненість у неминучості відкриття парадоксальних фактів, і в тому, що все в світі причинно обумовлено, а головне, — при аналізі будь-якої події можна знайти її причини. Це і здоровий скептицизм, і прагнення поставити під сумнів свої і чужі твердження, перевіряючи їх фактами й експериментальними даними.

З найперших кроків зародження наукових знань людям було властиве прагнення не тільки зрозуміти окремі природні явища, а й створити загальне цілісне уявлення про світ. Це прагнення ґрунтувалося на переконанні, що світ — це не скупчення розрізнених речей і подій, а єдине взаємозв'язане ціле, що розвивається. Зверніть увагу, як про це сказав давньогрецький учений

**Геракліт:** «Світ... не створений ніким з людей і богів, а був, є і буде вічно живим вогнем, що закономірно спалахує і закономірно згасає».

Правда, стародавні мислителі намагалися всі багатства зовнішнього світу звести до першооснов, з яких складається те, що існує (такими у Емпедокла були вогонь, земля, вода, повітря). На сьогодні це вкрай наївні уявлення, але сама ідея, покладена в їх основу, не застаріла і сьогодні: світ — це єдине ціле, і людина може і повинна створити у своїй свідомості загальну картину природи. Впевненість у цьому була і на сьогодні є джерелом того невичерпного оптимізму і надзвичайної наполегливості, з якими фізики всіх епох шукали і продовжують шукати загальні закони природи, з яких складається узагальнений образ, загальна модель природи, що покладена в основу нашого світобачення. *«Людина прагне якимсь адекватним способом створити в собі просту і зрозумілу картину світу. Вищим обов'язком фізиків є пошук тих загальних елементарних законів, з яких можна отримати картину світу»*, — підкреслював **А. Ейнштейн**. У кожної людини завдяки вивченню фізики повинно залишитися загальне розуміння фізичної картини світу. Таким чином, фізика як наука, що дає світоглядні знання і норми мислення, є найважливішим елементом загальнолюдської культури.

Видатний фізик ХХ ст., один з творців квантової фізики, **Н. Бор** говорив: *«Встановити різку відмінність між філософією природознавства і людською культурою, звичайно, неможливо. Насправді, фізичні науки є невіддільною частиною нашої цивілізації; це відбувається не тільки тому, що наше оволодіння силами природи, яке все збільшується, абсолютно змінило матеріальні умови життя, а й тому, що вивчення цих наук дало так багато для з'ясування того оточення, на тлі якого існуємо ми самі»*.

Академік **П. Капіца** свого часу підкреслював, що *«...красота і захоплення проникненням в нові, незвідані області і полягає в тому, що людина не може передбачати того, що вона там для себе знайде. Весь накопичений історичний досвід показує, що проникнення в нові галузі завжди відкриває і нові можливості поняття людської культури»*.

А ось вислів американського фізика — творця водневої бомби — **Е. Теллера**: *«Учений не відповідає за закони природи. Його справа полягає тільки в тому, щоб з'ясувати, яким чином вони функціонують. Питання про те, чи потрібно робити водневу бомбу, застосовувати чи ні, вченого не стосується»*. Цікаво, а як би ви поставилися до цієї думки?

Видатний англійський філософ і природодослідник **Ф. Бекон** проголосив фізику *«матір'ю всіх наук»*, яка перша вказує шлях розвитку культури людства. *«Головне, робіть все з пристрастю. Це дуже прикрашає життя»*, — зазначав свого часу **Л. Ландау**, видатний фізик, лауреат Нобелівської премії.

Врешті-решт, за висловом одного із знаменитих фізиків **М. Лауе**, *«освіта є те, що залишається після того, як все вивчене забуте»*. У цьому афоризмі є глибокий сенс.

## ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що відбувається на стику фізики та інших наук?
2. Як фізика пов'язана із загальнолюдськими цінностями? Опишіть це.

## Узагальнююче повторення курсу фізики



### 7 клас

Будова речовини. Світлові явища

### 8 клас

Механічний рух. Робота і енергія.  
Кількість теплоти

### 9 клас

Електричне поле. Електричний струм.  
Магнітне поле. Атомне ядро. Ядерна  
енергетика. Основи динаміки

### 10 клас

Основи кінематики. Релятивістська  
механіка. Властивості газів, рідин,  
твердих тіл. Основи термодинаміки

## 7 КЛАС БУДОВА РЕЧОВИНИ

**Густина речовини** — це фізична величина, яка визначається відношенням маси тіла до його об'єму:  $\rho = \frac{m}{V}$ , де  $\rho$  ( $\rho_0$ ) — густина речовини,  $m$  — маса тіла,  $V$  — об'єм тіла. Одиницею густини речовини є **один кілограм на метр кубічний (1 кг/м<sup>3</sup>)**.

**Молекулою** називається найменша частинка речовини, що має її основні хімічні властивості та складається з атомів.

Фізична величина, що характеризує теплове розширення матеріалу і визначається відношенням зміни довжини тіла внаслідок його нагрівання на 1 °С до його початкової довжини, називається **температурним коефіцієнтом лінійного розширення**:  $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t}$ , де  $\Delta l = l - l_0$  — зміна довжини тіла,  $\Delta t = t - t_0$  — зміна температури тіла,  $l_0$  — початкова довжина тіла при температурі  $t_0$ ,  $l$  — довжина тіла при температурі  $t$ .

### СВІТЛОВІ ЯВИЩА

Вчення про світло і світлові явища називається **оптикою**. **Джерела світла** — це всі тіла, які випромінюють світло. За характером випромінювання розрізняють **теплові і люмінесцентні** (люмінесценція — від латинського слова *люмен* (люмінус) — світло, холодне світіння) **джерела світла**. Джерела світла поділяють на **природні й штучні**. **Приймачі світла** — це тіла, чутливі до світла.

**Фотометрія** — розділ оптики, в якому розглядаються енергетичні характеристики світла в процесах його випромінювання, поширення та взаємодії з середовищем. **Світловий потік** — це фізична величина, яка визначається кількістю оцінюваної за зоровим відчуттям світлової енергії  $W$ , що падає на поверхню за одиницю часу  $t$ :

$\Phi = \frac{W}{t}$ . Одиницею світлового потоку є **один люмен** (1 лм). **Сила світла** — фізична

величина, що характеризує світіння джерела в певному напрямку:  $I = \frac{\Phi}{4\pi}$ , де  $\Phi$  —

повний світловий потік,  $\pi = 3,14$ . Одиницею сили світла в СІ є **одна кандела** (1 кд).

**Освітленість** — фізична величина, яка визначається світловим потоком  $\Phi$ , що падає на одиницю освітленої поверхні  $S$ :  $E = \frac{\Phi}{S}$ . **1 люкс** — це освітленість такої поверхні,

на 1 м<sup>2</sup> якої падає світловий потік 1 лм. Якщо поверхня розташована перпендикулярно до напрямку поширення світла від точкового джерела і світло поширюється в чисто-

му повітрі, то освітленість:  $E = \frac{I}{R^2}$ , де  $I$  — сила світла джерела,  $R$  — відстань від

джерела світла до поверхні.

**Закон поширення світла в однорідному середовищі**: в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно.

**Промінь світла** — це лінія, вздовж якої поширюється світло. Якщо світлові промені обмежити певною поверхнею у просторі, то отримаємо **світловий пучок**. **Тінь** — частина простору за непрозорим предметом, куди не проникає світло. Якщо розміри джерела світла дуже малі порівняно з відстанню від джерела світла до екрана, то таке джерело називають **точковим джерелом світла**.

**Зако́ни відбивання світла**: 1. Промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр, проведений у точку падіння променя, лежать в одній площині. 2. Кут відбивання дорівнює куту падіння.



Якщо поверхня дзеркала є площиною, то таке дзеркало називають **плоским дзеркалом**. Зображення предмета в плоскому дзеркалі є уявне і пряме. Воно завжди розміщене на такій самій відстані за дзеркалом, на якій предмет розміщений перед дзеркалом. Розміри зображення предмета в плоскому дзеркалі дорівнюють розмірам самого предмета.

**Закони заломлення світла:** 1. Падаючий і заломлений промені лежать в одній площині з перпендикуляром, проведеним у точку падіння променя до площини поділу двох середовищ. 2. Залежно від того, з якого середовища і в яке переходить промінь, кут заломлення може бути більшим або меншим від кута падіння.

**Сонячне світло складається з семи кольорів.** Розкладання білого світла тригранною призмою пояснюється тим, що окремі кольорові промені заломлюються в ній неоднаково. Найменше заломлюються промені червоного світла, а найбільше — фіолетового. Отже, розташування кольорів у спектрі завжди буде однаковим. Біле світло можна отримати шляхом змішування тільки трьох кольорів — червоного, зеленого і синього. Червоний, зелений і синій кольори — це основні, або первинні, кольори спектра.

## 8 КЛАС МЕХАНІЧНИЙ РУХ

Зміну положення тіла з часом відносно інших тіл називають **механічним рухом**. **Матеріальна точка** — це об'єкт без розмірів, подібно до геометричної точки, який має масу досліджуваного тіла. Рух тіл завжди відносний. Усі тіла природи перебувають у русі, тому будь-який рух або спокій є відносним, тобто стан тіла залежить від того, відносно якого тіла цей стан розглядають.

Розділ фізики, в якому вивчають звукові явища, називають **акустикою**. Будь-яке тверде, рідке чи газоподібне тіло, що здійснює коливання зі звуковою частотою, створює в навколишньому середовищі звукову хвилю. Звук, створений тілом, яке гармонічно коливається, називають **музичним тоном** або **тоном**. **Гучність звуку** залежить від амплітуди коливань у звуковій хвилі. Одиницею гучності в СІ є **один децибел** (1 дБ). **Висота звуку** залежить від частоти коливань. **Шум** — це хаотична суміш багатьох звукових коливань різних частот і амплітуд.

**Звукова хвиля** — це поширення шарів згущеного і розрідженого повітря, які чергуються у просторі і спричинені коливаннями джерела. Швидкість поширення звуку:

$$v_{\text{зв}} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu. \text{ Швидкість поширення звуку в середовищі залежить від температури.}$$

**Інфразвукові коливання** (інфразвук) — це коливання, частота яких менша за 16 Гц — найнижчу частоту звукових коливань. **Ультразвукові коливання** (ультразвук) — це коливання, частота яких більша за 20000 Гц — найвищу частоту звукових коливань.

## ВЗАЄМОДІЯ ТІЛ

Унаслідок взаємодії тіл вони змінюють швидкість і напрям свого руху, а також деформуються. Явище збереження швидкості руху тіла за відсутності дії на нього інших тіл називають **інерцією**. **Маса тіла** — це фізична величина, яка характеризує інертність тіла.

Величину, що визначається відношенням сили тиску  $F$  до площі поверхні  $S$ , на яку вона діє, називають тиском  $p = \frac{F}{S}$ . Одиницею тиску є **один паскаль** (1 Па). **За-**

**кон Паскаля:** тиск, створюваний на рідину або газ зовнішніми силами, передається рідиною або газом однаково в усіх напрямках. Тиск рідин, зумовлений силою тяжіння, називають **гідростатичним**:  $p = \rho gh$ , де  $\rho$  — густина рідини,  $g = 9,91 \text{ м/с}^2$ ,  $h$  — висота стовпа рідини.

**Гідравлічна машина** дає вигоду у силі у стільки разів, у скільки разів площа великого поршня більша за площу малого:  $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$ .

З'єднані між собою посудини, в яких рідина може вільно протікати з однієї посудини в іншу, називають **сполученими посудинами**. У сполучених посудинах вільні поверхні однорідної рідини встановлюються на одному рівні. Якщо в колінах сполучених посудин різні рідини, то виконується співвідношення:  $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ . **Шлюзи** — гідро-

технічна споруда для переведення суден на річці або каналі з одного рівня на інший.

Тиск, який створює атмосфера на всі тіла, що в ній перебувають, а також на земну поверхню, називають **атмосферним тиском**. Тиск атмосфери, що дорівнює тиску стовпа ртуті висотою 760 мм при температурі 0 °С, називають **нормальним атмосферним тиском**. 1 мм рт.ст. = 133,3 Па. 760 мм рт.ст. = 101 325 Па. **Манометри** — вимірювальні прилади, призначені для вимірювання тиску або різниці тисків.

На тіло, занурене повністю у рідину, діє **архімедова сила**, яка визначається за формулою:  $F_A = \rho_p g V_T$ , де  $\rho_p$  — густина рідини,  $g = 9,81$  Н/кг,  $V_T$  — об'єм зануреного тіла.

## РОБОТА І ЕНЕРГІЯ

**Механічна робота** прямо пропорційна прикладеній до тіла силі й відстані, на яку це тіло переміщується:  $A = Fl$ , де  $F$  — прикладена сила,  $l$  — шлях, пройдений тілом у напрямі дії сили. Одиницею роботи є один джоуль (1 Дж). **Потужність** — це фізична величина, яка визначається відношенням виконаної роботи до затраченого часу:

$N = \frac{A}{t}$ , де  $A$  — механічна робота,  $t$  — час виконання роботи. Одиницею потужності є один ват (1 Вт).

**Механізм** — пристрій, що передає рух або перетворює один вид руху в інший. **Машина** — механізм або поєднання механізмів для перетворення енергії з одного виду в інший. **Важіль** — тверде тіло, яке може обертатися навколо нерухокої опори. Важіль виграшу в роботі не дає. **Блок** — це колесо з жолобом, закріплене в обоймі. **Рухомий блок** — це блок, вісь якого піднімається або опускається разом з вантажем. Рухомий блок дає виграш у силі в два рази. **Коловорот** — різновид важеля. Різновиди **похилої площини**: клин, гвинт. **Золоте правило механіки**: жодний простий механізм виграшу в роботі не дає: у скільки разів виграємо в силі, в стільки саме разів програємо у відстані.

Відношення корисної роботи до повної (затраченої) роботи називають **коефіцієнтом корисної дії (ККД)** механізму:  $\eta = \frac{A_k}{A_z} 100\%$ .

## КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ

**Тепловий рух** — це безладний рух атомів і молекул, який визначає температуру тіла. Енергію руху та взаємодії частинок, з яких складається тіло, називають **внутрішньою енергією**. Внутрішню енергію тіла можна збільшити, виконуючи над ним роботу. Якщо роботу виконує саме тіло, внутрішня енергія його зменшується. **Теплообмін** — процес передачі енергії від нагрітого тіла до холодного без виконання над ними роботи. Передачу тепла від більш нагрітої частини тіла до менш нагрітої внаслідок теплового руху частинок тіла (без перенесення речовини) називають **теплопровідністю**. **Конвекція** — процес перенесення енергії струменями рідини або газу. **Випромінювання** — вид теплообміну, який може відбуватися без проміжного середовища між тілами і зумовлений випусканням і поглинанням ними теплового проміння.

Щоб визначити кількість теплоти  $Q$ , яку потрібно затратити для нагрівання (або яка виділяється при охолодженні) тіла масою  $m$ , треба питому теплоємність речовини  $c$  помножити на масу тіла  $m$  і різницю температур  $(t_2 - t_1)$ :  $Q = cm(t_2 - t_1)$ .

Процес переходу речовини з твердого стану в рідкий називають **плавленням**. Процес переходу речовини з рідкого стану в твердий називають **кристалізацією (твердненням)**. Під час плавлення (тверднення) речовини маса і температура її не змінюються. Щоб визна-

чити кількість теплоти  $Q$ , яку потрібно затратити для плавлення (тверднення) тіла масою  $m$ , взятого при температурі плавлення (тверднення), треба питому теплоту плавлення речовини  $\lambda$  помножити на масу тіла  $m$ :  $Q = \lambda m$ .

Процес переходу речовини з рідкого (газоподібного) стану в газоподібний (рідкий) називають **випаровуванням (конденсацією)**. Щоб визначити кількість теплоти  $Q$ , яку потрібно затратити для випаровування (конденсації) рідини масою  $m$ , взятої при температурі кипіння (конденсації), треба питому теплоту пароутворення речовини  $L$  помножити на масу тіла  $m$ :  $Q = Lm$ .

Щоб визначити кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється під час повного згоряння палива масою  $m$ , треба питому теплоту згоряння палива  $q$  помножити на масу палива  $m$ :  $Q = qm$ .

## 9 КЛАС ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Від слова «електрон» і пішло слово «електрика». Тіла електризуються або набувають заряду. В електризації завжди беруть участь два тіла. Під час електризації електризуються обидва тіла. Під час електризації скла об шокв скло набуває позитивного заряду «+», а шокв — негативного «-»; під час електризації ебоніту об вовну ебоніт набуває негативного заряду «-», а вовна — позитивного «+». **Одноименні заряди відштовхуються, а різнойменні — притягуються.**

За здатністю проводити електричні заряди речовини поділяють на **провідники та непровідники (ізолятори, діелектрики)** електрики.

**Заряд електрона** — негативний, його позначають літерою  $e$  і називають елементарним зарядом:  $e = -0,00000000000000000016$  Кл  $= -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Атом** — це найдрібніша частинка речовини, найменша частина хімічного елемента, яка є носієм його хімічних властивостей. Маса будь-якого атома практично дорівнює масі його ядра. Атом в цілому нейтральний.

**Ядро атома** складається з протонів і нейтронів. Протон — це позитивно заряджена частинка, що має масу, що в 1836 разів перевищує масу електрона. Електричний заряд протона збігається за модулем із зарядом електрона:  $q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Нейтрон є нейтральною частинкою, маса якої в 1839 разів перевищує масу електрона. Електричний заряд нейтрона дорівнює нулю:  $q_n = 0$ . Число нейтронів в атомному ядрі позначається буквою  $N$ . Воно визначається за формулою  $N = A - Z$ . У центрі атома знаходиться ядро, яке складається з протонів і нейтронів, а навколо ядра рухаються електрони. Якщо атом втрачає електрон або декілька електронів, то такий атом називається **позитивним йоном** (катионом). Якщо атом приєднав до себе один або декілька електронів, називається **негативним йоном** (аніоном).

**Закон збереження електричного заряду:** в замкнутій системі алгебраїчна сума зарядів усіх частинок залишається незмінною:  $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$ .

**Електричне поле** — це особливий вид матерії, який відрізняється від речовини й існує навколо будь-яких заряджених тіл.

**Основні властивості електричного поля:** 1. Електричне поле зарядженого тіла діє з деякою силою на будь-яке інше заряджене тіло, що знаходиться в цьому полі. 2. Поблизу заряджених тіл створюване ними електричне поле сильніше, а подалі слабше.

Сила, з якою електричне поле діє на тіла, які знаходяться в цьому полі, називається **електричною силою**.

**Силкові лінії електричного поля** — це лінії, що вказують напрям сили, яка діє в цьому полі на розміщене в ньому заряджене тіло.

**Заряд** називається **точковим**, якщо він розподілений на тілі, розміри якого значно менші, ніж будь-які відстані між взаємодіючими тілами у даній задачі.

**Закон Кулона:** сила взаємодії між двома нерухомими точковими електричними зарядами прямо пропорційна добутку цих зарядів і обернено пропорційна квадрату

відстані між ними:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ , де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/(Н · м<sup>2</sup>) — електрична стала,

$\epsilon$  — діелектрична проникність.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

**Електричний струм** — це впорядкований (напрявлений) рух заряджених частинок.

**Джерелами електричного струму** називаються пристрої, в яких виконується робота з розділення позитивно та негативно заряджених частинок. До них відносяться: гальванічні елементи, акумулятори, сонячні батареї, термоелементи, генератори різного роду.

Для того, щоб одержати електричний струм у провіднику, потрібні: електричні заряди, джерело струму, замкнене електричне коло.

**Електричний струм у металах** (металевих провідниках) — це впорядкований рух електронів під дією електричного поля, яке створює джерело електричного струму. **Дії електричного струму:** теплова, магнітна, хімічна, світлова. **За напрям електричного струму** умовно вибрали той напрям, в якому рухаються (або могли б рухатися) в провіднику позитивні заряди, тобто напрям від позитивного полюса джерела струму до негативного.

**Сила струму** — це фізична величина, що характеризує електричний струм і визначається відношенням електричного заряду, що пройшов через провідник, до

часу його проходження:  $I = \frac{q}{t}$ . **1 ампер (1 А)** — сила струму, який, протікаючи у

двох паралельних прямолінійних нескінченної довжини тонких провідниках, що розміщені у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликає на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії 0,0000002 Н. Для вимірювання сили струму в колі використовують прилад — **амперметр**, який вмикають у коло послідовно з тим приладом, силу струму в якому вимірюють.

**Напряга** — це фізична величина, що визначається відношенням роботи струму на певній ділянці кола до електричного заряду, що пройшов по цій ділянці:  $U = \frac{A}{q}$ .

**1 вольт (1 В)** — це така напряга на кінцях провідника, при якій робота по переміщенню електричного заряду 1 кулон (1 Кл) по цьому провіднику дорівнює 1 джоуль (1 Дж). Для вимірювання напряги в електричних колах використовують прилад — **вольтметр**, який слід під'єднувати паралельно до ділянки кола, на якій потрібно виміряти напрягу, тобто затискачі вольтметра під'єднати до тих точок кола, між якими треба виміряти напрягу.

Величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти напрямленому переміщенню зарядів всередині нього, називається **електричним опором провідника**. **1 ом (1 Ом)** — опір такого провідника, в якому при напрузі на кінцях 1 вольт (1 В) сила струму дорівнює 1 амперу (1 А). **Опір провідника** прямо пропорційний його довжині, обернено пропорційний площі його поперечного перерізу і залежить від

речовини провідника:  $R = \rho \frac{l}{S}$ . **Питомий опір речовини** — це фізична величина, що

показує, який опір має зроблений із цієї речовини провідник довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>. Зі зміною температури опір металевого провідника змінюється:  $R = R_0(1 + \alpha t)$ , де  $R$  — опір провідника при 0 °С,  $R_0$  — опір провідника при певній температурі,  $t$  — температура провідника,  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору. **Температурний коефіцієнт опору** характеризує залежність опору речовини від температури і визначається відносною зміною опору провідника при нагріванні

на 1 °С:  $\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 t}$ .

**Закон Ома:** сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі на цій ділянці й обернено пропорційна опору цієї ділянки:  $I = \frac{U}{R}$ , де  $I$  — сила струму в провіднику,

$U$  — напряга на кінцях провідника,  $R$  — опір провідника.

**Закони послідовного з'єднання провідників:** 1. При послідовному з'єднанні провідників сила струму в будь-якій частині електричного кола однакова:  $I = I_1 = I_2$ . 2. По-

вна напруга в колі при послідовному з'єднанні, або напруга на полюсах джерела струму, дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:  $U = U_1 + U_2$ . 3. Загальний опір кола при послідовному з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих провідників або окремих ділянок кола:  $R = R_1 + R_2$ .

**Закони паралельного з'єднання провідників:** 1. Напруга на ділянці кола і на кінцях усіх паралельно з'єднаних провідників однакова:  $U = U_1 = U_2$ . 2. Сила струму в нерозгалуженій частині дорівнює сумі струмів в окремих паралельно з'єднаних провідниках:  $I = I_1 + I_2$ . 3. Загальний опір кола при паралельному з'єднанні визначається

таким співвідношенням: 
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

**Робота електричного струму** — фізична величина, що характеризує перетворення електричної енергії на інші види енергії. Щоб визначити роботу електричного струму на ділянці кола, потрібно напругу на кінцях цієї ділянки помножити на силу струму в ній і на час, протягом якого виконувалася робота:  $A = UI t$ , де  $A$  — робота електричного струму;  $U$  — напруга на кінцях ділянки;  $I$  — сила струму в колі;  $t$  — час, протягом якого виконувалася робота.

**Потужність електричного струму** — фізична величина, що характеризує здатність електричного струму виконувати певну роботу за одиницю часу:  $P = UI$ .

**Закон Джоуля–Ленца:** кількість теплоти, яка виділяється провідником зі струмом, визначається добутком квадрата сили струму, опору провідника й часу проходження струму:  $Q = I^2 R t$ , де  $Q$  — кількість теплоти, яка виділяється провідником зі струмом,  $I$  — сила струму у провіднику,  $R$  — опір провідника,  $t$  — час проходження струму.

Речовини, які під дією розчинника дисоціюють (розпадаються) на йони, називаються **електролітами**. **Електричний струм у розчинах електролітів** — це впорядкований рух позитивних і негативних йонів. Процес виділення речовини на електродах при протіканні електричного струму через розчини або розплави електролітів називається **електролізом**. **Закон електролізу Фарадея:** маса речовини, яка виділяється на електроді за інтервал часу  $\Delta t$  при проходженні електричного струму  $I$ , пропорційна силі струму та інтервалу часу:  $m = k I \Delta t$ , де  $m$  — маса виділеної на електроді речовини;  $k$  — електрохімічний еквівалент даної речовини (дається у таблицях);  $I$  — сила струму в колі;  $\Delta t$  — час проходження електричного струму.

Провідність чистих напівпровідників, яка виникає під час їх нагрівання або освітлення, називається **власною провідністю**. Провідність напівпровідників, викликана електронами домішкових атомів, називається **домішковою провідністю**. Напівпровідники з домішковою електронною провідністю називають **напівпровідниками  $n$ -типу** (від латинського слова *negativus* — негативний). Напівпровідники з домішковою дірковою провідністю називають **напівпровідниками  $p$ -типу** (від латинського *positivus* — позитивний).

Процес проходження електричного струму через газ називається **газовим розрядом**. **Тліючий розряд** — розряд, який спостерігається при низьких тисках (десяті й соті частки міліметра ртутного стовпа) і напрузі між електродами в кілька сотень вольт. **Електрична дуга** — явище виникнення стовпа газу між двома вугільними електродами, що яскраво світяться. **Коронний розряд** — розряд, світна область якого нагадує корону і який спричиняється при атмосферному тиску поблизу загострених частин провідника, що несе великий електричний заряд. **Іскровий розряд** — розряд, який виникає при високій напрузі між електродами в повітрі і має вигляд пучка яскравих зигзагоподібних смужок, що розгалужуються від тонкого каналу.

**Коротким замиканням** називають з'єднання кінців ділянки кола провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором ділянки кола.

## МАГНІТНЕ ПОЛЕ

**Магніт** (від грец. *магнесійський камінь*) — тіло, яке має магнітні властивості. Предмети, що містять у собі залізо, сталь, нікель, чавун або їх сплави, притягуються магнітами. Папір, скло, пластмаса, мідь не мають магнітних властивостей. Місця магніту, де виявляються

вна напруга в колі при послідовному з'єднанні, або напруга на полюсах джерела струму, дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:  $U = U_1 + U_2$ . 3. Загальний опір кола при послідовному з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих провідників або окремих ділянок кола:  $R = R_1 + R_2$ .

**Закони паралельного з'єднання провідників:** 1. Напруга на ділянці кола і на кінцях усіх паралельно з'єднаних провідників однакова:  $U = U_1 = U_2$ . 2. Сила струму в нерозгалуженій частині дорівнює сумі струмів в окремих паралельно з'єднаних провідниках:  $I = I_1 + I_2$ . 3. Загальний опір кола при паралельному з'єднанні визначається

таким співвідношенням:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ .

**Робота електричного струму** — фізична величина, що характеризує перетворення електричної енергії на інші види енергії. Щоб визначити роботу електричного струму на ділянці кола, потрібно напругу на кінцях цієї ділянки помножити на силу струму в ній і на час, протягом якого виконувалася робота:  $A = UI t$ , де  $A$  — робота електричного струму;  $U$  — напруга на кінцях ділянки;  $I$  — сила струму в колі;  $t$  — час, протягом якого виконувалася робота.

**Потужність електричного струму** — фізична величина, що характеризує здатність електричного струму виконувати певну роботу за одиницю часу:  $P = UI$ .

**Закон Джоуля–Ленца:** кількість теплоти, яка виділяється провідником зі струмом, визначається добутком квадрата сили струму, опору провідника й часу проходження струму:  $Q = I^2 R t$ , де  $Q$  — кількість теплоти, яка виділяється провідником зі струмом,  $I$  — сила струму у провіднику,  $R$  — опір провідника,  $t$  — час проходження струму.

Речовини, які під дією розчинника дисоціюють (розпадаються) на йони, називаються **електролітами**. **Електричний струм у розчинах електролітів** — це впорядкований рух позитивних і негативних йонів. Процес виділення речовини на електродах при протіканні електричного струму через розчини або розплави електролітів називається **електролізом**. **Закон електролізу Фарадея:** маса речовини, яка виділяється на електроді за інтервал часу  $\Delta t$  при проходженні електричного струму  $I$ , пропорційна силі струму та інтервалу часу:  $m = k I \Delta t$ , де  $m$  — маса виділеної на електроді речовини;  $k$  — електрохімічний еквівалент даної речовини (дається у таблицях);  $I$  — сила струму в колі;  $\Delta t$  — час проходження електричного струму.

Провідність чистих напівпровідників, яка виникає під час їх нагрівання або освітлення, називається **власною провідністю**. Провідність напівпровідників, викликана електронами домішкових атомів, називається **домішковою провідністю**. Напівпровідники з домішковою електронною провідністю називають **напівпровідниками  $n$ -типу** (від латинського слова *negativus* — негативний). Напівпровідники з домішковою дірковою провідністю називають **напівпровідниками  $p$ -типу** (від латинського *positivus* — позитивний).

Процес проходження електричного струму через газ називається **газовим розрядом**. **Тліючий розряд** — розряд, який спостерігається при низьких тисках (десяті й соті частки міліметра ртутного стовпа) і напрузі між електродами в кілька сотень вольт. **Електрична дуга** — явище виникнення стовпа газу між двома вугільними електродами, що яскраво світяться. **Коронний розряд** — розряд, світна область якого нагадує корону і який спричиняється при атмосферному тиску поблизу загострених частин провідника, що несе великий електричний заряд. **Іскровий розряд** — розряд, який виникає при високій напрузі між електродами в повітрі і має вигляд пучка яскравих зигзагоподібних смужок, що розгалужуються від тонкого каналу.

**Коротким замиканням** називають з'єднання кінців ділянки кола провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором ділянки кола.

## МАГНІТНЕ ПОЛЕ

**Магніт** (від грец. *магнесійський камінь*) — тіло, яке має магнітні властивості. Предмети, що містять у собі залізо, сталь, нікель, чавун або їх сплави, притягуються магнітами. Папір, скло, пластмаса, мідь не мають магнітних властивостей. Місця магніту, де виявляються

найсильніші магнітні дії, називаються **полюсами магніту**. Будь-який магніт обов'язково має два полюси: **північний і південний**. Різнойменні магнітні полюси двох магнітів притягуються, однойменні — відштовхуються.

**Навколо Землі існує магнітне поле** й магнітна стрілка встановлюється вздовж його магнітних ліній. Магнітні полюси Землі не збігаються з її географічними полюсами.

**Магнітні лінії магнітного поля магніту** — це замкнені лінії, які виходять з північного полюса магніту й входять у південний, замикаючись усередині магніту.

Навколо будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле. Лінії, вздовж яких у магнітному полі розміщуються осі маленьких магнітних стрілок, називають **магнітними лініями магнітного поля**. Магнітні лінії магнітного поля струму — це замкнені лінії, які оточують провідник зі струмом. Напрямок магнітних ліній магнітного поля струму пов'язаний з напрямком струму в провіднику. Напрямок ліній магнітного поля можна встановити за **правилом свердлика**: якщо напрям поступального руху свердлика збігається з напрямком струму, то напрям обертання ручки свердлика збігається з напрямом магнітних ліній.

Явище виникнення в замкнутому провіднику електричного струму при перетині цим провідником силових ліній магнітного поля називають **електромагнітною індукцією**. Струм, що виникає при цьому, називається **індукційним**. **Правило правої руки**: якщо розмістити долоню правої руки так, щоб у неї входили силові лінії магнітного поля, а відведений на  $90^\circ$  великий палець направити у напрям руху провідника, то положення чотирьох пальців руки визначить напрям індукційного струму в провіднику.

## АТОМНЕ ЯДРО. ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА

**Планетарна модель атома**: атом складається з позитивно зарядженого масивного ядра, розміри якого порядку  $10^{-15}$  м. Навколо ядра рухаються електрони, утворюючи, так звану, електронну оболонку атома. Заряд ядра дорівнює за значенням сумарному заряду всіх електронів. В ядрі зосереджена майже вся маса атома (99,95 %).

**Радіоактивність** — це спонтанне перетворення одних ядер в інші, яке супроводжується випромінюванням різних частинок і електромагнітних хвиль.

**Правило зміщення** (вперше сформулював англійський хімік Содді): під час  $\alpha$ -розпаду ядро втрачає позитивний заряд  $2e$ , а маса зменшується приблизно на 4 атомні одиниці маси. У результаті елемент зміщується на дві клітинки до початку періодичної системи. Якщо ж відбувається  $\beta$ -розпад, то елемент зміщується на одну клітинку ближче до кінця періодичної системи,  $\gamma$ -випромінювання не супроводжується зміною заряду, маса ядра змінюється надзвичайно мало.

**Період піврозпаду** — основна величина, що характеризує швидкість радіоактивного розпаду. **Закон радіоактивного розпаду**:  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ . Чим менший період піврозпаду, тим менший час життя атомів, тим швидше відбувається розпад. Для різних речовин його значення дуже відрізняються.

Будь-які зміни в опромінену об'єкті, викликані йонізуючим випромінюванням, називаються **радіаційно-індукованим ефектом**. Основна фізична величина, що характеризує радіоактивне джерело, називається **активністю**  $A$ :  $A = N/t$ , де  $N$  — кількість радіоактивних розпадів;  $t$  — час. У СІ за одиницю активності прийнято **1 беккерель (1Бк)**. Активності 1 беккерель відповідає один розпад за секунду. В практичній дозиметрії та радіаційній фізиці використовується й інша одиниця активності — **1 кюрі (1Ки)**:  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .

**Поглинутою дозою випромінювання** ( $D_n$ ) називається відношення поглинутої дози енергії  $E_n$  до маси  $m$  опроміненої речовини:  $D_n = E/m$ . За одиницю поглинутої дози вибраний **1 рад (rad)** — за першими буквами англійського словосполучення «radation absorbed dose» — поглинута доза випромінювання). **1 рад** — це доза, при якій опроміненій речовині масою в 1 кг передається енергія  $10^{-2}$  Дж. У СІ поглинуту дозу випромінювання визначають у **греяхх (Гр)**. **1 грей** дорівнює поглинутій дозі, при якій опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія йонізуючого випромінювання в 1 Дж.

**Експозиційна доза ( $D$ )** — міра йонізаційної дії випромінювання на повітря і м'які тканини, при якій в 1 кг сухого повітря при нормальних умовах утворюються йони кожного знака, що мають заряд 1 Кл:  $D = q/m$ , де  $q$  — заряд тіла;  $m$  — маса речовини. У практичній дозиметрії використовують експозиційну дозу випромінювання — **1 рентген (1 Р)**. **1 рентген** — це така експозиційна доза рентгенівського чи  $\gamma$ -випромінювання, при якій в 1 см<sup>3</sup> сухого повітря ( $1,29 \cdot 10^{-6}$  кг) при 0 °С і тиску 760 мм рт.ст. утворюються йони, які несуть заряд кожного знаку, що дорівнює  $3,34 \cdot 10^{-10}$  Кл.  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг,  $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^8 \text{ Р}$ .  $1 \text{ рад} = 1,1 \text{ Р}$ .

**Еквівалентна доза ( $D_e$ )** — це поглинута доза, помножена на коефіцієнт, що відображає здатність випромінювання певного типу діяти на тканини організму:  $D_e = K \cdot D_{\text{пр}}$ . Коефіцієнт  $K$  називається **відносною біологічною ефективністю** (ВБЕ), або коефіцієнтом якості. Для рентгенівського,  $\gamma$ - і  $\beta$ -випромінювання  $K = 1$ . Для теплових нейтронів  $K = 5$ , для швидких нейтронів і протонів  $K = 10$ , для  $\alpha$ -частинок  $K = 20$ . Одиницею еквівалентної дози в СІ є **1 зіверт (1 Зв)** (на честь шведського радіобіолога Р. Зіверта).  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$  для рентгенівського,  $\alpha$ - і  $\beta$ -випромінювання. Помноживши еквівалентні дози на відповідні коефіцієнти радіаційного ризику для всіх органів і тканин та підсумувавши їх, дістанемо значення **ефективної еквівалентної дози**, що відображає сумарний ефект опромінення організму. Підсумувавши індивідуальні ефективні еквівалентні дози, що були одержані групою людей, ми знайдемо **колективну ефективну еквівалентну дозу**. Її одиницею в СІ є 1 людино-зіверт.

**Дозиметри** — прилади для вимірювання доз випромінювання в даному місці приміщення.

## 10 КЛАС ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ

**Механічний рух** — це зміна з часом взаємного положення в просторі матеріальних тіл або взаємного положення частин даного тіла. Розділ фізики, в якому пояснюється механічний рух матеріальних тіл і взаємодії, які при цьому відбуваються між тілами, називають **механікою**. **Кінематика** — розділ механіки, в якому вивчаються рухи матеріальних тіл без урахування їх мас і сил, що на них діють. Будь-який рух, а також спокій тіла (в деяких окремих випадках) відносні.

**Матеріальною точкою** є тіло, розмірами якого за даних умов руху можна знехтувати.

Тіло, відносно якого визначають положення інших тіл у різні моменти часу, називається **тілом відліку**. Тіло відліку, з яким пов'язана система координат, і годинник для вимірювання часу, утворюють **систему відліку**.

**Правило трикутника**: якщо початок вектора  $\vec{v}_2$  помістити в кінець першого  $\vec{v}_1$ , то з'єднавши початок вектора  $\vec{v}_1$  з кінцем вектора  $\vec{v}_2$ , отримаємо результуючий вектор  $\vec{v}$ , що співпадає з гіпотенузою трикутника. **Правило паралелограма**: якщо початки векторів  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$  помістити в одну точку і побудувати паралелограм, то результуючим вектором  $\vec{v}$  буде напрямлений відрізок, що дорівнює його більшій діагоналі. Щоб знайти проекції вектора на координатні осі, потрібно з його початку і кінця опустити перпендикуляри на координатні осі, з'єднати точки перетину перпендикулярів з осями, отримаємо відрізки, які і є проекціями вектора.

**Траєкторією** руху точки називається уявна лінія, яку описує тіло під час руху. **Шлях** — це довжина траєкторії, яку описує тіло або матеріальна точка під час руху за певний інтервал часу. **Переміщення точки** — це вектор або напрямлений відрізок прямої, який сполучає початкове положення точки з її кінцевим положенням.

**Прямолінійним рівномірним рухом** називається рух, при якому тіло за будь-які рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення. **Швидкість прямолінійного рівномірного руху** — це векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу,

протягом якого це переміщення відбулося:  $\vec{v} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$ . **Рівняння прямолінійного рів-**



номірного руху має вигляд:  $x = x_0 \pm v_x t$ . **Правило додавання переміщень:**  $\bar{s} = \bar{s}_1 + \bar{s}_2$ .

**Правило додавання швидкостей:**  $\bar{v} = \bar{v}_1 + \bar{v}_2$ .

Якщо серед інтервалів часу є такі рівні інтервали, за які тіло здійснює неоднакові переміщення, рух називається **нерівномірним**. **Середньою швидкістю нерівномірного руху** називається векторна фізична величина, яка характеризує переміщення, що його тіло в середньому здійснює за одиницю часу, і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося:

$$\bar{v}_c = \frac{\bar{s}}{t} = \frac{\bar{s}_1 + \bar{s}_2 + \dots + \bar{s}_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \text{ де } \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_n \text{ — переміщення тіла за відповідні інтервали часу}$$

$t_1, t_2, \dots, t_n$ . **Миттєвою швидкістю руху тіла**, або швидкістю в даній точці, називається векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу, коли швидкість руху тіла, починаючи з даного моменту, перестає змінюватися за напрямом і значенням.

Рух тіла, під час якого його швидкість за будь-які рівні інтервали часу змінюється однаково, називають **рівноприскореним рухом**. **Прискоренням тіла** в його рівноприскореному прямолінійному русі називають векторну фізичну величину, яка характеризує зміну швидкості за одиницю часу і дорівнює відношенню зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, протягом якого ця зміна відбулася:  $\bar{a} = \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t}$ . Якщо у

вибраний початковий момент часу  $t = 0$  швидкість руху тіла дорівнює  $\bar{v}_0$ , а в момент часу  $t$  вона дорівнює  $\bar{v}$ , то маємо  $\Delta t = t$ ,  $\Delta \bar{v} = \bar{v} - \bar{v}_0$ . Тоді:  $\bar{a} = \frac{\bar{v} - \bar{v}_0}{t}$ , де  $\bar{a}$  — прискорення руху тіла;  $\bar{v}_0$  — початкова швидкість руху тіла;  $\bar{v}$  — його кінцева швидкість руху;  $t$  — час, протягом якого ця зміна відбувалася. З формули прискорення легко визначити миттєву швидкість руху тіла в будь-який момент часу:  $\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{a}t$ . Якщо спроектувати вектори на вісь  $Ox$ , вираз набуває вигляду:  $v_x = v_{0x} \pm a_x t$ . Ця формула дає можливість визначити швидкість руху тіла  $v_x$  у момент часу  $t$ , якщо відома його початкова швидкість  $v_{0x}$  і прискорення  $a_x$ . Вона виражає **закон зміни швидкості рівнозмінного прямолінійного руху**.

За його допомогою ми маємо змогу вивести кінематичне рівняння шляху для рівноприскореного руху:  $\bar{s} = \bar{v}_0 t + \frac{\bar{a}t^2}{2}$ , або в проекціях на вісь  $Ox$ :  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ .

Якщо врахувати, що  $\bar{s} = x = x_0$ , то рівняння руху тіла в рівноприскореному прямолінійному русі матиме такий вигляд:  $x = x_0 + \bar{v}_0 t + \frac{\bar{a}t^2}{2}$ . Під час розв'язування задач,

коли потрібно визначити пройдений тілом шлях під час рівноприскореного руху, і не відомо, скільки часу минуло від початку руху тіла, а відомі прискорення, початкова швидкість і миттєва швидкість руху тіла у кінці переміщення, то користуються

$$\text{формулою: } l = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$

**Рівномірним рухом тіла по колу** називають такий рух, при якому швидкість тіла змінюється за напрямом, але не змінюється за значенням. **Лінійна швидкість тіла**, що рівномірно обертається по колу, весь час змінюється за напрямом і в будь-якій точці траєкторії напрямлена по дотичній до дуги цього кола, має сталі значення. Вона

визначається за формулою:  $v = \frac{2\pi R}{t}$ , де  $v$  — лінійна швидкість руху тіла по колу;

$R$  — радіус кола;  $t$  — час руху тіла. **Кутова швидкість тіла** — це фізична величина, яка показує, як швидко змінюється кут повороту тіла, і визначається відношенням

зміни кута  $\Delta\varphi$  до інтервалу часу  $\Delta t$ , за який ця зміна відбулася:  $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ . **Період обертання** — це час, протягом якого тіло робить один повний оберт по колу:  $T = \frac{t}{N}$ , де  $t$  — час обертання;  $N$  — кількість зроблених обертів. Величину, обернену до періоду обертання, називають **частотою обертання**:  $n = \frac{1}{T}$ . **Частота обертання тіла**  $n$  визначає кількість обертів тіла навколо центра обертання за 1 секунду:  $n = \frac{N}{t}$ . Якщо пригадати, що лінійна швидкість тіла  $v = \frac{2\pi R}{T}$ , знайдемо її зв'язок з кутовою швидкістю:  $v = \omega R$ . **Прискорення тіла, яке рівномірно рухається по колу**, в будь-якій його точці доцентрове, тобто напрямлене по радіусу кола до його центра:  $a = \frac{v^2}{R}$ .

## ОСНОВИ ДИНАМІКИ

**Динаміка** (від грецького слова динаміс — сила) — розділ механіки, в якому вивчається рух тіл у зв'язку з їх взаємодією з іншими тілами.

**Силою** називають векторну фізичну величину, що характеризує механічну дію одного тіла на інше і є мірою цієї дії. Силу, яка замінює дію на матеріальну точку декількох сил, називають **рівнодійною цих сил**.

**Перший закон Ньютона**: існують такі системи відліку, відносно яких тіло, що рухається поступально, зберігає свою швидкість сталою, якщо на нього не діють інші тіла (або дії інших тіл компенсуються).

**Інертністю** називають властивість тіл, яка виявляється в тому, що швидкість їх руху залишається незмінною до тих пір, поки на них не подіють інші тіла. У процесі ж взаємодії їх швидкість не може змінитися миттєво, а змінюється поступово. Системи відліку, в яких виконується закон інерції, отримали назву **інерціальних**. Системи відліку, в яких закон інерції не виконується, називаються **неінерціальними**.

**Другий закон Ньютона**: сила, що діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла і його прискорення, наданого цією силою:  $\vec{F} = m\vec{a}$ . З отриманої формули можна отримати вираз для прискорення  $\vec{a}$ :  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ . Прискорення матеріальної точки прямо пропорційне

прикладеній до неї силі, обернено пропорційне до маси цієї точки і напрямлене у бік дії сили.

**Третій закон Ньютона**: сили, з якими які-небудь два тіла діють одне на одне, завжди рівні за значенням, але протилежні за напрямом:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .

**Закон всесвітнього тяжіння**: сила гравітаційного притягання будь-яких двох частинок прямо пропорційна добутку їх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ , де  $G$  — коефіцієнт пропорційності, який називається **гравітаційною сталою**.

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ . **Фізичний зміст гравітаційної сталої** полягає в тому, що вона дорівнює силі, з якою притягуються дві частинки масами по 1 кг кожна, що знаходяться на відстані 1 м одна від одної.

Сила, з якою Земля притягує до себе тіла, називається **силою тяжіння**, а гравітаційне поле Землі — **полем тяжіння**:  $F_{\text{тяж}} = m\vec{g}$ . Силу  $\vec{P}$ , з якою тіло внаслідок його притягання до Землі діє на опору або підвіс, називають **вагою**:  $\vec{P} = m\vec{g}$ . Стан тіла, при якому його вага перевищує силу тяжіння, називають **перевантаженням**. Кількісно перевантаження характе-



ризують відношенням  $\frac{a}{g}$ , яке позначають літерою  $n$  і називають

**коефіцієнтом перевантаження**. При  $n$ -кратному перевантаженні, тобто коли  $a = ng$ , вага людини (і будь-якого іншого тіла) збільшується в  $(1+n)$  разів. Стан тіла, при якому вага тіла дорівнює нулю, називається **невагомістю**.

**Силою пружності** називають силу, що виникає в тілі при його деформації. Сила пружності пропорційна абсолютній деформації і направлена протилежно силі, що деформує тіло:  $F_{\text{пр}} = -k\Delta l$ .

Тертя, що виникає між нерухомими одна відносно одної поверхнями, називають **тертям спокою**. Сила тертя спокою залежить від сили тиску  $N$  і матеріалів дотичних поверхонь:  $F_{\text{тер}} = \mu_0 N$ . Величину  $\mu_0$  називають **коефіцієнтом тертя спокою**.

**Силу тертя, що виникає при русі одного тіла по поверхні іншого, називають силою тертя ковзання**; направлена вона протилежно переміщенню тіла відносно стичного з ним

тіла:  $F_{\text{тер}} = \mu_{\text{ковз}} N$ . **Сила тертя кочення** визначається за формулою:  $F_{\text{тер}} = \mu_{\text{коч}} \frac{N}{R}$ .

Коефіцієнт  $\mu_{\text{коч}}$  називають **коефіцієнтом тертя кочення**.

Щоб тіло, яке може рухатися поступально (без обертання), знаходилося в рівновазі, необхідно, щоб геометрична сума сил, прикладених до тіла, дорівнювала нулю.

Щоб тіло, яке не має вісі обертання, знаходилося в рівновазі, необхідно, щоб сума проекцій прикладених до тіла сил на будь-яку вісь дорівнювала нулю.

Фізична величина, яка визначається добутком модуля сили  $\vec{F}$  і її плеча  $d$ , називається **обертальним моментом**, або **моментом сили** відносно осі обертання:  $\vec{M} = \vec{F}d$ .

**Правило моментів**: тіло, здатне обертатися навколо закріпленої осі, знаходиться в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів прикладених до нього сил відносно цієї осі дорівнює нулю:  $F_1 d_1 = F_2 d_2$  або  $F_1 d_1 - F_2 d_2 = 0$ . Для того, щоб тіло знаходилося в рівновазі, необхідно, щоб дорівнювала нулю геометрична сума прикладених до тіла сил і сума моментів цих сил відносно осі обертання. **Правило важеля**: важіль знаходиться в рівновазі, коли сили, що діють на нього, обернено пропорційні плечам:

$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}$ . **Рівновага тіла стійка**, якщо при малому відхиленні від рівноважного положення рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги. **Рівновага нестійка**, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення.

**Імпульсом тіла або кількістю руху** тіла називають добуток маси тіла і його швидкості руху:  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Зміна імпульсу тіла дорівнює, як видно з формули  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ , добутку сили  $\vec{F}$  і часу її дії  $t$ . Величина  $\vec{F}t$  також має особливу назву. Її називають **імпульсом сили**.

Зміна імпульсу (кількості руху) тіла дорівнює імпульсу сили. **Закон збереження імпульсу**: геометрична сума імпульсів тіл, що є складовими замкнутої системи, залишається сталою при будь-яких взаємодіях тіл цієї системи між собою:  $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$ .

**Енергією поступального руху** називають таку механічну величину, яка однакова в усіх тіл, що починають рухатися за рахунок однакової зміни якої-небудь іншої форми руху. **Кінетична енергія тіла**:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ . Фізичну величину  $A$ , яка дорівнює зміні кінетичної енергії  $\Delta E_k$  тіла в результаті дії на нього сили  $F$ , називають **роботою**:  $A = \Delta E_k$ .

$A = Fscos\alpha$ . Енергію, яка залежить тільки від координат тіла або взаємного розташування тіл, називають **потенціальною енергією тіла**. **Потенціальною енергією піднятого над Землею тіла** називають таку фізичну величину  $E_p$ , яка при вільному па-

дінні тіла зменшується рівно на стільки, на скільки зростає його кінетична енергія  $E_k$ :  $\Delta E_p = -\Delta E_k$ .  $E_p = mgh$ . **Потенціальна енергія  $E_p$  пружно деформованого тіла** дорівнює половині добутку його жорсткості  $k$  і квадрату деформації  $x$ :  $E_p = \frac{kx^2}{2}$ . **Закон**

**збереження механічної енергії:** повна механічна енергія системи тіл, що взаємодіють між собою консервативними силами, залишається сталою:  $E = E_k + E_p = \text{const}$ . **Енергія тіла ніколи не зникає і не з'являється знову: вона лише перетворюється з одного виду на інший.**

## РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА

Усі явища природи в інерціальних системах відліку за однакових початкових умов протікають однаково. В усіх інерціальних системах відліку швидкість поширення світла у вакуумі однакова і дорівнює 300 000 км/с. Між масою і енергією в природі існує певне кількісне співвідношення: **кожній одиниці маси відповідає строго певна кількість енергії:**  $E = mc^2$ .

У природі не існує єдиних універсальних для всіх систем відліку часу і довжини. Абсолютна довжина і абсолютний час — ці поняття позбавлені фізичного змісту і не мають реального змісту. Ні в одній системі відліку ніяке тіло або частинка не може рухатися зі швидкістю, більшою за швидкість поширення світла у вакуумі. Швидкість поширення світла у вакуумі є гранично можливою швидкістю передачі енергії від однієї точки простору до іншої.

**Довжина тіла у будь-якій інерціальній системі відліку**, відносно якої воно переміщується, менша його власної довжини:  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Якщо події відбуваються

в одній і тій же точці, то час:  $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ .

**Явища**, які виникають у системах відліку, що рухаються відносно спостерігача зі швидкістю, близькою до швидкості поширення світла, називаються **релятивістськими** (від лат. *relativ* — відносний).

## ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ, РІДИН, ТВЕРДИХ ТІЛ

Теорія, яка пояснює теплові явища в макроскопічних тілах і внутрішні властивості цих тіл на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично, називається **молекулярно-кінетичною теорією**. В основі молекулярної фізики лежить декілька **положень**, які стосуються структури речовини і закономірностей руху частинок, що входять до складу речовини: 1. Речовина складається з частинок (атомів і молекул). 2. Молекули (атоми) всіх тіл знаходяться в безперервному тепловому русі. 3. Молекули (атоми) взаємодіють між собою — залежно від відстані між частинками вони притягуються або відштовхуються.

**Броунівський рух** — це тепловий рух завислих у рідині або газі частинок. Процес взаємного проникнення частинок однієї речовини у міжмолекулярні проміжки іншої без дії зовнішніх сил називається **дифузією**. Сили, що діють між атомами і молекулами речовини, називаються **молекулярними силами**. Область простору, в якій діють молекулярні сили, називається **сферою молекулярної дії**, радіус цієї сфери близько  $10^{-9}$  м. Відстань між частинками, що знаходяться в стані рівноваги, називається **рівноважною відстанню**.

Маса атома, виміряна в атомних одиницях маси, називається **атомною масою**. Маса молекули, виміряна в атомних одиницях маси, називається **молекулярною масою**. Кількість речовини, маса якої в грамах дорівнює його молекулярній або атомній масі, називається **молем даної речовини**. **Стала Авогадро:** в одному молі будь-якої речовини міститься однакове число атомів або молекул:  $N = 6,02 \cdot 10^{23}$  1/моль (моль<sup>-1</sup>). Зна-

ючи сталу Авогадро  $N_A$  і масу одного моля  $\mu$  можна визначити масу атома або молекули досліджуваної речовини:  $m_0 = \frac{\mu}{N_A}$ . Величина, яка визначається відношенням числа структурних елементів  $N$ , з яких складається дане тіло, до атомів  $N_A$ , що містяться в одному молі Карбону, називається **кількістю речовини**:  $\nu = \frac{N}{N_A}$ ,  $\nu = \frac{m}{\mu}$ . За одиницю кіль-

кості речовини в СІ приймається така її кількість, яка міститься в одному молі Карбону.

**Ідеальний газ** — це газ, взаємодія між молекулами якого така мала, що нею можна знехтувати. **Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів** (рівняння Клаузіуса): тиск ідеального газу пропорційний добутку кількості молекул в одиниці об'єму газу і середньої кінетичної енергії поступального руху молекул:  $p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2$ ,  $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$ .

Нульова температура за абсолютною шкалою відповідає абсолютному нулю, а кожна одиниця температури за цією шкалою дорівнює градусу на шкалі Цельсія:  $T = t + 273$ .

**Стала Больцмана** пов'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою у кельвінах:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

**Рівняння Менделєєва–Клапейрона**:  $pV = \frac{m}{\mu} RT$ . Універсальна газова стала:

$$R = N_A k = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}.$$

Кількісні залежності між двома параметрами газу при фіксованому значенні третього параметра називають **газовими законами**. Процеси, що відбуваються при незмінному значенні одного з параметрів, називають **ізопроцесами**. Процес зміни стану термодинамічної системи при сталій температурі називають **ізотермічним**. **Закон Бойля–Маріотта**: для даної маси газу добуток тиску газу і його об'єму сталий, якщо температура газу не змінюється:  $pV = \text{const}$  при  $T = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ . Процес зміни стану термодинамічної системи при сталому тиску називають **ізобарним** (від грец. *барос* — вага). **Закон Гей-Люссака**: для даної маси газу відношення об'єму до температури стало, якщо тиск газу не змінюється:  $\frac{V}{T} = \text{const}$  при  $T = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ . Процес

зміни стану термодинамічної системи при сталому об'ємі називають **ізохорним** (від грец. *хорема* — місткість). **Закон Шарля**: для даної маси газу відношення тиску до температури стало, якщо об'єм газу не змінюється:  $\frac{p}{T} = \text{const}$  при  $T = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ .

Пара, що знаходиться в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називається **насиченою**. Пара, що не знаходиться в стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною, називається **ненасиченою**. Незалежний від об'єму тиск пари  $p_n$ , при якому рідина перебуває в рівновазі зі своєю парою, називають **тиском насиченої пари**. Згідно з формулою  $p_n = p_k T$  тиск пари зростає не тільки внаслідок підвищення температури, а й внаслідок збільшення концентрації молекул (густини) пари. Процес пароутворення, що відбувається в об'ємі всієї рідини, називається **кипінням**. Кипіння рідини настає за умови, коли тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тиску на її вільну поверхню, а температура всіх шарів рідини однакова. Температура, при якій тиск насиченої водяної пари середини рідини дорівнює зовнішньому тиску, називається **температурою кипіння**. Температура кипіння рідини при нормальному атмосферному тиску називається **точкою кипіння**.

Кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря, називається **абсолютною вологістю повітря**. Температура, при якій водяна пара, що знаходиться в атмосферному повітрі, стає насиченою, називається **точкою роси**. Кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря в стані насичення (при точці роси), називається **максимальною вологістю повітря**. Відношення абсолютної вологості повітря  $\rho$  до його максимальної вологості  $\rho_n$  при даній температурі називається **відносною вологістю**

**повітря:**  $\varphi = \frac{p}{p_H} 100\%$ . Тиск, який чинила б водяна пара, коли б не було інших газів,

називають **парціальним тиском водяної пари**. **Відносною вологістю повітря**  $\varphi$  називають відношення парціального тиску  $p$  водяної пари, яка є в повітрі при даній температурі, до тиску  $p_H$  насиченої пари при тій самій температурі:  $\varphi = \frac{p}{p_H} 100\%$ .

Величина, яка вимірюється силою поверхневого натягу, що діє на кожну одиницю довжини контуру, який обмежує вільну поверхню рідини, називається **коефіцієнтом поверхневого натягу**:  $\sigma = \frac{F}{l}$ , де  $F$  — сила поверхневого натягу;  $l$  — довжина контуру.

**Змочування** — це явище, яке виникає внаслідок взаємодії рідини з молекулами твердих тіл і зумовлює викривлення поверхні рідини біля поверхні твердого тіла. **Під капілярними явищами** розуміють піднімання або опускання рідини у вузьких трубках — капілярах, — порівняно з її рівнем у широких трубках. Висота підняття змочувальної рідини в капілярі визначається так:  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ , де  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягу;

$\rho$  — густина рідини;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $r$  — радіус трубки (капіляра);  $h$  — висота підняття рідини в капілярі.

Тверде тіло, яке складається з великої кількості маленьких кристаликів, називають **полікристалічним**. **Поодинокі кристали називають монокристалами**. Незалежність фізичних властивостей речовини від напрямку називається **ізотропністю**. Залежність фізичних властивостей речовини від напрямку називається **анізотропією**. **Аморфні тіла** — це тіла, які не мають точного порядку в розташуванні атомів. Певної температури плавлення аморфні тіла не мають.

Деформація, яка повністю зникає після припинення дії зовнішніх сил, називається пружною **деформацією**. Деформація, яка не зникає після припинення дії зовнішніх сил, називається **пластичною деформацією**. Збільшення довжини тіла (стержня) при дії на нього двох рівних за модулем, але протилежних за напрямком сил називається **деформацією розтягу**. Зменшення довжини тіла під дією двох рівних за значенням і направлених назустріч одна одній сил, називається **деформацією стиснення**. Зсув паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох паралельних, але протилежно направлених сил, називається **деформацією зсуву**. Поворот паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох сил називається **деформацією кручення**. Згинання (вигинання) тіла під дією сили, направленої перпендикулярно його осі, називається деформацією **поперечного згину**. Величина, що вимірюється силою внутрішньої напруги, яка діє на одиницю площі поперечного перерізу деформованого тіла, називається **механічною напругою**:  $\sigma = \frac{F}{S}$ . Механічна напруга, що виникає в

речовині при відносній деформації  $\epsilon = 1$ , називається **модулем пружності**  $k$ . Механічна напруга пружно деформованого тіла прямо пропорційна відносній деформації і модулю пружності речовини, з якої воно виготовлене:  $\sigma = k\epsilon$ . Це співвідношення носить назва **закону Гука**.

## ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Будь-яке макроскопічне тіло має енергію, яка зумовлена його мікростаном, а саме кінетичною енергією хаотичного руху його молекул і потенціальною енергією

їх взаємодії. Таку енергію називають **внутрішньою енергією**:  $U = \frac{3m}{2\mu} RT$ .

**Закон збереження і перетворення енергії** при всіх процесах, які відбуваються в природі: **енергія не виникає і не зникає, а лише перетворюється в рівних кількостях з одного виду в інший.**

**Перший закон термодинаміки:** кількість теплоти  $Q$  частково йде на збільшення її внутрішньої енергії  $\Delta U$  і частково на виконання системою роботи  $A$  над зовнішніми тілами:  $Q = \Delta U + A$ .

Робота, виконана газом під час ізобарного розширення проти зовнішніх сил, дорівнює добуткові тиску газу на приріст його об'єму:  $A = p(V_2 - V_1)$ .

**Адіабатний процес** — це термодинамічний процес зміни параметрів газу, що відбувається в теплоізованій системі, тобто за відсутності теплообміну з навколишніми тілами. Оскільки в такому разі  $Q = 0$ , то згідно з першим законом термодинаміки вся виконана робота йде на зміну внутрішньої енергії системи:  $A = \Delta U$ .

**Тепловий двигун** — це пристрій, який перетворює внутрішню енергію палива в механічну. Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна визначається співвідношеннями:  $\eta = \frac{A_1 - A_2}{A_1}$ ,  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ ,  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ .

Ефективність роботи холодильної машини характеризують **холодильним коефіцієнтом**, який визначається відношенням тієї кількості теплоти  $Q_2$ , що отримана від поршня з нижчою температурою до роботи  $A'$ , яка витрачається на приведення

холодильної машини в дію:  $\epsilon = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$ .

**Другий закон термодинаміки** (уперше сформулював німецький учений Р. Клаузіус у 1850 році): у природі неможливий процес, під час якого теплота самочинно переходила б від менш нагрітих до більш нагрітих тіл. У. Томсон (лорд Кельвін) дав інше формулювання другого закону термодинаміки: неможливо здійснити такий періодичний процес, єдиним результатом якого буде виконання роботи за рахунок теплоти, відібраної у нагрівника.

## ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ

### Фізичні задачі навколо нас

1. Як потрібно з'єднати два однакові конденсатори, щоб ємність збільшилася (зменшилася) у 2 рази?
2. Три конденсатори різної ємності з'єднано: а) паралельно; б) послідовно. Які різниці потенціалів між обкладками окремих конденсаторів у тому й іншому випадках? Які заряди конденсаторів?
3. Чому з двох конденсаторів однакової ємності та з однаковими діелектриками той, який розрахований на вищу напругу, має великі розміри?
4. Два конденсатори різної ємності з'єднано паралельно. Який з них має більшу енергію?
5. На конденсаторі вказується робоча напруга, а іноді і напруга, під якою випробуваний конденсатор. Що означають значення цієї напруги? Чому не можна перевищувати цю напругу при експлуатації конденсатора?
6. Чому взаємодія провідників, по яких тече струм, не можна пояснити на основі закону Кулона?
7. Як дізнатися, чи намагнічене старе ножівочне полотно чи ні, не користуючись приладами або іншими тілами?
8. Як за допомогою сильного магніту (краще підковоподібного) визначити, постійним чи змінним струмом живиться електрична лампочка?
9. Існує гіпотеза про те, що магнітне поле Землі обумовлене кільцевим електричним струмом, який тече в розплавленому металевому ядрі Землі. В якому напрямі повинні рухатися електрони, щоб забезпечити полярність земного магнітного поля, що існує?
10. Чи залежить період коливань гойдалок від того, як гойдаються на них: сидячи або стоячи?
11. Для запису коливального руху використовують лійку у вигляді конуса, наповнену піском. Пісок висипається з лійки і залишає слід на пластині, що рівномірно переміщається під лійкою. Чи змінюється частота коливань такого маятника у міру висипання піску?
12. Якщо настінні маятникові годинники відстають, то що треба зробити, щоб відновити правильність їх ходу?
13. Прислухайтесь до ходу різних годинників. Легко помітити, що тривалість «цокання» годинників різних марок неоднакова, хоча всі вони справно відмірюють звичні нам інтервали часу в секундах, хвилинах, годинах. Які інтервали часу відмірює годинник своїм «цоканням»?
14. У відрі несуть воду. Якщо відро починає сильно розгойдуватися, то вода виплескується. Досить змінити частоту кроків, щоб це явище припинилося. Чому?
15. Для захисту портових споруд від морських хвиль акваторію порту захищають суцільною кам'яною стіною-молотом. Чому не можна обмежитися



установкою тільки окремих паль, розділених проміжками, які поглинали б енергію морських хвиль?

16. Чому при деякій швидкості руху шибки в автобусі починають деренчати?

17. Коливальний контур складається з котушки постійної індуктивності і конденсатора змінної ємності з пластинами, що розсуваються. Що потрібно зробити з пластинами конденсатора, щоб настроїти контур на прийом довших хвиль?

18. Якщо ввімкнутий кишеньковий приймач помістити в каструлю і закрити кришкою, то радіоприйом відразу ж припиниться. Чому?

19. Яке походження «трісків», що заважають прийому радіопередачі радіоприймачем?

20. Чому порушується радіозв'язок на коротких хвилях у гірській місцевості?

21. Чому погіршується або зовсім припиняється радіоприйом в автомобілях при проїзді їх під мостами або в тунелі?

22. Як зміниться частота електромагнітних коливань у закритому коливальному контурі, якщо в його котушку ввести залізне осердя?

23. Як відомо, антени системи радіомовлення вмонтовують вертикально, а телеантени — горизонтально. Чим пояснити таку особливість монтування антен?

24. Чому метали відбивають і поглинають електромагнітні хвилі?

25. Як здійснюється настроювання радіоприймача на частоту радіостанції?

26. Увімкніть і вимкніть кілька разів освітлення в кімнаті в той час, коли працює радіоприймач. Що ви спостерігаєте? Чому спостережуваний ефект не залежить від того, на яку довжину хвилі настроєно радіоприймач?

27. Чому працюючі електричні дзвінки, швейні машини, пирососи, праски з терморегуляторами, лампи денного світла можуть бути джерелами радіоперешкод. Нерідко стверджують, що працюючі рентгенівські установки, і трактори також, створюють радіоперешкоди. Чи так це насправді?

28. Чому змінюється забарвлення крил комах, якщо їх розглядати під різними кутами?

29. Чи можна «загасити» світло світлом? Як це зробити?

30. Яка приблизно товщина плівки мильної бульбашки в місцях, де вона здається блакитною?

31. Який шлях пройде фронт хвилі монохроматичного світла у вакуумі за той же час, за який він проходить 1 м у воді?

32. При виготовленні штучних перламутрових гудзиків на їх поверхні роблять найдрібніше штрихування. Чому після цього гудзик набуває кольорового забарвлення?

33. Плоскопаралельну пластинку освітлюють білим світлом. Чи зміниться колір пластинки при зміні кута падіння на неї променів світла?

34. Чому на фотографіях зоряного неба, отриманих за допомогою телескопа, зображення зірок виходять не у вигляді точки, а у вигляді дифракційних кругів?

35. Як впливає число штрихів дифракційної ґратки на відстань між смугами і на їх розміри в спектрах ґратки?

36. Як зміниться вид спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?

37. Хоча грампластинка має всього 3—5 штрихів на 1 мм, у відбитому від неї світлі при великих кутах падіння виразно видно дифракційний спектр. Поясніть походження спектра. Яке значення при його виникненні має кут падіння?

38. Якщо на мокрий асфальт падає крапля бензину, утворюється пляма, забарвлена у барви веселки. Який механізм утворення кольорових плям? Проаналізуйте і поясніть це явище.

39. Які кольори з'являються на поверхні елемента паяльника, що нагрівається, у міру підвищення температури? Який механізм цього явища?

40. Поясніть наявність веселкового забарвлення в автомобільному склі. Чи змінюватимуться кольори, якщо розглядати скло під різними кутами?

41. У шматку картону зробіть голкою отвір і подивіться через нього на розжарену нитку лампи розжарювання. При цьому лист з отвором розташуйте на відстані 25—30 см від ока. Що ви бачите? Подивіться на цю нитку через пташине перо, батистову хусточку або капронову тканину. Що ви спостерігаєте? Чи однакові результати дослідів? Чому?

42. Якщо дивитися через поляризаційну пластинку на ясне небо, то при її поверненні інтенсивність пропущеного світла змінюється удвічі. Якщо через пластинку розглядати хмару, це явище не спостерігається. Чим це пояснити?

43. Подивіться через поляроїд на відблиски на блискучій поверхні, на небо під кутом  $90^\circ$  до напрямку на Сонце, на веселку. Спостерігайте зміну видимої яскравості при повороті поляроїда. Як ви поясните побачене?

44. Чи однакова швидкість поширення червоного і фіолетового випромінювань у вакуумі, у воді?

45. У чому відмінність дифракційного спектра білого випромінювання від призматичного?

46. Доведіть, що під час переходу монохроматичного світла з одного середовища в інше, показники заломлення яких різні, довжини хвиль пропорційні швидкостям поширення світла у цих середовищах.

47. Яке тіло називається білим? Яке тіло називається чорним?

48. Яким здаватиметься колір зеленого листя, якщо дивитися на нього через червоний або зелений світлофільтр?

49. Чому вдень, при яскравому сонячному світлі, на великій глибині в морях і океанах темно?

50. Коричневий колір відсутній у суцільному спектрі. Як виникає цей колір?

51. Як впливають перша і друга поверхні призми на розкладання білого світла на спектр?

52. Білий промінь світла переходить зі скляної призми в повітря. Що при цьому відбувається?

53. На чорний екран наклеїли горизонтальну вузьку смужку білого паперу. Якими здаватимуться верхній і нижній краї цього паперу, якщо на нього дивитися крізь призму, обернену заломлюючим ребром угору?

54. У посудину із зеленого скла налейте червоне чорнило. Якого кольору здається чорнило? Чому?

55. Якого кольору повинні здаватися трава і листя дерев, якщо розглядати їх через фіолетовий світлофільтр?

56. Світлофор дає три сигнали: червоний, жовтий, зелений, тоді як усередині нього встановлені звичайні лампи розжарювання. Чому і як утворюються різноколірні сигнали світлофора?

57. Чому на транспорті сигнал небезпеки червоного кольору?
58. Чому із Землі небо здається блакитним, а з Місяця — чорним?
59. Чому художники пишуть фарбами тільки при денному освітленні?
60. Чому атоми кожного хімічного елемента мають строго певний лінійчастий спектр випромінювання і поглинання?
61. Чим розрізняються лінійчасті спектри випромінювання різних хімічних елементів?
62. Який фізичний сенс фраунгоферових ліній у суцільних спектрах Сонця і зірок?
63. Чи випромінюють електромагнітні хвилі дрова, що горять?
64. За якою властивістю ультрафіолетового випромінювання легко виявити його існування?
65. При якій температурі виникає інфрачервоне випромінювання тіл?
66. Спектр якого типу можна дістати від таких джерел: полум'я свічки, полум'я вогнища, нитки електричної лампочки, спіралі електроплитки, полум'я електричної дуги, неонові лампи, лампи денного світла?
67. Інфрачервоне опромінення зерна знищує жучків-шкідників. Чому жучки гинуть, а зерно — ні?
68. Скло добре пропускає видиме проміння і затримує інфрачервоне. Враховуючи це, поясніть будову парників і теплиць.
69. Чому під Сонцем люди засмагають? Чому засмагають швидше на березі моря і на високих горах?
70. На ескалаторах станцій метро лампи розжарення розміщені в плафонах біло-молочного кольору. Чому в деяких із них розжарені вольфрамові нитки в електролампочках ми сприймаємо червоними?
71. Полум'я електричної дуги не шкодить зору, коли дугу запалити у воді. Чому?
72. Чому не слід дивитися на полум'я, яке виникає під час зварювання? Чому темне скло запобігає шкідливій дії полум'я на очі зварника?
73. Чи однакові спектри Сонця та Місяця?
74. Чому, щоб дістати спектр поглинання натрію, поглинаюча пара натрію повинна мати меншу температуру, ніж джерело, яке випромінює біле світло?
75. Який спектр дістанемо від електричної іскри, що утворюється між кінцями металевих дротин?

Відповіді до рубрики  
«Задачі та вправи»

3. 0,5 мкН.  
 4. 200 Н/Кл.  
 5. 0,5 нКл.  
 6. 40 кН/Кл; 10 кН/Кл.  
 7. 0,55 м.  
 8. 42 нКл.  
 9. 10 пФ.  
 11. Ні.  
 12. 20 пФ.  
 13. 200 В.  
 14. 2,9 мКл.  
 15. Зменшиться.  
 16. 400 пФ.  
 17. 0,1 мм.  
 18.  $1,6 \cdot 10^{-2}$  Дж;  $8 \cdot 10^{-5}$  Кл.  
 19. 7,5 мДж.  
 20. 0,8 Дж.  
 21. 10 В/м.  
 22.  $5,4 \cdot 10^5$  Н/Кл.  
 23. На лінії зарядів, на відстані 4,45 м від позитивного заряду.  
 24. 17,3 кВ/м.  
 25.  $4,9 \cdot 10^{-14}$  Кл.  
 27. 15 мкФ.  
 28. 1,23 мН.  
 29. 2 кВ.  
 30. 0,64 Кл.  
 31. 36. в 16 разів.  
 32. 220 мкДж.  
 34.  $q = \sqrt{2\epsilon_0 SF}$ .  
 35.  $A = \frac{\epsilon_0 SU^2(d_1 - d)}{2d^2}$ .  
 36. 1 А; 2 В; 8 В.  
 37. 0,1 А; 0,3 А; 0,4 А.  
 38. 8 В.  
 39. 20 Ом.  
 42. 18 кДж.  
 43. 2 с.  
 44. 100 Вт.  
 45. 0,3 А; 216 кВт.  
 50. 12 Кл.  
 51. 4,67 В.  
 52. 2,2 Ом.  
 53. 1 Ом; 2 В.  
 54. 2 В; 1,8 В.  
 55. 1 Ом.  
 58. 36. у 25 разів.  
 59. 30 Ом; 10 Ом.  
 60. Зростає в  $\frac{n^2 + 1}{n}$  разів.  
 61. 2 Ом; 3 Ом.  
 62. 460 Ом; 1380 Ом; 2300 Ом.  
 63. 5 А.  
 64.  $I_1 = 2$  А;  $I_2 = I_5 = 1$  А;  $I_3 = 0,5$  А;  $I_4 = I_6 = 0,25$  А.  
 65. 5 А; 3 А; 2 А; 5 А; 100 В; 30 В; 30 В; 20 В.  
 66. 4 А; 0,8 А; 3,2 А; 20 В; 9,6 В; 9,6 В.  
 67. 5 А; 3 А; 2 А; 5 А; 10 В; 30 В; 30 В; 20 В.  
 70. Зростає у 2 рази.  
 71. 80 Вт; 40 Вт; 8,9 Вт; 17,8 Вт.  
 72. 13,2 м/с.  
 73. 50 А.  
 74.  $\Delta T = \frac{\eta I^2 \rho_1 t}{c S^2 \rho}$ .  
 80. 3,7 В; 0,2 Ом.  
 81. 1,5 В; 0,5 Ом.  
 82. 32 В; 30 В.  
 83. 0,5 В.  
 91. Телур.  
 93. 180 В.  
 102. 3м. в 5 разів.  
 103.  $9,6 \cdot 10^{-5}\%$ .  
 107. 0,4 Тл.  
 108. 10 см.  
 109. 2 А.  
 110. 3,1 Н; 1,6 Н.  
 111.  $30^\circ$ .  
 112. 2,5 А.  
 113. 2 мВб; 1,4 мВб; 1 мВб.  
 114. 50 мТл.  
 115. 0.  
 118.  $5 \cdot 10^{-14}$  Н.  
 119. 0,32 пН.  
 120.  $8 \cdot 10^{-15}$  Н.  
 124.  $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_1}{l+S} + \frac{I_2}{S} \right)$ .

125.  $U = \frac{\mu_0 \pi I^2 \rho}{BS}$ .
126. 0,1 м.  
 127. 2 А.  
 128. 20 мТл.  
 129. 0; 0,21 Вб; 0,3 Вб.  
 130. 50 мкВб.  
 131. 9 см;  $4 \cdot 10^{15}$  м/с<sup>2</sup>.  
 132.  $1,8 \cdot 10^8$  м/с;  $3,5 \cdot 10^{-9}$  с.  
 134. 8,9 нс.  
 138. 20.  
 142. 0,1 В.  
 143. 10 мТл.  
 144. 670 мВ.  
 148. 2 В.  
 149. 0,2 Вб/с; 0,2 В.  
 150. 0,5 с.  
 151. 400 мГн.  
 152. 50 А/с.  
 153. 100 мГн.  
 154. 120 Дж; зменшиться в 4 рази.  
 155. 10 Дж.  
 156. 2 А.  
 157. 2,5 Дж.  
 159.  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.  
 161.  $\approx 279$ .  
 166. 1,54 мВ.  
 167.  $B = \frac{\rho Sa}{I}$ .
170. 0,5 А.  
 171. 60 мВб.  
 172. 200 мА.  
 173. 125 мГн.  
 174. 200 мГн; 1,5 мВб.  
 180. 0,02 с; 50 Гц.  
 181. 310 В; 220 В; 50 Гц; 20 мс; -310 В.  
 182. 10 А; 7,1 А; 5 мс; 200 Гц; -10 А.  
 183. 169 В.  
 187. 220 В; 0,4.  
 188. 0,33; 150.  
 189. 220 В; 1000.  
 190. 3 Ом.  
 191. 10 В.  
 192. 94%.  
 195. 0,44 В;  $\varepsilon = 0,63 \sin 100\pi t$ , В.  
 196. 100;  $\varepsilon = 63 \sin 40\pi t$ , В.  
 197. 500 Гц.  
 198.  $\perp$ ;  $\varepsilon = -0,31 \sin 10\pi t$ , В; 5 об/с; 0,01 Вб.  
 202. 28 В; 24 В.  
 203. 220 В; 200 Вт.
204. 300 мОм; 210 мА.  
 205. 39%.  
 206. 5 Ом.  
 207. 13 кВт; 98%.  
 208. 0,02 с; 0,008 с; 0,00227 с.  
 209. 1 м; 0,01 с; 100 Гц; 2 рад.  
 210. 32; 0,25 с.  
 211. 2,5 м.  
 213. 6,28 с.  
 214. 10 м/с<sup>2</sup>.  
 215. 1,26 с.  
 216. 3,2 Гц.  
 217. 4 кг.  
 218. 4,4 с; 0,23 Гц.  
 219. 0,5 с; 0,14 Дж.  
 220. 0,8 Дж.  
 224. 0,2 с.  
 225. 4 м/с.  
 226. 0,5 Гц.  
 227. 0,53 м.  
 228. Скористатися рівнянням  
 $x = x_{\max} \sin(2\pi t + \varphi)$ .  
 229.  $x_{\max}$ ;  $0,6x_{\max}$ .  
 230. 2,4 см.  
 231. 630 см/с; 0; -1300 см/с;  $-1,4 \cdot 10^5$  см/с<sup>2</sup>;  
 $-1,6 \cdot 10^5$  см/с<sup>2</sup>; 0.  
 232. 2 см; 2 с; 0,5π; 2π см/с;  
 $2\pi^2$  см/с<sup>2</sup>.  
 233.  $\varphi_1 = 0$ ;  $\varphi_2 = \pi/2$ ;  $\varphi_3 = \pi$ ;  $\varphi_4 = 3\pi/2$ ;  
 $x = 5 \sin(10\pi t + \varphi)$ .  
 234.  $x = 0,1 \cos \pi t$ ;  $3\pi/2$ ; 0; 0,25; 1,75 с.  
 235.  $x = 0,02 \sin(2/3\pi t)$ ; 0,25 с; 1,25 с;  
 1,75 с; 2,75 с.  
 236. Видовжити на 0,5 см.  
 237. 3,2 Гц.  
 240. 2,7 км/год.  
 241. 2 с; 2 м/с; 4 м.  
 242. 2,4 м/с.  
 243. 10 м.  
 245. 1,29 м.  
 246.  $\frac{3}{2}\pi$ .  
 247. 30 м/с; 350 м/с.  
 248. 0,25 мкс.  
 249. 600 кГц.  
 250.  $1 \cdot 10^{-12}$  —  $1 \cdot 10^{-5}$  с.  
 251. 100 кГц; 10 мкс; 2 мкКл.  
 252. 250 мА; 20 мкс.  
 253. 50 В; 20 мкс; 50 кГц.  
 258. 2 м.  
 259. 500 кГц.  
 260. 5 м.

261. 56 млн. км.  
 265. 160 кГц.  
 266. 20 мДж; 160 мА.  
 267. 50 мкКл; 2 мс; 100 мГн.  
 268. 2 мс; 680 нФ; 94 В.  
 269. 120 мкДж; 40 мкДж.  
 272. 100 — 200 м.  
 273. 88 пФ.  
 274. 51 мкГн.  
 275. 21 км/с.  
 276. 2500; 30.  
 278. Кут падіння повинен дорівнювати  $35^\circ$ .  
 279. Зросте на  $30^\circ$ .  
 280.  $53^\circ$ .  
 281. 1,35;  $73^\circ$ .  
 282.  $53^\circ$ .  
 283. а) 10 м; б) 14 м.  
 286.  $24^\circ$ ;  $42^\circ$ .  
 287. 1,4.  
 290. 91 см.  
 291. 12 см.  
 292. 3 см.  
 293. 6,9 см.  
 294. 1 см.  
 299.  $49^\circ$ .  
 300. Відіб'ється.  
 304. Максимум.  
 305.  $3^\circ 09'$ .  
 306. 10 мкм.  
 307. Світло.  
 310. 230 Мм/с; 190 Мм/с.  
 313.  $2 \cdot 10^6$ .  
 314. 220 Мм/с.  
 315. 0,3 мкм або кратне значенню цього числа.  
 316. 5 мкм.  
 317. 600 нм.  
 323.  $5^\circ 10'$ .  
 324. 57 мм.  
 331.  $3,8 \cdot 10^{-19}$  Дж; 2,3 еВ.  
 332.  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
 333.  $1,1 \cdot 10^{15}$  Гц.  
 334. 300 нм.  
 336.  $2,6 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $5 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
 337.  $1,2 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с; 550 нм.  
 338. 25 пм;  $8,9 \cdot 10^{-32}$  кг.  
 339. 0,12 еВ;  $6,6 \cdot 10^{-29}$  кг·м/с.  
 342. На білу в 2 рази більший.  
 346. 2,2 еВ;  $8,6 \cdot 10^5$  м/с.  
 347. 0,324 мкм.  
 348. 820 км/с.  
 349. 11 В.  
 350. 2,2 еВ.  
 352. 1,87 В.  
 353. 15 мм.  
 354.  $1,2 \cdot 10^6$ .  
 355. 1,6 Мм/с.  
 356.  $2,4 \cdot 10^{18}$  Гц.  
 357.  $2,4 \cdot 10^4$  К.  
 358.  $1,1 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с.  
 359. 2/3.  
 360. 330 км.  
 363. 2,53 еВ.  
 364. 656 нм; червоним.  
 365. 435 нм.  
 366. 3.  
 372.  $8 \cdot 10^{-15}$  Дж.  
 373. 30 кВ.  
 379. -0,84 еВ.  
 380. 490 нм.  
 381. 3,4 еВ.  
 382. 86 нм.  
 383. 630 нм.  
 384. 3м. у 8 разів.  
 397. 0,042 а.о.м.; 39 МеВ.  
 399. 8 год.  
 400. 60 років.  
 401.  $1,1 \cdot 10^{17}$ .  
 402. 55,4 року.  
 403.  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^{24}_{11}\text{Na}$ ,  ${}^{25}_{12}\text{Mg}$ ,  ${}^{55}_{26}\text{Fe}$ .  
 404. -2,8 МеВ; поглинається.  
 405. 2,8 МеВ.  
 406. 15 МеВ.  
 410.  $Z$  і  $A$  не змінюються, маса зменшується на масу — кванта.  
 411.  $Z$  і  $A$  зменшуються на 1;  $Z$  не змінюється,  $A$  зменшується на 1;  $Z$  зменшується на 1,  $A$  не змінюється.  
 412. 1,93 а.о.м.; 7,55 МеВ.  
 413. 1,08 а.о.м.; 8,52 МеВ.  
 414. 5- і 3-розпади.  
 415.  ${}^{215}_{84}\text{Po}$ .  
 416.  ${}^{234}_{92}\text{U}$ .  
 418. 88%.  
 419.  $1,95 \cdot 10^{17}$ .  
 420. 23%.  
 423. 17,5 МеВ.  
 424. -1,04 МеВ; поглинається.  
 425. -3,14; поглинається.  
 426. 2,2 МеВ.  
 427. 2,4 нм.

## Відповіді до рубрики «Фізичні задачі навколо нас»

1. Паралельно (послідовно).
2. а — Різниці потенціалів однакові, а заряди пропорційні ємностям; б — заряди однакові, а різниці потенціалів обернено пропорційні ємностям.
3. Більш висока пробивна напруга вимагає товстішого шару діелектрика, а це викликає зменшення ємності. Щоб зберегти задану ємність, необхідно збільшувати площу пластин.
4. Більшу енергію має конденсатор з більшою ємністю.
6. Закон Кулона застосовується для нерухомих електричних зарядів.
7. Потрібно розламати полотно на дві частини. Якщо полотно намагнічене, то обидві половини будуть взаємодіяти між собою.
8. Сила Ампера викличе згинання спіралі в тому випадку, якщо по ній проходить постійний струм.
9. У північній півкулі Землі знаходиться південний магнітний полюс. Якщо дивитися на земну кулю зі сторони цієї півкулі, то кільцевий струм повинен текти у напрямі руху годинникової стрілки, отже, електрони рухаються у протилежному напрямі.
10. Період коливань гойдалки зменшується, якщо на ній гойдаються стоячи.
11. Частота коливань зменшується.
12. Потрібно зменшити довжину маятника.
13. Маятники годинників (настінних і ручних) вимірюють рівні інтервали часу. Значення цих інтервалів часу у годинників різних марок можуть бути різними. У звичні нам секунди, хвилини, години ці рівномірні коливання перетворюються за рахунок руху багаточисленних зубчастих коліс у механізмах годинників.
14. Відро починає дуже розгойдуватися, коли власна частота коливань системи співпадає з частотою поштовхів під час ходьби. При зміні частоти кроків змінюється частота вимушених коливань відер і резонансні явища не виникають.
15. Хвилі повністю відбиваються від перешкод, що мають розміри, які більші за довжину хвилі.
16. Шибки в автобусі починають деренчати при збігу власних частот коливань з частотою коливань автобуса при певній швидкості руху.
17. Потрібно зменшити відстань між пластинками конденсатора.
18. Радіохвилі відбиваються від предметів, які проводять електричний струм.
19. Причиною радіоперешкод є електромагнітні хвилі, які випромінюються атмосферними розрядами і іскрами в різних технічних пристроях.
21. Міст і тунель екранують (відбивають і частково поглинають) електромагнітні хвилі.
22. Індуктивність котушки збільшиться, а частота коливань зменшиться.
23. Особливість монтування антени пояснюється характером поляризації радіохвиль.
24. У будь-якому металевому провіднику, що підлягає впливу електромагнітних хвиль, індукуються змінні струми високої частоти. Частково енергія цих струмів витрачається на збільшення внутрішньої енергії металу (нагрівання), що відповідає поглинанню хвиль, а частина енергії — на випромінювання електромагнітних хвиль, тому що сам провідник стає ніби антеною, що відповідає відбиванню хвиль.
25. Поворотом ручки настроювання досягається збільшення або зменшення площі обкладок конденсатора, що приводить до настроювання радіоприймача на частоту радіостанції.
28. Від кута спостереження залежить інтерференційна картина.

29. Можна. Оптична різниця ходу двох когерентних променів повинна дорівнювати  $(2k+1)\frac{\lambda}{2}$ .
30. Кратна 0,3 мкм.
31. 1,33 м.
32. Явище, подібне до того, що спостерігається під час відбивання світла від грамплатівки або CD-диска.
33. Зміниться, тому що зміниться оптична різниця ходу променів.
34. Дифракційна картина створюється оправою об'єктива або зеркалом телескопа.
35. Відстань і розміри збільшуються, якщо ґратка має більше число штрихів.
36. Видимі спектри ущільнюються, тому що довжина хвилі зменшується.
44. Частота фіолетового випромінювання більша, ніж червоного, тому швидкість поширення фіолетових променів у воді менша, ніж червоних, і, відповідно, показник заломлення води для фіолетових променів більший, ніж для червоних.
45. У дифракційному спектрі ширина кольорових смуг, що відповідають кольоровим променям білого випромінювання, приблизно однакова, тому рівномірний дифракційний спектр називається нормальним. Призматичний спектр білого випромінювання нерівномірний, він стиснутий в межах червоно-оранжевого випромінювання і розтягнутий в межах синьо-фіолетового випромінювання.
47. Тіло, яке повністю відбиває випромінювання всіх частот, називається білим. Тіло, яке повністю поглинає випромінювання всіх частот, називається чорним. Абсолютно білих і чорних тіл у природі не існує.
48. Через червоний фільтр ми будемо бачити листя чорного кольору, через зелений — зеленого.
49. Світло поглинається речовиною (водою).
50. Коричневий колір — набір багатьох різних довжин хвиль.
51. Перша розкладає світло на кольори, а друга, повторно заломлюючи його, збільшує розходження променів різних кольорів.
52. Виникає спектр.
53. Верх — фіолетовий, низ — червоний.
54. Чорним, тому що червоне світло поглинається зеленим склом.
56. Світло від ламп проходить через світлофільтри, які пропускають світло відповідного кольору.
57. Червоне світло розсіюється на молекулах повітря, краплинах води, що містяться в атмосфері, найменше, а, отже, його видно на більших відстанях.
58. Атмосфера Землі розсіює короткохвильову частину спектра: сині і голубі промені. Місяць атмосфери не має.
60. Кожний хімічний елемент має індивідуальний частотний склад електромагнітних випромінювань і поглинань.
61. Кількістю, розміщенням і кольором ліній.
62. Лінії Фраунгофера в суцільних спектрах Сонця і зірок є лініями спектра поглинання, які виникають внаслідок поглинання із суцільного спектра Сонця або зірок певних квантів енергії газами і парами, що знаходяться на їх поверхні.
63. Випромінюють.
64. За хімічною дією на фотоматеріали.
65. При будь-якій температурі.
67. Чорні жучки поглинають більше інфрачервоного випромінювання і гинуть.
69. Сонячні промені містять ультрафіолетове випромінювання.



## Словник фізичних термінів

**Автоколивання** — незатухаючі коливання, які підтримуються у коливальній системі завдяки постійному зовнішньому джерелу енергії, причому властивості цих коливань визначаються самою системою.

**Амплітуда гармонічних коливань** — модуль найбільшого зміщення тіла (коливальної системи) від положення рівноваги.

**Вимушені електромагнітні коливання** — коливання, що виникають під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється.

**Вимушені коливання** — коливання, що відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили.

**Власна провідність напівпровідників** — провідність напівпровідників, які не мають домішок.

**Власна частота** коливального контуру — частота вільних коливань.

**Граничний кут повного відбивання** — кут падіння  $\alpha_0$ , якому відповідає кут заломлення  $90^\circ$ .

**Густина струму** — векторна фізична величина, її модуль визначається відношенням сили струму  $I$  до площі поперечного перерізу провідника  $S$ :  $j = \frac{I}{S}$ .

**Дисперсія хвиль** — залежність їх швидкості від частоти. З явища дисперсії випливає, що хвилі, які входять до складу «білого» світла, в речовині поширюються з різними швидкостями: з найбільшою швидкістю поширюються хвилі, які ми сприймаємо як червоне світло, і з найменшою — хвилі, що сприймаються нами як фіолетове світло.

**Дифракція хвиль** (від лат. *diffractus* — розламаний) — відхилення від прямолінійного поширення хвиль, огинання хвилями перешкод.

**Довжина хвилі  $\lambda$**  — відстань між двома сусідніми гребенями.

**Довжина хвилі** — відстань, на яку переміщується електромагнітна хвиля за час, що дорівнює одному періоду коливання:  $\lambda = vT$ .

**Донорні домішки** — домішки, які легко віддають електрони і, отже, збільшують кількість вільних електронів.

**Електрична сила** — сила, з якою електричне поле діє на заряджені тіла.

**Електроліз** — процес виділення на електродах речовин, пов'язаний з окиснювально-відновними реакціями.

**Електролюмінесценція** — холодне свічення, що викликається електричним струмом.

**Електроємність провідника** — фізична величина, яка визначається відношенням заряду провідника  $q$  до його потенціалу  $\varphi$ :  $C = \frac{q}{\varphi}$ . Одиницею електроємності є 1 фарад (1 Ф).

Тіло має ємність 1 фарад, якщо зі зміною його заряду на 1 кулон потенціал змінюється на 1 вольт:  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл}/1\text{В}$ .

**Електромагнітна індукція** — це явище виникнення електричного струму в провідному контурі, який або розміщений нерухомо в змінному магнітному полі, або переміщується в постійному магнітному полі так, що кількість ліній магнітної індукції, які перетинають контур, змінюється.

**Електромагнітні коливання** — одночасні періодичні зміни пов'язаних між собою електричного і магнітного полів.

**Електромагнітна хвиля** — поширення у просторі електромагнітного поля, в якому напруженість електричного і індукція магнітного полів змінюються періодично.

**Електрорушійна сила (ЕРС)**, що діє в колі або на його ділянці — величина, яка визначається роботою сторонніх сил над одиничним позитивним зарядом:  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$ .

Одиницею ЕРС у СІ є 1 вольт (1 В): 1 В = 1 Дж/1 Кл.

**Електрон** (з грец. — янтар, бурштин) — стабільна елементарна частинка з негативним електричним зарядом  $e = -1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$  Кл і масою  $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31}$  кг.

**Електронна провідність напівпровідників** — провідність напівпровідників, зумовлена наявністю в них вільних електронів.

**Елементарні частинки** — найдрібніші з відомих частинок речовини або фізичного поля. За властивостями їх поділяють на фотони, лептони, мезони й баріони. Мезони й баріони називаються адронами. Майже всі елементарні частинки, а також їхні античастинки нестабільні, за винятком протона, електрона, фотона і нейтрино.

**Енергетичний вихід ядерної реакції** — різниця енергії спокою ядер і частинок до реакції і після реакції.

**Закон Джоуля—Ленца**: кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом, визначається добутком квадрата сили струму, опору провідника та інтервалу часу проходження струму по провіднику:  $Q = I^2 R \Delta t$ .

**Закон електромагнітної індукції**: ЕРС індукції в замкненому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром:  $\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$ .

**Закон Кулона**: сила взаємодії двох заряджених нерухомих тіл, розмірами яких можна знехтувати порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними, та напрямлена вздовж лінії, що сполучає ці тіла  $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ .

**Закон Ома для повного кола**: сила струму в повному колі визначається відношенням ЕРС кола до його повного опору:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ .

**Закон прямолінійного поширення світла**: в оптично однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно.

**Закони відбивання світла**: промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до межі двох середовищ, поставлений у точці падіння променя, лежать в одній площині. Кут відбивання  $\beta$  дорівнює куту падіння  $\alpha$ .

**Закони заломлення світла**: промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі двох оптичних середовищ, поставлений у точці падіння променя, лежать в одній площині.

Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для даних двох оптичних середовищ.

**Закони фотоефекту**: 1. Для кожної речовини існує така гранична довжина хвилі, при якій фотоефект ще можливий, але при опроміненні хвилями більшої довжини фотоефект неможливий (червона межа фотоефекту). 2. Число фотоелектронів, що вириваються з фотокатода за одиницю часу, пропорційне освітленості фотокатода. 3. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою випромінювання і не залежить від освітленості фотокатода. 4. Фотоефект практично безінерційний.

**Змінний струм** — це вимушені коливання електричних зарядів у провіднику під дією прикладеної змінної ЕРС.

**Ізотопи** — це ядра з одним і тим самим значенням  $Z$ , але з різними масовими числами  $A$ , тобто з різною кількістю нейтронів  $N$ .

**Індуктивність** — це фізична величина, яка визначається ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі у разі зміни сили струму на  $1 \text{ А}$  за  $1 \text{ с}$ . За одиницю індуктивності в СІ беруть один генрі ( $1 \text{ Гн}$ ).  $1 \text{ генрі}$  — це індуктивність провідника, в якому при зміні сили струму на  $1 \text{ А}$  за  $1 \text{ с}$  виникає ЕРС самоіндукції  $1 \text{ В}$ :  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с} / 1 \text{ А}$ .

**Індукційний струм** — струм, який виникає під час явища електромагнітної індукції.

**Інтерференція хвиль** — додавання в просторі двох (або кількох) хвиль, при якому відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результируючих коливань у різних точках простору.

**Коефіцієнт розмноження нейтронів** — відношення кількості нейтронів у будь-якому «поколінні» до кількості нейтронів попереднього «покоління».

**Коефіцієнт трансформації  $k$** : напруга на кінцях первинної обмотки трансформатора так відноситься до напруги на кінцях його вторинної обмотки, як кількість витків первинної

обмотки відноситься до кількості витків вторинної обмотки:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ .

**Колівальні системи** — пристрої, в яких можуть здійснюватися коливання.

**Колівальний контур** — коло, яке складається з конденсатора і котушки.

**Колівання гармонічні** — коливання, під час яких величини, що їх описують, змінюються з часом за законом синуса або косинуса.

**Коліваннями** або колівальними рухами називають такі види механічного руху чи зміни стану системи, які періодично повторюються в часі.

**Конденсатор плоский** — система із двох плоских провідних пластин, розміщених паралельно одна одній на малій порівняно з розмірами пластин відстані і розділених шаром діелектрика. Електроємність плоского конденсатора визначається за формулою:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$

**Критична маса** — найменша маса речовини, що ділиться, при якій може відбуватися ланцюгова ядерна реакція.

**Лазери** — генератори індукованого когерентного випромінювання.

**Лінії магнітної індукції** — це уявні лінії, дотичні до яких у даній точці збігаються за напрямом з вектором  $\vec{B}$  у цій точці.

**Люмінесценція** — спонтанне випромінювання, що відбувається за рахунок будь-якого виду енергії, окрім теплової.

**Люмінофори** — речовини, здатні випускати світло при їх опроміненні.

**Магнітне поле** — це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між рухомими електрично зарядженими частинками.

**Магнітна взаємодія** між провідниками зі струмом — взаємодія між рухомими електричними зарядами.

**Магнітним потоком  $\Phi$**  крізь поверхню  $\Delta S$  називають фізичну величину, яка визначається добутком  $B_n$  (проекції вектора магнітної індукції на нормаль до поверхні) і площею цієї поверхні:  $\Phi = B_n \Delta S \cos \alpha$ . Магнітний потік  $\Phi$  характеризує кількість ліній магнітної індукції, що проходять крізь дану поверхню. Одиницею магнітного потоку в СІ є один вебер ( $1 \text{ Вб}$ ).  $1 \text{ вебер}$  — потік через плоску поверхню площею  $1 \text{ м}^2$ , розміщену перпендикулярно до силових ліній однорідного магнітного поля, індукція якого дорівнює  $1 \text{ Тл}$ :  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ .

**Магнітна проникність даної речовини** — відношення  $\frac{\vec{B}}{B_0} = \mu$ , яке показує, у скільки

разів магнітна індукція в речовині більша за магнітну індукцію, створювану цим самим струмом у вакуумі.

**Магнітні сили** — сили, з якими провідники зі струмом діють один на одного.

**Модулем вектора магнітної індукції** називають відношення максимальної сили, що діє з боку магнітного поля на відрізок провідника зі струмом, до добутку сили струму на довжину цього відрізка:  $\vec{B} = \frac{\vec{F}_{\max}}{I\Delta l}$ . Одиницею магнітної індукції в СІ є одна тесла (1 Тл).

1 Тл = 1 Н/1 А · 1 м.

**Напівпровідники *n*-типу** (від слова *negativ* — негативний) — напівпровідники з донорною домішкою, в яких набагато більше електронів (порівняно з кількістю дірок). У напівпровіднику *n*-типу електрони — основні носії заряду, а дірки — неосновні.

**Напівпровідники *p*-типу** (від слова *positiv* — позитивний) — напівпровідники з переважанням діркової провідності над електронною. Дірки — основні носії заряду в напівпровіднику *p*-типу, а електрони — неосновні.

**Напруженість електричного поля** — векторна фізична величина, є основною кількісною характеристикою електричного поля. Її ще називають силовою характеристикою поля. Визначається за формулою  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ . Одиницею напруженості електричного поля

в СІ є 1 вольт на 1 метр (1В/1м). 1 Н/1 Кл = 1 В/1 м.

**Несамостійний газовий розряд** — струм у газі, який виникає під дією зовнішнього йонізатора.

**Період змінного струму** — інтервал часу  $T$ , протягом якого змінна ЕРС здійснює одне повне коливання.

**Період коливань** — мінімальний інтервал часу, через який відбувається повторення руху тіла.

**Повне внутрішнє відбивання** — явище, коли промені світла не виходять з середовища і повністю відбиваються всередину.

**Постулати Бора:** 1. Атоми, не зважаючи на те, що електрони в них рухаються з прискоренням, можуть тривалий час знаходитися в станах, в яких вони не випромінюють.

У кожному із стаціонарних станів атом може мати тільки строго певну енергію:  $E_1, E_2, E_3, \dots$ .

2. Атом може переходити з одного стаціонарного стану в інший стаціонарний стан. Під час переходу атома з  $m$ -го стаціонарного стану з більшою енергією в  $n$ -й стан з меншою енергією атом випромінює. Частота випромінювання визначається формулою  $\nu = \frac{E_m - E_n}{h}$ .

**Потенціал поля** — фізична величина, яка визначається відношенням потенціальної енергії пробного заряду, що знаходиться у даній точці електричного поля, до значення заряду:  $\varphi = \frac{W}{q}$ . Потенціал є скалярна величина. Потенціали точок поля позитивно зарядженого тіла мають додатне значення, потенціали ж негативно зарядженого тіла мають від'ємне значення. Одиницею потенціалу в СІ є 1 вольт (1 В): 1 В = 1 Дж/1 Кл.

**Потужність електричного струму** — відношення роботи струму за інтервал часу  $\Delta t$  до цього інтервалу часу:  $P = \frac{A}{\Delta t} = IU$ .

**Правило зміщення:** під час  $\alpha$ -розпаду ядро втрачає позитивний заряд  $2e$  і маса його зменшується приблизно на чотири одиниці атомної маси. У результаті елемент зміщується

на дві клітки до початку періодичної системи:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$ . Після  $\beta$ -розпаду еле-

мент зміщується на одну клітку ближче до кінця періодичної системи  ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e$ .  $\gamma$ -випромінювання не супроводиться зміною заряду; маса ж ядра змінюється надзвичайно мало.

**Правило Ленца:** індукційний струм, що виникає в замкненому контурі, протидіє зміні магнітного потоку, який збуджує цей струм.

**Правило лівої руки:** руку розміщують так, щоб силові лінії поля входили в долоню, а чотири пальці мали напрям струму у провіднику, тоді великий палець, відігнутий на  $90^\circ$ , покаже напрям сили, яка діє на провідник.

**Правило лівої руки:** якщо ліву руку розмістити так, щоб складова магнітної індукції  $\vec{B}$ , перпендикулярна до швидкості руху заряду, входила в долоню, а випрямлені чотири пальці були напрямлені за рухом позитивного заряду (проти руху негативного), то

відігнутий на  $90^\circ$  великий палець покаже напрям сили Лоренца  $\vec{F}_L$ , яка діє на заряд, вміщений у магнітне поле.

**Правило свердлика:** якщо напрям поступального руху свердлика збігається з напрямом струму в провіднику, то напрям обертання ручки свердлика збігається з напрямом вектора магнітної індукції.

**Період піврозпаду  $T$**  — це той час, за який розпадається половина всієї кількості наявних радіоактивних атомів.

**Принцип суперпозиції:** повна напруженість поля в точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених у даній точці окремими точковими зарядженими тілами:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

**Радіоактивність** — спонтанне перетворення одних ядер в інші, яке супроводжується випромінюванням різних частинок.

**Радіан** — одиниця плоского кута. За 1 радіан прийнято центральний кут, що спирається на дугу, довжина якої дорівнює її радіусу. 1 радіан наближено дорівнює  $57^\circ 17' 44,8''$ .

**Радіаційна безпека** — комплекс заходів, що зумовлюють безпечні умови роботи з радіоактивними речовинами та іншими джерелами йонізуючих випромінювань.

**Радіовипромінювання зір** — це електромагнітне випромінювання їх у діапазоні радіохвиль.

**Радіолокатор (радар)** — це радіопередавач і радіоприймач, які мають спільну антену, що має перемикач з приймання на передавання.

**Резонанс** — явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, коли частота їх наближається до частоти власних коливань системи:  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

**Різниця потенціалів** — фізична величина ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ), яка визначається відношенням роботи з переміщення пробного заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A}{q}.$$

Різницю потенціалів в електричному полі називають напругою. Позначають літерою  $U$ . Одиницею напруги в СІ є 1 вольт (1 В).

**Робота електричного струму** на ділянці кола визначається добутком сили струму, напруги та інтервалу часу, протягом якого ця робота виконувалася:  $A = IU\Delta t$ .

**Самоіндукція** — виникнення ЕРС у провіднику під час зміни сили струму в ньому самому.

**Самоіндукція** — явище виникнення індукованого струму в колі внаслідок зміни сили струму в ньому.

**Самостійний газовий розряд** — розряд у газах, який зберігається й після припинення дії зовнішнього йонізатора.

**Сила Ампера:** на провідник зі струмом, вміщений в однорідне магнітне поле, індукція якого  $B$ , діє сила, пропорційна довжині відрізка провідника  $\Delta l$ , силі струму  $I$ , який проходить по провіднику, та індукції магнітного поля  $B$ :  $F_A = BI\Delta l \sin \alpha$ .

**Сила Лоренца:** сила, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, пропорційна заряду частинки, швидкості її переміщення та індукції магнітного поля:  $F_L = evB \sin \alpha$ .

**Сила струму** — фізична величина, що характеризує швидкість перенесення заряду частинками, які створюють струм, через поперечний переріз провідника:  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ .

**Силкові лінії поля взаємодіючих тіл** — це криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора напруженості.

**Спектральний аналіз** — метод визначення хімічного складу складних речовин, заснований на вивченні лінійчастих спектрів цих речовин.

**Трансформатор** — це прилад, призначений для перетворення параметрів змінного струму, що складається з виготовленого з м'якого феромагнетика осердя замкненої форми, на якому встановлено дві обмотки — первинну і вторинну.

**Умова максимумів:** амплітуда коливань середовища в даній точці буде максимальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює цілому числу довжин хвиль:  $\Delta d = k\lambda$ , де  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

**Умова мінімумів:** амплітуда коливань середовища в даній точці буде мінімальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює непарному числу півхвиль:  $\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ .

**Фаза коливань** — величина  $\phi$ , яка стоїть під знаком косинуса або синуса.

**Флюоресценція** — це свічення тіл, що відбувається тільки в процесі їх опромінення.

**Фосфоресценція** — це свічення тіл, що відбувається як під час опромінення, так і після його припинення.

**Фотолюмінесценція** — холодне свічення, що викликається різними променями електромагнітного спектра.

**Хімічна люмінесценція** — холодне свічення, що виникає при хімічних реакціях.

**Циклічна або колова частота** — це кількість коливань тіла, але не за секунду, а за  $2\pi$  секунд.

**Частота змінного струму  $\nu$**  — кількість повних коливань, які здійснюються за 1 с.

**Частота коливань  $\nu$**  — кількість коливань, здійснених за одиницю часу.

**Швидкість хвилі  $v$**  називають швидкість, з якою переміщається гребінь хвилі.

**Ядерний (або атомний) реактор** — пристрій, в якому підтримується керована реакція поділу ядер.

**Ядерна реакція** — зміна атомних ядер внаслідок їх взаємодії з елементарними частинками і між собою.

## Предметно-іменний покажчик

**А**

Автоколивання 130  
 Амплітуда коливань 111  
 Ампер Анрі 67  
 Анігіляція 242  
 Антинейтрино 243  
 Антинейтрон 243  
 Антипротон 243

**Б**

Базони векторні 245  
 Бальмера серія 210  
 Баріони 244  
 Беккерель Анрі 228  
 Біпризма Френеля 166  
 Бор Нільс 207

**В**

Вебер 67  
 Вимушені електромагнітні коливання 131  
 Взаємодія сильна 226  
 Власна провідність напівпровідників 44  
 Власна частота 126  
 Вода важка 237

**Г**

Генрі 82  
 Герц Генріх 109, 135, 184  
 Гідрогенератор 90  
 Гіперон 244  
 Гістерезис 75  
 Глюони 245  
 Граничний кут 159  
 Гратка дифракційна 170  
 Густина струму 25  
 Гуйгенс Крістіан 114, 155, 168

**Д**

Дейтрон 243  
 Дисперсія хвиль 179  
 Дифракція хвиль 168  
 Діод напівпровідниковий 48  
 Діамагнетика 75  
 Довжина хвилі 120, 138  
 Домішки  
 — акцепторні 45  
 — донорні 45

**Е**

Електрична сила 10  
 Електричне поле 9  
 Електричний струм 24  
 Електроємність провідника 17  
 Електроліз 41  
 Електролітична дисоціація 40  
 Електролюмінесценція 189  
 Електромагнітна індукція 77  
 Електромагнітна хвиля 133  
 Електромагнітні коливання 125  
 Енергія електричного поля 21  
 Електрон 9, 242  
 Електронна провідність напівпровідників 43  
 Енергетичний вихід ядерної реакції 232  
 Енергія зв'язку ядра 226  
 Ерстед Ганс-Крістіан 62

**З**

Закон  
 — Джоуля-Ленца 29, 31  
 — електромагнітної індукції 28  
 — Кулона 9  
 — Ома для повного кола 32  
 — повного відбивання світла 159  
 — прямолінійного поширення світла 156  
 — радіоактивного розпаду 230  
 Закони  
 — відбивання світла 158  
 — заломлення світла 158  
 — фотоефекту 186  
 Змінний струм 88

**І**

Ізотопи 225  
 Індуктивність 82  
 Індукційний струм 77  
 Інтерференція хвиль 163

**Й**

Йонізація 41  
 Йонна провідність 41

**К**

Каони 244  
 Квант 183

**Кварк 244**

Когерентні джерела 165  
 Коефіцієнт  
 — відтворення 237  
 — розмноження нейтронів 234  
 — трансформації 93  
 Коливальний контур 125  
 Коливальні системи 109  
 Коливання  
 — вимушені 117  
 — вільні 116  
 — гармонічні 110  
 — затухаючі 116  
 Конденсатор 18—21  
 Критична маса 237  
 Кулон Шарль 9  
 Кюрі П'єр 228  
 Кюрі-Склодовська Марія 228

**Л**

Лазери 193  
 Лептони 244  
 Лінії магнітної індукції 65  
 Лінії напруженості 12  
 Лоренц Гендрік 68  
 Люмінесценція 189  
 Люмінофори 189

**М**

Магнітне поле 63  
 — вихрове 66  
 — однорідне 66  
 Магнітна взаємодія 63  
 Магнітний момент 67  
 Магнітний потік 67  
 Магнітна проникність речовини 74  
 Магнітні сили 62  
 Максвелл Джеймс 132, 156, 175  
 Маятник  
 — математичний 114  
 — фізичний 115  
 Модель  
 — атома 206  
 — ядра 225  
 Мезон 244  
 Модуль вектора магнітної індукції 67

**Н**

Надпровідність 40  
 Нاپівпровідники 42  
 Напруга 15  
 Напруженість електричного поля 11, 15  
 Нейтрино 242  
 Нейтрон 225  
 Несамостійний газовий розряд 41  
 Нуклони 226  
 Ньютон Ісаак 177

**О**

Ом Георг 33  
 Опір  
 — внутрішній 31  
 — зовнішній 31

**П**

Паралельне з'єднання  
 — конденсаторів 20  
 — провідників 27  
 Парамагнетика 74  
 Період змінного струму 89  
 Період коливачь 109  
 Період піврозпаду 230  
 Піон 242  
 Планк Макс 182  
 Повне внутрішнє відбивання 159  
 Позитрон 241  
 Показник заломлення  
 — абсолютний 158  
 — відносний 158  
 Поляризація світла 173  
 Поляріди 173  
 Послідовне з'єднання  
 — конденсаторів 20  
 — провідників 26  
 Постулати Бора 207—208  
 Потенціал поля 14  
 Потужність електричного струму 29  
 Правило  
 — зміщення 229  
 — Ленца 79  
 — лівої руки 63, 69  
 — свердлика 65  
 Протон 9  
 Призма трикутна 159  
 Принцип Гюйгенса 168  
 Принцип суперпозиції 11  
 Пульсари 143

**Р**

Радіан 111  
 Радіоактивність 229  
 Радіоастрономія 143

Радіовипромінювання зір 143  
 Радіолокатор 142  
 Радіохвилі 139  
 Реактор-розмножувач 237  
 Резерфорд Ернест 205  
 Резонанс 118, 132  
 Рекомбінація 41  
 Рентгенівське випромінювання 139, 219  
 Рівняння Ейнштейна 186  
 Різниця потенціалів 14  
 Різниця фаз 112  
 Робота електричного струму 28  
 Ротор 90

**С**

Самоіндукція 81  
 Самостійний газовий розряд 41  
 Світловод 160  
 Сила  
 — Ампера 68  
 — Лоренца 68  
 — струму 25  
 Силові лінії 12  
 Спад напруги 25  
 Спектр  
 — випромінювання 213  
 — поглинання 213, 215  
 — смугастий 213  
 Спектральний аналіз 214  
 Спектроскоп 159, 212, 216  
 Статор 90  
 Сторонні сили 30  
 Струм зміщення 133

**Т**

Теорія світла  
 — електромагнітна 156  
 — корпускулярна 155  
 — хвильова 155  
 Термістор 48  
 Тесла 67  
 Трансформатор 92  
 Турбогенератор 90

**У**

Ультрафіолетове випромінювання 139  
 Умова  
 — максимумів 164, 171  
 — мінімумів 164

**Ф**

Фаза коливачь 111  
 Фарад 18  
 Фарадей Майкл 10, 12, 18, 76, 77  
 Фермі Енріко 232

Феромагнетика 75  
 Флюоресценція 189  
 Формула  
 — Бальмера 211  
 — Гюйгенса 114  
 — Томсона 129  
 Фотоелемент 187  
 Фотоэффект 184  
 Фотон 184, 244  
 Фотолюмінесценція 189  
 Фоторезистор 188  
 Фотострум 185  
 Фраунгофера лінії 215  
 Френель Огюст 166, 176

**Х**

Хвилі  
 — поздовжні 119  
 — поперечні 119  
 Хімічна люмінесценція 189

**Ц**

Циклічна частота 111

**Ч**

Частинки  
 — «дивні» 244  
 — елементарні 241  
 — «зачаровані» 244  
 — субатомні 241  
 Частота змінного струму 88  
 Частота коливачь 109  
 Частота хвилі 120  
 Червона межа фотоефекту 185, 186

**Ш**

Швидкість хвилі 121  
 Шкала електромагнітних хвиль 139

**Ю**

Юнг Томас 165, 176

**Я**

Ядерний реактор 235  
 Ядерна реакція 231  
 Ядерна реакція ланцюгова 233  
 Ядерні сили 226



*Навчальне видання*

*СИРОТЮК Володимир Дмитрович  
БАШТОВИЙ Володимир Іванович*

**ФІЗИКА**

Підручник для 11 класу  
загальноосвітніх навчальних закладів  
(рівень стандарту)

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*

**Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено**

Редактори *І. О. Пуніна, І. В. Луценко*  
Художній редактор *Т. М. Канарська*  
Технічний редактор *Ц. Б. Федосіхіна*  
Коректори *Л. С. Бобир, Л. А. Еско*

Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 24,7.  
Обл.-вид. арк. 26. Тираж 69 600 прим. Зам. № 11-0001.

ТОВ «Сиция», 61017, м. Харків, вул. Кокчетавська, 20.  
Свідоцтво ДК № 3363 від 30.12.2008 р.

Віддруковано з готових діапозитивів  
ТОВ «ПЕТ»  
Св. ДК № 3179 від 08.05.2008 р.  
61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 17.



ISBN 978-966-2542-02-8



9 789662 542028 >