

О. Я. Кузнєцова, Н. П. Муранова

# ФІЗИКА

У двох частинах

Частина 2

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник*

Київ  
Видавництво  
Національного авіаційного університету «НАУ-друк»  
2009

УДК 53(075.8)  
ББК В 3я7  
К 891

*Тиражувати  
без офіційного дозволу НАУ забороняється*

**Рецензенти:**

**Ю. І. Джежеря**, д-р фіз.-мат. наук, проф.  
(Національний технічний університет України «КПІ»)

**Б. С. Карпінос**, д-р тех. наук, проф.  
(Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України)

**І. П. Ільчишин**, канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.  
(Інститут фізики НАН України)

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України  
(Лист 1-4/18-Г-985 від 07.05.2008)*

**Кузнєцова О. Я.**

К 891 Фізика : навч. посіб. У 2 ч. Ч. 2 / О. Я. Кузнєцова, Н. П. Муранова. — К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. — 292 с.

ISBN 978-966-598-524-2

ISBN 978-966-598-548-8 (Ч. 2)

Автори навчального посібника мали на меті допомогти учням систематизувати здобуті знання з фізики, підготувати їх до незалежного тестування та адаптувати до вимог навчання за кредитно-модульною системою.

Зміст посібника відповідає робочій навчальній програмі з фізики Інституту доуніверситетської підготовки Національного авіаційного університету та програмі загальноосвітнього навчального закладу.

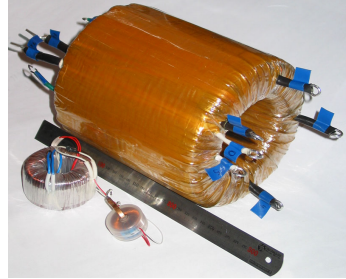
Для абітурієнтів, слухачів підготовчих курсів, студентів, учителів та учнів середніх загальноосвітніх шкіл.

УДК 53 (075.8)  
ББК В3я7

ISBN 978-966-598-524-2  
ISBN 978-966-598-548-8 (Ч. 2)

© Кузнєцова О. Я., Муранова Н. П., 2009  
© НАУ, 2009

## Розділ 3



# Електромагнетизм

---

---

---

---

**Тема Е-1.** Взаємодія нерухомих зарядів. Закон Кулона

**Тема Е-2.** Електричне поле

**Тема Е-3.** Робота електричного поля

**Тема Е-4.** Речовина в електричному полі

**Тема Е-5.** Закон постійного струму

**Тема Е-6.** Робота електричного струму. Теплова та хімічна дія електричного струму

**Тема Е-7.** Магнітне поле. Дія магнітного поля та провідника зі струмом та рухомий заряд

**Тема Е-8.** Явище електромагнітної індукції

---

---

---

---

***E-1.1. Теоретичні відомості***

Розділ фізики, який вивчає властивості взаємодії нерухомих заряджених тіл або частинок, називається **електростатикою**. Для кількісної характеристики електричних властивостей тіл введено поняття електричного заряду. Властивості електричного заряду такі.

1. У природі існують тільки **два різновиди** електричного заряду: позитивний і негативний.

2. Заряд будь-якого знака завжди має свого «носія»: не існує електричного заряду без елементарної частинки, але існують елементарні частинки без заряду.

3. Носієм елементарної порції негативного електричного заряду виступає частинка електрон. Заряд електрона позначається  $e$  і дорівнює  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Маса електрона дорівнює  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

4. Носієм елементарної порції позитивного електричного заряду виступає частинка протон. Заряд протона дорівнює заряду електрона  $+1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Маса протона дорівнює  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.

5. Електричний заряд макроскопічного тіла дорівнює сумі електричних зарядів усіх частинок цього тіла, тобто  $q = \pm Ne$ .

6. Різнойменні заряджені тіла притягуються, однойменні — відштовхуються.

7. Взаємодія нерухомих заряджених тіл відбувається через електричне поле, створене кожним із них навколо себе у просторі.

8. Система заряджених тіл називається електрично ізольованою, якщо вона не обмінюється з зовнішніми тілами електрично зарядженими частинками.

9. Для електрично ізольованої системи виконується **закон збереження електричного заряду**: алгебраїчна сума електричних зарядів тіл або частинок залишається сталою при будь-яких процесах, які відбуваються в цій системі.

Зважаючи на властивості електричного заряду, можна дати визначення електричному заряду: **електричний заряд** — це скалярна величина, яка характеризує електричні властивості заряджених час-

тинок і макроскопічних тіл, електричну взаємодію між ними, а також взаємодію з зовнішнім електричним полем.

Тепер ми знаємо, що заряд завжди несе або частинка, або макроскопічне тіло. Проте для стислості висловлювання говоритимемо просто «заряд», розуміючи при цьому, що він неодмінно належить носію заряду.

Сила взаємодії між нерухомими зарядженими частинками і тілами визначається за експериментально встановленим **законом Кулона**: сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів  $q_1$  і  $q_2$  прямо пропорційна до абсолютної величини кожного із зарядів і обернено пропорційна до квадрата відстані між ними:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2},$$

де  $r$  — відстань між центрами зарядів;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — діелектрична стала;  $\epsilon$  — діелектрична проникність середовища, яка залежить від властивостей середовища і визначається за спеціальними таблицями.

Проаналізуємо закон Кулона.

1. У формулу закону Кулона підставляють **модулі (абсолютні величини) зарядів**, не враховуючи знака заряду.

2. У формулюванні закону є термін «точковий електричний заряд» — це заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати в умовах даної задачі. Тут виявляється аналогія між визначенням точкового заряду і матеріальної точки, поняття про яку було введено в механіці.

3. Закон Кулона виконується як для точкових заряджених тіл, так і для макроскопічних, які мають форму кулі.

4. Якщо взаємодіють два заряджені круглі не точкові тіла, то відстань між ними має враховувати радіуси  $R$  цих тіл (рис. Е-1.1):

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon (r + 2R)^2}.$$

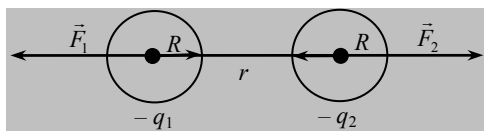


Рис. Е-1.1

5. Діелектрична проникність середовища — це величина, яка показує у скільки разів сила  $F_0$  взаємодії у вакуумі на тій самій

відстані між тими самими зарядами більша, ніж сила взаємодії  $F$  у даному середовищі:

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F}.$$

Наприклад, у гасі сили притягання і відштовхування двох заряджених тіл у 2,1 раз, а у склі — у 6—8 раз менші, ніж у вакуумі. Діелектрична проникність визначається експериментально. Для вакууму  $\varepsilon = 1$ , для повітря  $\varepsilon = 1,000585 \approx 1$ .

6. Як напрямлена сила Кулона? Чи правомірно так ставити питання? Невже між двома зарядами діє одна сила? Безперечно, ні, бо йдеться про **взаємодію двох зарядів!** Потрібно розуміти, що сили Кулона — це сили **дії і протидії**. Тому якщо заряди однойменні, вони відштовхуються один від одного (за третім законом Ньютона) із силами, модуль яких однаковий, а напрямлені сили у протилежні боки (рис. Е-1.2, а) вздовж прямої, що сполучає заряди.

І навпаки, якщо заряди різнойменні, вони притягують один одного (за третім законом Ньютона) силами, модуль яких однаковий, а напрямлені сили назустріч (рис. Е-1.2, б) вздовж прямої, що з'єднує заряди.



Рис. Е-1.2

### Е-1.2. Завдання для поточного тестування

1. Зазначити властивості, що стосуються заряду:

- 1) у природі існує тільки два різновиди електричного заряду;
- 2) не існує електричного заряду без елементарної частинки;
- 3) існують елементарні частинки без заряду;
- 4) існує найменша неподільна порція негативного електричного заряду;
- 5) існує найменша неподільна порція позитивного електричного заряду;
- 6) різнойменні заряди притягуються;
- 7) однойменні заряди притягуються;
- 8) електричний заряд макроскопічного тіла дорівнює сумі електричних зарядів усіх частинок цього тіла.

2. Дописати висловлювання: носієм ..... порції негативного електричного заряду виступає частинка .....

3. Дописати висловлювання: носієм ..... порції позитивного електричного заряду виступає частинка .....

4. Дописати формулювання закону збереження електричного заряду: ..... сума електричних зарядів тіл або частинок ..... при будь-яких процесах, які ..... в ..... системі.

5. Дописати формулювання закону Кулона: сили ..... двох ..... точкових зарядів прямо пропорційна до абсолютної величини ..... і обернено пропорційна до ..... між ними.

6. Підставити у формулу, яка визначає силу Кулона, позначення потрібних величин:  $F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2}$ :

- 1)  $r^2$ ; 2)  $r$ ; 3)  $q_0$ ; 4)  $q_2$ ; 5)  $\epsilon_0$ ; 6)  $\epsilon$ .

7. Зазначити властивості електричного поля, створеного нерухомим зарядом:

- 1) ще одна форма існування матерії;
- 2) має фізичні властивості, так само як і речовина;
- 3) забезпечує електричну взаємодію;
- 4) виникає у просторі навколо нерухомого заряду;
- 5) дію електричного поля можна виявити тільки поблизу від заряду, що створив це поле;
- 6) лінії напруженості поля замкнені;
- 7) лінії напруженості поля незамкнені;
- 8) поле вихрове;
- 9) поле безвихрове;
- 10) електричне поле діє на рухомі та нерухомі заряджені тіла.

8. Два заряди у вакуумі взаємодіють із такою самою силою на відстані 27 см, як у рідині на відстані 3 см. Діелектрична проникність рідини дорівнює:

- 1) 3; 2) 9; 3) 27; 4) 81; 5) правильної відповіді тут немає.

9. Два заряди, перебуваючи в повітрі на відстані 5 см, діють один на одного із силою 120 мкН, а в деякій рідині на відстані 10 см — із силою 15 мкН. Діелектрична проникність рідини дорівнює:

- 1) 2; 2) 4; 3) 8; 4) 16; 5) правильної відповіді тут немає.

10. Два однакові заряди у вакуумі на відстані 20 см взаємодіють з такою самою силою, що й у трансформаторному мастилі на відстані 14 см. Діелектрична проникність трансформаторного мастила дорівнює:

1) 1,5; 2) 2; 3) 2,5; 4) 3; 5) правильної відповіді тут немає.

**11.** Два точкові заряди перебувають на деякій відстані один від одного. Якщо відстань між ними зменшується на 50 см, то сила взаємодії збільшується у 2 рази. Початкова відстань між зарядами дорівнює, м:

1) 1,4; 2) 1,7; 3) 2; 4) 2,3; 5) правильної відповіді тут немає.

**12.** Дві заряджені кулі взаємодіють із силою 0,1 Н. Якою буде сила кулонівської взаємодії цих куль при збільшенні заряду кожної кулі у 2 рази, якщо відстань між ними залишається незмінною?

1) 0,1 Н; 2) 0,2 Н; 3) 0,4 Н; 4) 0,05 Н; 5) 0,025 Н.

**13.** Як зміниться сила кулонівської взаємодії двох точкових електричних зарядів при зменшенні відстані між ними у два рази?

1) Зменшиться в 4 рази; 2) зменшиться у 2 рази; 3) збільшиться у 4 рази; 4) збільшиться у 2 рази; 5) не зміниться.

**14.** Як зміниться сила кулонівської взаємодії двох точкових електричних зарядів, якщо, не змінюючи відстані між ними, помістити їх у гас? Діелектрична проникність гасу  $\epsilon = 2$ .

1) Збільшиться у 2 рази; 2) зменшиться у 2 рази; 3) не зміниться.

### ***E-1.3. Висновки з теми***

1. Електричний заряд — це скалярна величина, яка характеризує електричні властивості заряджених частинок і макроскопічних тіл, електричну взаємодію між ними, а також взаємодію із зовнішнім електричним полем.

2. Точковий електричний заряд — це заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати в умовах даної задачі.

3. Електричний заряд не можна відокремити від частинки або макроскопічного тіла.

4. Закон збереження електричного заряду: алгебраїчна сума електричних зарядів тіл або частинок залишається сталою при будь-яких процесах, які відбуваються в цій системі.

5. Закон Кулона виконується для точкових заряджених тіл або рівномірно заряджених сферичних макроскопічних тіл.

6. Сили Кулона — це сили дії і протидії.

7. Коли заряди однойменні, то вони відштовхуються один від одного із силами, модуль яких однаковий, а напрямлені ці сили в протилежні боки вздовж прямої, що сполучає ці заряди.



8. Коли заряди різнойменні, то вони притягуються один до одного із силами, модуль яких однаковий, а напрямлені сили назустріч одна одній вздовж прямої, що сполучає ці заряди.

9. Діелектрична проникність середовища — це величина, яка показує у скільки разів сила взаємодії у вакуумі на тій самій відстані між тими самими зарядами більше, чим сила взаємодії у даному середовищі.

### *Е-1.4. Приклади розв'язування задач*

**Задача 1.** З якою силою взаємодіяли б у вакуумі два заряди, по 1 Кл кожний, на відстані 1 км один від одного?

*Дано:*

$$q_1 = q_2 = 1 \text{ Кл};$$

$$r = 1 \text{ км} = 10^3 \text{ м};$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

---


$$F \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Силу взаємодії двох зарядів визначимо за законом Кулона:

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

Перевіримо одиницю величини:

$$[F] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл}^2 \cdot \text{м}^2} \right] = [\text{Н}].$$

Виконуємо обчислення:

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 1}{(10^3)^2} = 9 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

**Відповідь.** Сила взаємодії зарядів дорівнює 9 кН.

**Задача 2.** Два позитивні заряди  $q$  і  $2q$  перебувають на відстані 10 мм. Заряди взаємодіють із силою  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Н. Визначити абсолютну величину кожного заряду.

*Дано:*

$$q_1 = q;$$

$$q_2 = 2q;$$

$$r = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м};$$

$$F = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Н};$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

---


$$q_1 \text{ — ? } q_2 \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

За законом Кулона визначимо силу взаємодії між зарядами:

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

Підставимо у формулу значення зарядів згідно з умовами задачі:

$$F = k \frac{q \cdot 2q}{r^2} = k \frac{2q^2}{r^2},$$

звідки

$$q^2 = \frac{Fr^2}{2k} \text{ або } q = \sqrt{\frac{Fr^2}{2k}} = r \sqrt{\frac{F}{2k}}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[q] = \left[ \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}} \right] = \left[ \sqrt{\text{Кл}^2} \right] = [\text{Кл}].$$

Виконуємо обчислення:

$$q = \sqrt{\frac{7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 9 \cdot 10^9}} = \sqrt{0,4 \cdot 10^{-17}} = \sqrt{4 \cdot 10^{-18}} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

Оскільки  $q_1 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ , то  $q_2 = 2q = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ .

**Відповідь.** Заряди дорівнюють відповідно  $2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$  та  $4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ .

**Задача 3.** Два заряди  $9q$  і  $-q$  закріплено на відстані 50 см один від одного. Третій заряд  $q_3$  може перемішуватися тільки вздовж прямої, яка сполучає заряди. Визначити положення заряду  $q_3$ , за якого він перебуватиме в рівновазі. Визначити знак заряду, за якого рівновага буде стійкою.

*Дано:*

$$\begin{aligned} q_1 &= 9q; \\ q_2 &= -q; \\ l &= 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м} \end{aligned}$$

$$q_3 \text{ — ? } x \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Заряд  $q_3$  перебуватиме в рівновазі тоді, коли векторна сума сил, які діють на заряд, дорівнюватиме нулю. Це означає, що на заряд  $q_3$  мають діяти дві сили, однакові за модулем і протилежні за напрямом. Проаналізуємо, коли може виконуватися ця умова.

Вважатимемо, що заряд  $q_3$  позитивний. Нехай заряд  $q_3$  перебуватиме ліворуч від заряду  $q_1$ , як показано на рис. 1, а. Нагадаємо, що рівновага буде стійкою, коли за незначного відхилення від стану рівноваги виникає рівнодійна сила, яка повертає тіло до стану рівноваги.

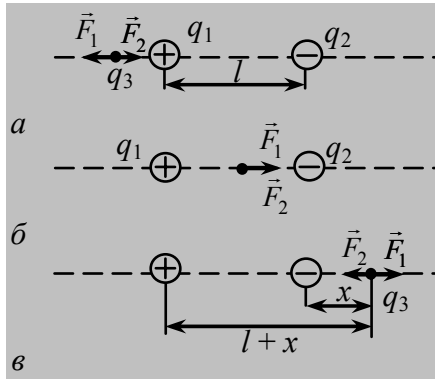


Рис. 1

На заряд  $q_3$  з боку заряду  $q_1$  діє сила  $\vec{F}_1$ , а з боку заряду  $q_2$  — сила  $\vec{F}_2$ . Сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  протилежно напрямлені. За умови рівноваги

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0,$$

тобто має виконуватися рівність

$$F_1 = F_2.$$

За законом Кулона маємо:

$$F_1 = \frac{9^2 q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ та } F_2 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 (l+r)^2},$$

де  $r$  — відстань від заряду  $q_3$  до заряду  $q_1$ .

Очевидно, що за даних значень зарядів  $q_1$  та  $q_2$  неможливо отримати рівність  $F_1 = F_2$ .

Отже, за такого розташування заряду  $q_3$  рівновага неможлива.

Нехай заряд  $q_3$  перебуватиме між зарядами  $q_1$  та  $q_2$ , як показано на рис. 1, б. Сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  напрямлені в один бік — до заряду  $-q$ . Отже, і при такому розташуванні заряду  $q_3$  не виконуватиметься умова  $F_1 = F_2$ , тобто рівновага неможлива.

Нехай заряд  $q_3$  перебуватиме праворуч від заряду  $q_2$ , як показано на рис. 1, в. Сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  напрямлені в протилежні боки. У цьому разі можна знайти таку точку на прямій, де сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  будуть однаковими:

$$F_1 = F_2.$$

Нехай відстань від заряду  $q_2$  до заряду  $q_3$  дорівнює  $x$ , тоді відстань від заряду  $q_1$  до заряду  $q_3$  становить  $(l + x)$ . За законом Кулона маємо:

$$\frac{9qq_3}{(l+x)^2} = \frac{qq_3}{x^2}.$$

Після перетворень дістанемо:

$$x = l / 2.$$

Виконуємо обчислення:

$$x = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ м.}$$

Визначимо знак заряду, за якого рівновага буде стійкою. Розглянемо два випадки: 1) заряд позитивний; 2) заряд негативний.

1) Коли заряд  $q_3$  позитивний, то при зміщенні його ліворуч сила  $F_2$  буде більша, ніж  $F_1$ , і на заряд  $q_3$  діятиме результуюча сила, напрямлена в бік заряду  $q_2$ . Під дією цієї сили заряд  $q_3$  віддаляється від стану рівноваги. Те саме відбувається і при зміщенні заряду  $q_3$  праворуч. Сила  $F_1$  буде більшою, ніж  $F_2$ , і на заряд  $q_3$  діятиме результуюча сила, напрямлена від заряду  $q_2$ . Заряд під дією цієї сили буде зміщуватися праворуч, тобто віддалятися від стану рівноваги. Отже, у разі позитивного заряду рівновага буде нестійкою.

2) Коли заряд  $q_3$  негативний, то при його зміщенні до заряду  $q_2$  модуль сили  $F_2$  буде більшим, ніж модуль сили  $F_1$ . Результуюча сила буде напрямлена праворуч від заряду  $q_2$ . Під дією цієї сили заряд  $q_3$  повертатиметься до стану рівноваги. При зміщенні заряду  $q_3$  від заряду  $q_2$  сила  $F_2$  буде меншою, ніж сила  $F_1$ . Тоді результуюча сила напрямлена ліворуч, і заряд  $q_3$  знову повертається до стану рівноваги. Отже, рівновага буде стійкою, коли заряд  $q_3$  негативний.

**Відповідь.** На відстані 0,25 м праворуч від негативного заряду  $q_2$  негативний заряд  $q_3$  перебуватиме в стані стійкої рівноваги.

**Задача 4.** Дві однакові кульки масою 0,1 г кожна підвішені на нитках завдовжки 25 см. Після надання кулькам однакових зарядів, вони розійшлися на відстань 5 см одна від одної. Визначити заряди, яких надали кулькам. Діелектрична проникність повітря дорівнює одиниці.

**Дано:**

$$\begin{aligned} m_1 = m_2 = 0,1 \text{ г} = 10^{-4} \text{ кг}; \\ l = 25 \text{ см} = 25 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ r = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2; \\ q_1 = q_2 = q \end{aligned}$$

$q$  — ?

**Розв'язання**

*Перший спосіб.* На кожну кульку діють сила тяжіння  $\vec{F}_T = m\vec{g}$ , сила натягу нитки  $\vec{T}$  і сила Кулона  $\vec{F}_K$  (рис. 2). Запишемо умову рівноваги для кульки у векторній формі:

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{F}_K = 0.$$

Запишемо це рівняння в проєкціях на осі координат.

На вісь  $x$ :

$$-T \sin \alpha + F_K = 0.$$

Тоді

$$T \sin \alpha = k \frac{q^2}{r^2};$$

на вісь  $y$ :

$$T \cos \alpha - mg = 0.$$

Тоді

$$T \cos \alpha = mg.$$

Поділімо перше рівняння на друге:

$$\frac{T \sin \alpha}{T \cos \alpha} = \frac{k \frac{q^2}{r^2}}{mg}.$$

Звідси

$$\text{tg } \alpha = k \frac{q^2}{r^2 mg}.$$

Оскільки кут  $\alpha$  малий, то  $\text{tg } \alpha = \sin \alpha = \frac{r}{2l}$ .

Тоді

$$\frac{r}{2l} = k \frac{q^2}{r^2 mg},$$

звідки

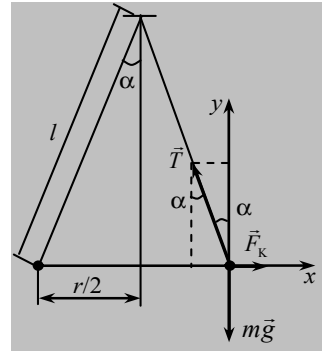


Рис. 2

$$q = r \sqrt{\frac{rmg}{2kl}}$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[q] = \left[ \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\text{М} \cdot \text{КГ} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2}}{\text{Н} \cdot \text{М}^2}}{\frac{\text{КЛ}^2}{\text{М}}}} \right] = \left[ \text{М} \frac{\text{КЛ}}{\text{М}} \right] = [\text{КЛ}].$$

Виконуємо обчислення:

$$q = 5 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-4} \cdot 9,8}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-2} \cdot 9 \cdot 10^9}} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ КЛ.}$$

**Відповідь.** Кожній кульці надали заряду 5,2 нКл.

**Задача 5.** На нитках однакової довжини підвішено дві однакові однойменно заряджені кульки, занурені в гас. Визначити густину матеріалу кульки, якщо кут розходження ниток однаковий у повітрі і в гасі.

*Дано:*

$$q_1 = q_2 = q;$$

$$l_1 = l_2 = l;$$

$$\alpha_1 = \alpha_2;$$

$$\rho_{\text{гасу}} = 0,82 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3;$$

$$\epsilon_{\text{гасу}} = 2,1$$

$\rho - ?$

*Розв'язання*

На заряд у повітрі діють сили тяжіння  $m\vec{g}$ , сила Кулона  $\vec{F}_k$ , сила натягу нитки  $\vec{T}$  (рис. 3). Коли заряди розійшлися на деякий кут, вони перебувають у стані рівноваги:

$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_k = 0.$$

Запишемо це рівняння у проекціях на осі координат:

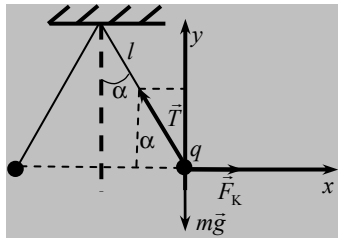


Рис. 3

$$x: F_k - T \sin \alpha = 0,$$

$$y: T \cos \alpha - mg = 0.$$

Визначимо з кожного рівняння силу натягу нитки:

$$T \sin \alpha = F_k \text{ та } T \cos \alpha = mg.$$

Поділивши почленно ці рівняння, дістанемо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_k}{mg}. \quad (1)$$

У гасі на кульки окрім тих самих сил, ще діє сила Архімеда (рис. 4).  
Запишемо аналогічне рівняння:

$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_{k1} + \vec{F}_A = 0.$$

Перепишемо це рівняння у проекціях на осі координат:

$$x: F_{k1} - T \sin \alpha = 0,$$

$$y: T \cos \alpha - mg + F_A = 0.$$

Визначимо з кожного рівняння силу натягу нитки:

$$T \sin \alpha = F_{k1} \text{ і } T \cos \alpha = mg - F_A.$$

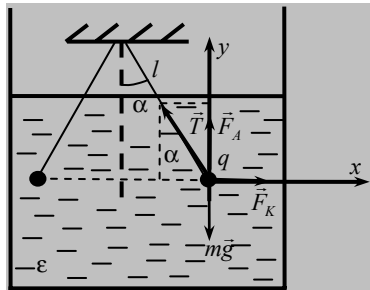


Рис. 4

Поділивши почленно ці рівняння, дістанемо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_{k1}}{mg - F_A}. \quad (2)$$

За умовою задачі кути розходження кульок у повітрі і в гасі однакові. Прирівняємо рівняння (1) і (2):

$$\frac{F_{\text{к}}}{mg} = \frac{F_{\text{к1}}}{mg - F_A}$$

Сила Кулона, яка діє на кульки в повітрі, визначається за формулою:

$$F_{\text{к}} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Сила Кулона, яка діє на кульки в гасі, визначається так:

$$F_{\text{к1}} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{гасу}}r^2}$$

Сила Архімеда визначається так:

$$F_A = \rho_{\text{гасу}}gV,$$

де  $V$  — об'єм кульки. Силу тяжіння можна визначити за формулою:

$$mg = \rho gV.$$

Після відповідних підставлень і перетворень маємо:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{гасу}}\epsilon_{\text{гасу}}}{\epsilon_{\text{гасу}} - 1}$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\rho] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

Виконуємо обчислення:

$$\rho = \frac{0,82 \cdot 10^3 \cdot 2,1}{2,1 - 1} = 1,57 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

**Відповідь.** Густина матеріалу кульок дорівнює  $1,57 \cdot 10^3$  кг/м.

### ***Е-1.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**1-1.** Заряди 40 і  $-10$  нКл перебувають на відстані 10 см один від одного. Який потрібно взяти третій заряд і де слід його розмістити,



щоб рівнодійна сил, які діють на нього з боку інших зарядів, дорівнювала нулю? (40 нКл; за 10 см від заряду – 10 нКл і за 20 см від заряду 40 нКл).

**1-2.** Дві однакові провідні заряджені кульки, що мають заряди 24 і 6 нКл, перебувають на відстані 4 см одна від одної. Кульки доторкнулися одну до одної, а потім віддалили на попередню відстань. Визначити силу взаємодії кульок до та після доторкання. (0,81 мН; 1,26 мН).

**1-3.** Дві кульки однакового радіуса й маси підвішено в повітрі так, що їхні поверхні торкаються. Після того як їм разом надали заряд  $8 \cdot 10^{-7}$  Кл, кульки розійшлися на кут  $60^\circ$ . Визначити масу однієї кульки, якщо довжина підвісу до центра кульок становить 0,2 м ( $l \gg r$ ). ( $6,36 \cdot 10^{-3}$  кг)

**1-4.** На нитках завдовжки 0,62 м, закріплених в одній точці, підвішено дві кульки масою  $10^{-4}$  кг кожна. При наданні кулькам рівних однойменних зарядів нитки розійшлися, утворивши кут  $60^\circ$ . Визначити : 1) силу взаємодії зарядів; 2) заряд кожної кульки. ( $6,34 \cdot 10^{-4}$  Н;  $1,8 \cdot 10^{-7}$  Кл).

**1-5.** У вершинах квадрата розташовано негативні заряди, по  $-5 \cdot 10^{-4}$  Кл кожний. Який позитивний заряд потрібно помістити в точку перетину діагоналей, щоб система перебувала в рівновазі? ( $4,5 \cdot 10^{-4}$  Кл)

**1-6.** Сила взаємодії двох зарядів у воді становить 0,3 мН. З якою силою взаємодіятимуть ці заряди в плексигласі? (7,4 мН)

### ***Е-1.6. Задачі для самостійного розв'язування***

**1-7.** Загальний заряд двох маленьких позитивно заряджених кульок дорівнює  $5 \cdot 10^{-5}$  Кл. Як розподілено цей заряд між кульками, якщо вони, перебуваючи на відстані 2 м одна від одної, відштовхуються із силою 1 Н? ( $3,8 \cdot 10^{-5}$  Кл;  $1,2 \cdot 10^{-5}$  Кл)

**1-8.** З якою силою взаємодіють дві маленькі кульки у вакуумі, якщо їхні заряди дорівнюють  $6 \cdot 10^{-9}$  і  $-3 \cdot 10^{-9}$  Кл? Відстань між кульками становить 5 см. ( $6,5 \cdot 10^{-5}$  Н)

**1-9.** Заряди 90 і 10 нКл перебувають на відстані 4 см один від одного. Де потрібно розмістити третій заряд, щоб сили, які діють на нього з боку двох інших зарядів, були однакові за модулем і протилежні за напрямом? (За 1 см від меншого заряду)

**1-10.** Заряди 10 і 16 нКл перебувають на відстані 7 мм один від одного. Яка сила діятиме на заряд 2 нКл, розміщений у точці, віддаленій на 3 мм від меншого заряду і на 4 мм від більшого? (2 мН)

**1-11.** Електричне поле утворено двома зарядами  $5 \cdot 10^{-4}$  і  $-5 \cdot 10^{-4}$  Кл, що перебувають на відстані 10 см один від одного в точках *A* та *B*.

Яка сила діятиме на краплину, що міститься на перпендикулярі, побудованому до середини відрізка  $AB$  на відстані 5 см від  $AB$ ? Заряд краплини дорівнює заряду 10 електронів. ( $1,7 \cdot 10^{-9}$  Н)

**1-12.** Два заряди перебувають у вакуумі на відстані  $r$  один від одного. На якій відстані потрібно розмістити ці заряди в середовищі з діелектричною проникністю  $\epsilon$ , щоб сила їхньої взаємодії не змінилася? ( $r / \sqrt{\epsilon}$ )

**1-13** Визначити, у скільки разів електростатична сила, що діє між електроном і протоном, більша від гравітаційної. ( $2,3 \cdot 10^{39}$ )

**1-14.** На нитках завдовжки 0,87 м, закріплених в одній точці, підвішено кульки масою  $8,9 \cdot 10^{-4}$  кг кожна. При наданні кулькам однакового однойменного заряду вони розійшлися на кут  $21^\circ$ . Визначити: 1) силу взаємодії зарядів; 2) заряд кожної кульки. ( $1,62 \cdot 10^{-3}$  Н;  $1,34 \cdot 10^{-7}$  Кл)

**1-15.** У вершинах квадрата містяться заряди по 1 мкКл. Який негативний заряд потрібно помістити в точку перетину діагоналей, щоб уся система перебувала в рівновазі? ( $-0,96$  мкКл)

**1-16.** Визначити кінетичну енергію електрона в атомі водню та силу притягання його до ядра атома, якщо електрон перебуває на орбіті, радіус якої  $5 \cdot 10^{-11}$  м. ( $2,3 \cdot 10^{-18}$  Дж;  $9,2 \cdot 10^{-8}$  Н)

**1-17.** Дві однакові кульки масою 2,5 г кожна підвішено в повітрі так, що їхні поверхні дотикаються одна до одної. Після того як їм разом надали заряду  $4 \cdot 10^{-7}$  Кл, кульки розійшлися на кут  $60^\circ$ . Знайти відстань між кульками. Для повітря  $\epsilon = 1$ ; узяти  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>. (0,16 м).

**1-18.** Дві маленькі кульки, заряди яких дорівнюють  $-10e$  та  $+15e$ , розміщено у воді на відстані 5 см одна від одної. Визначити силу взаємодії між кульками. ( $1,7 \cdot 10^{-25}$  Кл).

**1-19.** Кульку, яка має заряд  $9,8 \cdot 10^{-8}$  Кл, підвішено в повітрі на тонкій нитці. Коли до кульки на відстань 4 см наблизили заряд протилежного знака в  $1,8 \cdot 10^{-8}$  Кл, нитка відхилилася на  $45^\circ$  від вертикалі. Визначити масу кульки. ( $10^{-3}$  кг).

### *E-2.1. Теоретичні відомості*

Електричний заряд або заряджене тіло створює навколо себе в просторі електричне поле. Якщо поле передає дію одного нерухомого заряду на інший нерухомий заряд, воно називається **електростатичним полем**.

Характеристика електричного поля:

1. Це об'єктивна реальність, ще одна форма існування матерії, що має фізичні властивості, так само як і речовина.
2. Електричне поле забезпечує електричну взаємодію.
3. Електричне поле, яке оточує заряд або заряджене тіло, сягає в нескінченність. Проте електричні сили швидко зменшуються зі збільшенням відстані від заряду. Тому на практиці дію електричного поля можна виявити тільки поблизу від цього заряду.
4. Органи чуття людини не можуть виявити, чи є у просторі електричне поле чи його немає.
5. Електричне поле можна виявити через дію на заряджені тіла.

### **Силова характеристика електричного поля**

Якщо в електричне поле помістити пробний заряд, то з боку поля на нього діятиме сила.

Величина, яка дорівнює відношенню сили, що діє на пробний заряд  $q_0$ , уміщений у дану точку поля, до абсолютної величини (модуля) цього заряду, являє собою **силову характеристику** поля і називається вектором **напруженості**  $\vec{E}$  електричного поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

*Пробний заряд*  $q_0$  не повинен спотворювати досліджуваного електричного поля, тому його абсолютна величина має бути дуже малою порівняно із зарядом, який створює досліджуване електричне поле. Домовилися за пробний брати *позитивний* заряд.

**Напрямок вектора напруженості електричного поля збігається з напрямом сили, яка діє на пробний заряд.**

Електричне поле називається *однорідним*, якщо вектор напруженості цього поля в усіх його точках однаковий за модулем і напрямом. Електростатичне електричне поле — *стаціонарне*, тобто не змінюється в часі. Модуль вектора напруженості електричного поля визначається так:

$$E = \frac{F}{q_0}.$$

Якщо сила дорівнює

$$F = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2},$$

то

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}.$$

Тут  $r$  — відстань від заряду, який створює електричне поле, до точки поля, де визначається вектор напруженості. Одиниця напруженості електричного поля — Н/Кл або В/м (ньютон на кулон або вольт на метр).

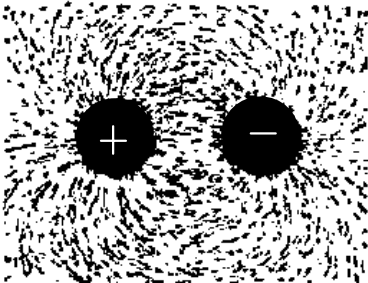


Рис. Е-2.1

зарядами, зображено на рис. Е-2.1.

*Напруженість електричного поля — це векторна величина. Вектор завжди має модуль і напрям.*

Як визначити напрям вектора напруженості електричного поля? Графічно електричне поле зображують *лініями напруженості*, або *силовими лініями*. Силкові лінії електричного поля, створеного двома різнойменними

Зауважимо, що існування силових ліній підтверджується експериментально. Скляну ванну заповнюють машинним мастилом, в яке насилають подрібнене волосся. Потім у ванну занурюють металеві електроди, які створюють у ній електричне поле. В окремих волосинах наводяться заряди, які розміщуються вздовж силових ліній, утворюючи картину, подану на рис. Е-2.1.

**Лінією напруженості** електричного поля, або **силовою лінією**, називають таку лінію, дотична до якої в кожній точці збігається з вектором напруженості поля (рис. Е-2.2).

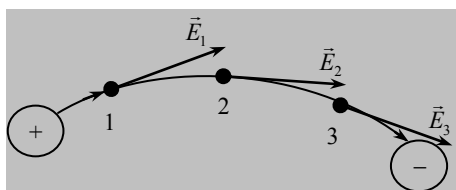


Рис. Е-2.2

Домовилися, що лінії напруженості починаються на позитивному заряді і закінчуються на негативному (див. рис. Е-2.2). Якщо поле у просторі утворює поодинокий позитивний заряд, тоді лінії напруженості поля напрямлені по радіусу від заряду і закінчуються в нескінченності (рис. Е-2.3, а).

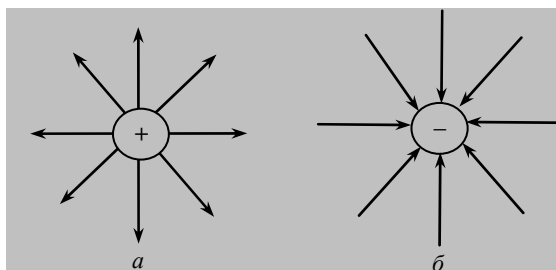


Рис. Е-2.3

Якщо поле у просторі створює поодинокий негативний заряд, то лінії напруженості поля напрямлені по радіусу до заряду, а починаються в нескінченності (рис. Е-2.3, б). Лінії напруженості електричного поля, створеного двома однойменними та різнойменними зарядами, ілюструє рис. Е-2.4.

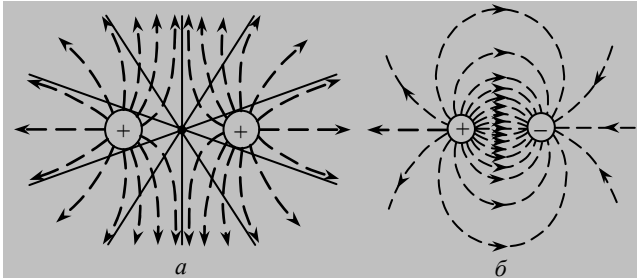


Рис. Е-2.4

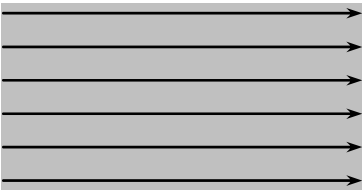


Рис. Е-2.5

Силві лінії проводять густіше там, де напруженість поля більша.

Лінії напруженості однорідного поля зображують у вигляді паралельних прямих, розміщених на однаковій відстані одна від одної (рис. Е-2.5).

Із усього сказаного впливають такі **властивості силових ліній**:

- лінії напруженості електростатичного поля ніде не перетинаються одна з одною;
- лінії напруженості незамкнені і між зарядами не перериваються;
- лінії напруженості починаються на позитивному заряді (або в нескінченності) і закінчуються на негативному заряді (або в нескінченності).

Отже, вектор напруженості електричного поля, створеного поодиноким позитивним зарядом, напрямлений по радіусу від заряду і закінчується в нескінченності. І, навпаки, вектор напруженості електричного поля, створеного поодиноким негативним зарядом, напрямлений по радіусу до заряду, а починається в нескінченності.

Що робити, коли є кілька поодиноких зарядів і кожний створює своє електричне поле? У цьому разі поля окремих зарядів перекриваються, утворюючи результуюче електричне поле.

Для визначення напрямку вектора напруженості цього поля потрібно скористатися сформульованим далі **принципом суперпозиції** електричних полів.

**Вектор напруженості результуючого поля є векторною сумою векторів напруженостей полів, створених кожним зарядом окремо:**

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

**Приклад.** Нехай у вакуумі існують два різнойменні заряди (рис. Е-2.6). Потрібно визначити напрям вектора напруженості результуючого поля в точці  $I$ , розміщеній на відстані  $a$  від позитивного заряду і на відстані  $b$  від негативного. Спочатку потрібно побудувати в точці  $I$  вектори напруженості електричних полів, створених кожним зарядом окремо. Для цього сполучимо прямою лінією кожний заряд із точкою  $I$ .

Як нам відомо, вектор напруженості  $\vec{E}_1$  електричного поля, створеного позитивним зарядом, напрямлений від заряду в нескінченність. Виконаємо паралельне перенесення цього вектора від заряду в точку  $I$ . Вектор напруженості  $\vec{E}_2$  електричного поля, створеного негативним зарядом, напрямлений із нескінченності до заряду. І знову виконаємо паралельне перенесення цього вектора в точку  $I$ . Далі знайдемо векторну суму векторів  $\vec{E}_1$  та  $\vec{E}_2$ :

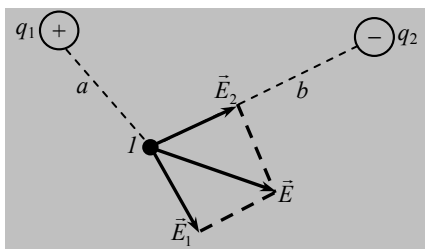


Рис. Е-2.6

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Модуль вектора  $\vec{E}$  визначається за теоремою косинусів.

### Е-2.2. Завдання для поточного тестування

1. Зазначити властивості електричного поля, створеного нерухомим зарядом:

- 1) ще одна форма існування матерії;
- 2) має фізичні властивості, так само як і речовина;
- 3) забезпечує електричну взаємодію;
- 4) виникає у просторі навколо нерухомого заряду;
- 5) дію електричного поля можна виявити тільки поблизу від заряду, що створив це поле;
- 6) лінії напруженості поля замкнені;
- 7) лінії напруженості поля незамкнені;
- 8) поле вихрове;

- 9) поле безвихрове;  
 10) електричне поле діє на рухомі та нерухомі заряджені тіла.

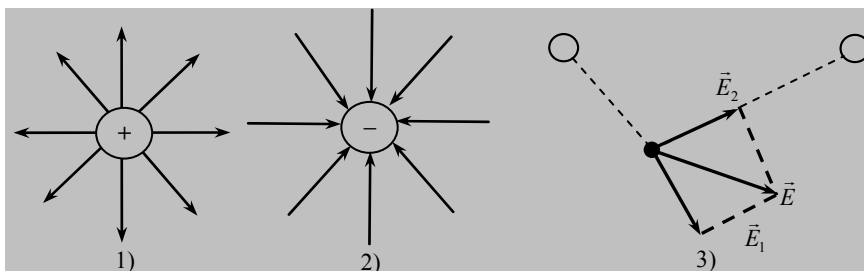
2. Підставити у формулу, яка визначає напруженість електричного поля, позначення потрібних величин:  $\vec{E} = \frac{?}{?}$ :

- 1)  $r^2$ ; 2)  $r$ ; 3)  $q_0$ ; 4)  $q_2$ ; 5)  $\epsilon_0$ ; 6)  $\epsilon$ ; 7)  $\vec{F}$ .

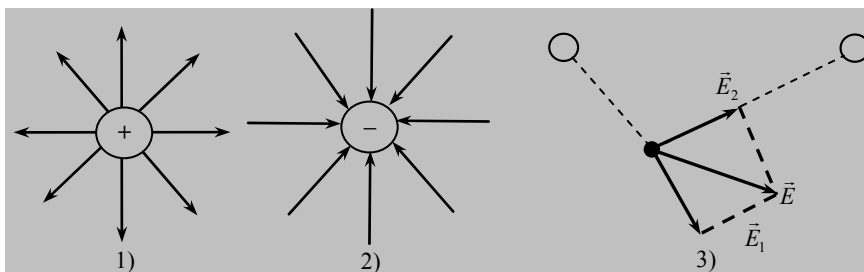
3. Підставити в формулу для розрахунку модуля вектора напруженості електричного поля позначення потрібних величин:  $E = \frac{q}{4\pi ???}$ :

- 1)  $r^2$ ; 2)  $r$ ; 3)  $q_0$ ; 4)  $q_2$ ; 5)  $\epsilon_0$ ; 6)  $\epsilon$ ; 7)  $\vec{F}$ .

4. Який із наведених далі рисунків є зображенням ліній напруженості електричного поля, створеного поодиноким позитивним зарядом?

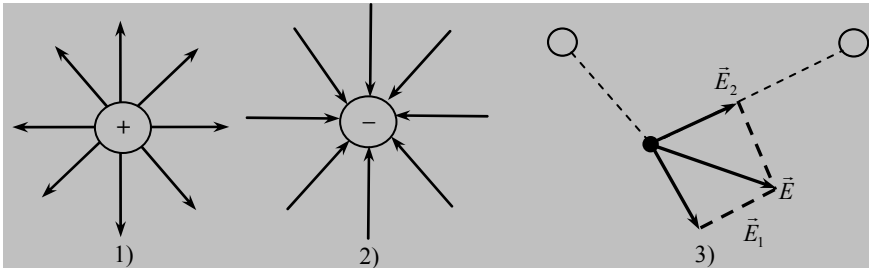


5. Який із наведених далі рисунків є зображенням ліній напруженості електричного поля, створеного поодиноким негативним зарядом?



6. Який із наведених далі рисунків ілюструє принцип суперпозиції електричних полів?





7. Визначити напруженість електричного поля, створюваного електричним зарядом  $10 \text{ нКл}$  на відстані  $3 \text{ см}$  від нього.

1)  $10^5 \text{ В/м}$ ; 2)  $3 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; 3)  $10^{-7} \text{ В/м}$ ; 4)  $3 \cdot 10^{-7} \text{ В/м}$ ; 5) інша відповідь.

8. Визначити заряд, який створює електричне поле, якщо на відстані  $5 \text{ см}$  від нього напруженість поля становить  $1,6 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ .

1)  $54 \text{ нКл}$ ; 2)  $44 \text{ нКл}$ ; 3)  $24 \text{ нКл}$ ; 4)  $15 \text{ нКл}$ ; 5) інша відповідь.

9. Визначити напруженість електричного поля в точці, в якій на точковий заряд  $50 \text{ нКл}$  діє сила  $3 \text{ мН}$ .

1)  $60 \text{ кВ/м}$ ; 2)  $70 \text{ кВ/м}$ ; 3)  $80 \text{ кВ/м}$ ; 4)  $100 \text{ кВ/м}$ ; 5) інша відповідь.

10. Як зміниться за модулем напруженість електричного поля точкового заряду при зменшенні відстані від заряду в  $4$  рази?

1) Зменшиться у  $4$  рази; 2) зменшиться у  $2$  рази; 3) зменшиться в  $16$  раз; 4) збільшиться в  $4$  рази; 5) збільшиться в  $16$  разів; 6) збільшиться у  $2$  рази.

11. Визначити напруженість електричного поля, створюваного електричним зарядом  $40 \text{ нКл}$  на відстані  $2 \text{ см}$  від нього у гасі. Діелектрична проникність гасу  $\epsilon = 2$ .

1)  $100 \text{ кВ/м}$ ; 2)  $200 \text{ кВ}$ ; 3)  $350 \text{ кВ/м}$ ; 4)  $450 \text{ кВ/м}$ ; 5) інша відповідь.

12. Як зміниться напруженість електричного поля, створеного нерухомим зарядом у повітрі, якщо заряд занурити у воду ( $\epsilon = 81$ )?

1) Зменшиться у  $81$  раз; 2) збільшиться у  $81$  раз; 3) збільшиться у  $9$  раз; 4) інша відповідь.

### ***E-2.3. Висновки з теми***

1. Електричне поле — об'єктивна реальність, ще одна форма існування матерії, яка має фізичні властивості, так само як і речовина.

2. Електричне поле забезпечує електричну взаємодію.
3. Електричне поле, яке оточує заряд або заряджене тіло, сягає в нескінченність.
4. Електричні сили швидко зменшуються зі збільшенням відстані від заряду. Тому на практиці дію електричного поля можна виявити тільки поблизу від цього заряду.
5. Органи чуття людини не можуть виявити, чи є в просторі електричне поле чи його немає.
6. Електричне поле можна виявити через дію на заряджені тіла.
7. Поле, яке передає дію одного нерухомого заряду на інший нерухомий заряд, називається електростатичним.
8. Величина, яка дорівнює відношенню сили, що діє на пробний заряд  $q_0$ , уміщений в дану точку поля, до абсолютної величини цього заряду, являє собою силову характеристику поля і називається вектором напруженості  $\vec{E}$  електричного поля.
9. Напруженість електричного поля характеризує будь-яку точку електричного поля, незалежно від того, внесено туди пробний заряд чи ні.
10. Вектор напруженості електричного поля має такий самий напрям, як і сила, що діє на позитивний пробний заряд.
11. Принцип суперпозиції електричних полів: вектор напруженості результуючого поля є векторною сумою векторів напруженості полів, створених кожним зарядом окремо.
12. Лінією напруженості електричного поля, або силовою лінією, називають таку лінію, дотична до якої в кожній точці збігається з вектором напруженості поля.
13. Лінії напруженості електричного поля не завжди являють собою траєкторію руху заряду.

#### ***Е-2.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** Два заряди  $9,0 \cdot 10^{-8}$  і  $1,6 \cdot 10^{-7}$  Кл розміщено на відстані 5 см один від одного. Визначити напруженість електричного поля в точці, відділеній від першого заряду на 3 см і від другого на 4 см.

***Дано:***

$$\begin{aligned}
 q_1 &= 9,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}; \\
 q_2 &= 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}; \\
 r &= 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\
 r_1 &= 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\
 r_2 &= 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}
 \end{aligned}$$

$E - ?$

***Розв'язання***

На рис. 1 побудовано вектор напруженості результуючого поля, створеного двома позитивними зарядами. Вектор напруженості результуючого електричного поля знайдемо за принципом суперпозиції полів:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Модуль вектора напруженості результуючого поля визначимо за теоремою косинусів:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \alpha}.$$

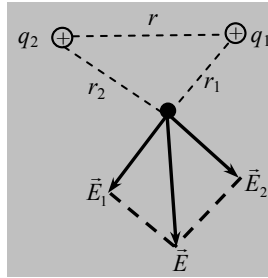


Рис. 1

Оскільки  $r^2 = r_1^2 + r_2^2$ , то утворений трикутник — прямокутний. Відповідно, кут  $\alpha$  в трикутнику, утвореному векторами напруженості електричного поля, також дорівнює  $\frac{\pi}{2}$ . Тоді теорема косинусів перетворюється на теорему Піфагора:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}.$$

Модулі векторів напруженості електричних полів, створених першим і другим зарядами, визначаються за формулами:

$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \quad \text{і} \quad E_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}.$$

Після підставлень маємо:

$$E = \sqrt{\left(\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}\right)^2}.$$

Виконуємо обчислення:

$$E = \sqrt{\left(\frac{9,0 \cdot 10^{-8}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3^2 \cdot 10^{-4}}\right)^2 + \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4^2 \cdot 10^{-4}}\right)^2} = 12,7 \cdot 10^5 \text{ Н/Кл.}$$

**Відповідь.** Модуль вектора напруженості дорівнює  $12,7 \cdot 10^5$  Н/Кл.

**Задача 2.** Заряди  $q_1 = 4q$  та  $q_2 = -q$  перебувають на відстані 10 см один від одного. На якій відстані від заряду  $q_2$  напруженість поля дорівнює нулю?

*Дано:*

$$\begin{aligned} q_1 &= 4q; \\ q_2 &= -q; \\ r &= 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м.} \\ \hline x & \text{ — ?} \end{aligned}$$

*Розв'язання*

На рис. 2 побудовано вектор напруженості результуючого поля, створеного двома зарядами. Вектор напруженості результуючого електричного поля знайдемо за принципом суперпозиції полів:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

або

$$E = E_1 - E_2 = k \frac{q_1}{\epsilon(r+x)^2} - k \frac{q_2}{\epsilon x^2}.$$

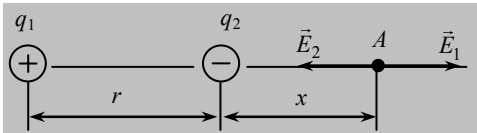


Рис. 2

За умовами задачі  $E = 0$ ,  
тоді

$$k \frac{4|q|}{\epsilon(r+x)^2} - k \frac{|q|}{\epsilon x^2} = 0,$$

або

$$\frac{4q}{\epsilon(r+x)^2} = \frac{q}{\epsilon x^2}.$$

Після перетворень дістанемо

$$x = r.$$

Виконуємо обчислення:

$$x = 0,1 \text{ м.}$$

**Відповідь.** На відстані 0,1 м від заряду  $q_2$  праворуч модуль вектора напруженості дорівнює нулю.

**Задача 3.** Напруженість електричного поля в деякій точці дорівнює 0,4 кН/Кл. Визначити силу, з якою поле в цій точці діятиме на заряд 4,5 мкКл.

*Дано:*

$$\begin{aligned} E &= 0,4 \text{ кН/Кл} = 4 \cdot 10^2 \text{ Н/Кл}; \\ q &= 4,5 \text{ мкКл} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \\ \hline F & \text{ — ?} \end{aligned}$$

*Розв'язання*

Згідно з визначенням, напруженість електричного поля

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

Звідси сила, з якою поле в цій точці діє на заряд, дорівнює.

$$F = Eq.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[F] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \cdot \text{Кл} \right] = [\text{Н}].$$

Виконуємо обчислення:

$$F = 4 \cdot 10^2 \cdot 4,5 \cdot 10^{-6} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

**Відповідь.** Сила, з якою діє електричне поле на заряд, дорівнює 1,8 мН.

**Задача 4.** Два однакові позитивні заряди, по  $10^{-7}$  Кл кожний перебувають у повітрі на відстані 8 см один від одного. Визначити напруженість поля в точці  $O$ , що лежить на середині відрізка, який сполучає заряди.

**Дано:**

$$q_1 = q_2 = 10^{-7} \text{ Кл};$$

$$d = 8 \text{ см} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

$$E_O = ?$$

**Розв'язання**

За принципом суперпозиції полів вектор напруженості поля, що створюється зарядами  $q_1$  і  $q_2$ , визначається так:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

У точці  $O$  (рис. 3) вектори  $\vec{E}_{10}$  і  $\vec{E}_{20}$  напрямлені в протилежні боки.

Оскільки заряди  $q_1 = q_2$  і вони розміщені на однаковій відстані від точки  $O$ , то виконується рівність:

$$E_O = E_{10} - E_{20} = 0.$$

**Відповідь.** Модуль вектора напруженості електричного поля в точці  $O$  дорівнює нулю.

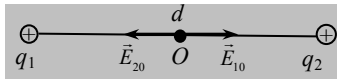


Рис. 3

### *Е-2.5. Задачі для аудиторного розв'язування*

**2-1.** Визначити напруженість електричного поля в точці, в якій на точковий заряд 5 нКл діє сила 30 мкН. Яку абсолютну величину має точковий заряд, що утворив це поле, якщо відстань між зарядами дорівнює 100 мм? (6 кВ/м; 6,7 нКл)

**2-2.** Визначити напруженість електричного поля посередині між двома точковими зарядами 4 і  $-5$  нКл, якщо відстань між ними 0,6 м. (0,9 кВ/м)

**2-3.** Два заряди  $q_1 = 9 \cdot 10^{-8}$  Кл і  $q_2 = 1,6 \cdot 10^{-7}$  Кл перебувають на відстані 5 см один від одного. Визначити напруженість поля в точці, віддаленій від першого заряду на 3 см і від другого на 4 см. ( $1,27 \cdot 10^6$  В/м)

**2-4.** П'ять однакових точкових зарядів, утворених 300 електронами кожний, рівномірно розміщені на півколі радіусом 1 мм. Визначити напруженість поля в центрі кривини. (1 В/м)

**2-5.** Заряджена кулька масою 0,18 г перебуває в рівновазі в рідкому діелектрику, в якому створено однорідне електричне поле, напрямлене вгору, напруженістю 45 кВ/м. Визначити, зі скількох елементарних зарядів складається заряд кульки. Густина матеріалу кульки дорівнює  $1800 \text{ кг/м}^3$ , а діелектрика —  $900 \text{ кг/м}^3$ . ( $1,2 \cdot 10^{11}$ )

### *Е-2.6. Задачі для самостійного розв'язування*

**2-6.** Два точкові заряди  $9q$  і  $-q$  перебувають на відстані 8 см один від одного. На якій відстані від другого заряду напруженість електричного поля дорівнює нулю? (4 см)

**2-7.** У трьох вершинах квадрата, сторона якого дорівнює 40 см, розміщені однакові позитивні заряди, по 5 нКл кожний. Визначити напруженість поля в четвертій вершині. (540 В/м)

**2-8.** Два точкові заряди  $5 \cdot 10^{-8}$  і  $10^{-8}$  Кл перебувають на відстані 10 см один від одного. Визначити напруженість електричного поля в точці, віддаленій на 8 см від першого і на 6 см від другого заряду. ( $1,26 \cdot 10^5$  В/м)

**2-9.** Визначити напруженість електричного поля в точці, розміщеній посередині між зарядами  $2 \cdot 10^{-7}$  і  $4 \cdot 10^{-7}$  Кл, які перебувають у скипидарі на відстані 10 см один від одного. ( $10^6$  В/м)

**2-10.** Електрон, маса якого  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, під дією однорідного електричного поля напруженістю 91 В/м рухається з прискоренням. Визначити прискорення електрона. ( $1,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}^2$ )

**2-11.** Краплина олії діаметром 0,1 мм рухається вгору зі сталим прискоренням  $0,2 \text{ м/с}^2$  в однорідному вертикальному електричному

полі. Чому дорівнює напруженість поля, якщо заряд краплини  $10^{-12}$  Кл, а густина олії  $8 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup>? (4,2 кВ/м)

**2-12.** В однорідне електричне поле, утворене двома паралельними пластинами, помістили кульку масою 2 г, підвішену на тонкій шовковій нитці. Кульці надали заряду  $10^{-6}$  Кл. Визначити напруженість поля, якщо нитка відхилилася на  $30^\circ$  від вертикалі. ( $1,1 \cdot 10^4$  В/м)

**2-13.** Краплина масою  $10^{-4}$  г перебуває в рівновазі в однорідному електричному полі з напруженістю 98 Н / Кл. Визначити заряд краплини. ( $10^{-8}$  Кл).

**2-14.** Мідна куля, занурена в олію, перебуває у вертикальному електричному полі, напруженість якого дорівнює  $4 \cdot 10^6$  В/м. Визначити заряд кулі, якщо вона зависла всередині олії. Густина олії — 800 кг/м<sup>3</sup>; діелектрична проникність дорівнює 5. ( $7 \cdot 10^{-8}$  Кл).

**2-15.** Пучок електронів, який прискорюється електричним полем із різницею потенціалів 5 кВ, рухається між вертикальними пластинами довжиною 5 см, напруженість поля між якими дорівнює 40 кВ / м. Визначити вертикальне зміщення пучка на виході з пластин. (0,005 м).

**2-16.** Електрон рухається в однорідному електричному полі, напруженість якого дорівнює 90 Н / Кл, у напрямі силових ліній. Визначити відстань, яку подолає електрон в електричному полі до зупинки, якщо його початкова швидкість дорівнює  $1,8 \cdot 10^8$  м/с. (0,1 м).

**2-17.** Між точковими зарядами  $+q$  та  $+9q$  відстань становить 8 см. На якій відстані від першого заряду напруженість електричного поля дорівнює нулю? ( $2 \cdot 10^{-2}$  м).

**2-18.** Заряди  $+18$  нКл та  $-18$  нКл розміщено у двох вершинах рівностороннього трикутника зі стороною 2 см. Визначити напруженість електричного поля в третій вершині трикутник. (405 кВ / м).

**2-19.** Кулька масою 0,4 г, підвішена на нитці в горизонтальному однорідному електричному полі, напруженість якого  $1 \cdot 10^5$  В/м, відхиляється на кут  $7^\circ$ . Визначити заряд кульки. (4,9 нКл).

**2-20.** Електрон влітає в однорідне електричне поле вздовж силової лінії. Шлях, який він долає до повної зупинки, дорівнює  $8,1 \cdot 10^{-4}$  м. Напруженість електричного поля 90 В / м. Визначити початкову швидкість електрона. ( $1,6 \cdot 10^5$  м/с)

*Е-3.1. Теоретичні відомості*

Нехай в електростатичне поле внесено заряд  $+q_0$ . Вочевидь, це поле діятиме на зазначений заряд певною силою. Визначимо роботу, виконану електростатичним полем з переміщення заряду  $+q$  із точки 1 поля в точку 2 на шляху  $s$  (рис. Е-3.1).

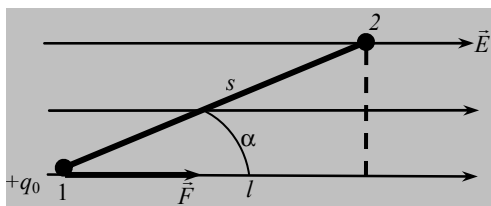


Рис. Е-3.1

Відомо, що робота сили визначається за формулою

$$A = Fs \cos \alpha.$$

Напруженість електростатичного поля

$$E = \frac{F}{q_0}.$$

Сила, що діє з боку поля на заряд, дорівнюватиме

$$F = q_0 E.$$

Тоді робота визначатиметься так:

$$A = q_0 E s \cos \alpha.$$

Величина  $s \cos \alpha = l$  — це переміщення заряду вздовж силової лінії. Тоді формула для визначення роботи набуває вигляду

$$A = q_0 E l.$$



Можна довести, що робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду між двома точками поля не залежить від форми шляху, а визначається тільки початковим і кінцевим положенням заряду, причому робота по замкнутому шляху дорівнює нулю. Ми знаємо з курсу механіки, що такі властивості має потенціальне поле, в якому діють консервативні сили.

**Отже, електростатичне поле — потенціальне.  
Електростатичні сили — консервативні.**

І знову нам відомо, що в потенціальних полях робота виконується за рахунок зменшення потенціальної енергії поля:

$$A_{1,2} = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1).$$

або

$$A_{1,2} = -\Delta W.$$

Знак « $\leftarrow$ » означає, що коли  $A_{1,2} > 0$ , то  $\Delta W < 0$ , тобто сили поля виконують роботу і потенціальна енергія зменшується. Якщо  $A_{1,2} < 0$ , то  $\Delta W > 0$ , тобто робота виконується проти сил поля і потенціальна енергія збільшується.

### Силова характеристика електростатичного поля

**Потенціалом** електростатичного поля в даній точці поля називається скалярна величина, яка дорівнює відношенню потенціальної енергії заряду, внесеного в цю точку поля, до величини цього заряду:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}.$$

Домовилися потенціальну енергію заряду, який перебуває в нескінченності, відносно заряду, який створює електростатичне поле, вважати такою, що дорівнює нулю. Тоді потенціалу в даній точці поля можна дати ще й таке визначення: це робота, виконана силами поля при переміщенні одиничного позитивного заряду із даної точки поля в нескінченність, тобто

$$\varphi = \frac{A}{q_0}.$$

Одиниця потенціалу —  $[\varphi] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = \text{В}$ .

Потенціал електростатичного поля поодинокого заряду визначається за формулою

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r},$$

де  $q$  — це заряд, який створює електростатичне поле;  $r$  — відстань від заряду, який створює поле, до точки, поля де визначається потенціал.

Якщо поле створено кількома точковими зарядами, то потенціал поля в даній точці дорівнюватиме сумі потенціалів, створених в цій точці кожним зарядом окремо. Тобто і тут працює правило суперпозиції полів:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Тепер роботу з переміщення заряду з однієї точки поля в другу можна визначити через потенціал так:

$$A_{1,2} = q_0\varphi_1 - q_0\varphi_2 = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Позначивши  $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)$ , визначимо роботу так:

$$A_{1,2} = q_0\Delta\varphi.$$

Величина

$$\Delta\varphi = \frac{A_{1,2}}{q_0}$$

називається **різницею потенціалів** точок поля і дорівнює роботі з переміщення одиничного додатного заряду з однієї точки поля в іншу.

**Існують дві основні характеристики електростатичного поля: силова і енергетична. Це вектор напруженості поля і потенціал.**

Між ними неодмінно має існувати зв'язок. Визначимо його. З одного боку, роботу сил поля з переміщення заряду з однієї точки поля в іншу можна визначити за формулою

$$A_{1,2} = q_0El.$$

А з другого боку, ця сама робота

$$A_{1,2} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Тоді прирівнявши праві частини цих виразів, дістанемо:

$$E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{l} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{l},$$

або

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{l}.$$

Це рівняння має такий фізичний зміст: напруженість однорідного поля за модулем дорівнює зміні потенціалу на одиницю довжини силової лінії.

**Знак «-» у цій формулі означає, що вектор напруженості електростатичного поля напрямлений завжди в бік зменшення потенціалу.**

### *Е-3.2. Завдання для поточного тестування*

1. Формула, за якою визначається робота електростатичного поля, така:

1)  $\frac{F}{q_0}$ ; 2)  $q_0 El$ ; 3)  $q_0 Es \cos \alpha$ ; 4)  $q_0 \Delta\Phi$ .

2. Формула, яка визначає потенціал електростатичного поля, така:

1)  $\frac{F}{q_0}$ ; 2)  $q_0 El$ ; 3)  $\frac{W}{q_0}$ ; 4)  $q_0 \Delta\Phi$ ; 5)  $-\frac{\Delta\Phi}{l}$ .

3. Формула, яка визначає різницю потенціалів в електростатичному полі, така:

1)  $\frac{F}{q_0}$ ; 2)  $\frac{A}{q_0}$ ; 3)  $\frac{W}{q_0}$ ; 4)  $q_0 \Delta\Phi$ ; 5)  $-\frac{\Delta\Phi}{l}$ .

4. Формула, яка подає зв'язок між силовою та енергетичною характеристиками електричного поля, така:

1)  $\frac{F}{q_0}$ ; 2)  $\frac{A}{q_0}$ ; 3)  $\frac{W}{q_0}$ ; 4)  $q_0 \Delta\Phi$ ; 5)  $-\frac{\Delta\Phi}{l}$ .

5. Заряд  $4 \cdot 10^{-9}$  Кл переміщується в однорідному електричному полі напруженістю 600 В/см. Модуль вектора переміщення заряду

дорівнює 5 см і з напрямом поля утворює кут  $60^\circ$ . Робота з переміщення заряду дорівнює, мкДж:

1) 3; 2) 6; 3) 9; 4) 12; 5) правильної відповіді тут немає.

**6.** Електрон летить із точки *A* в точку *B*, різниця потенціалів між якими 100 В. Якщо в точці *A* його швидкість дорівнює нулю, то в точці *B* вона дорівнює,  $\cdot 10^6$  м/с:

1) 3; 2) 6; 3) 9; 4) 12; 5) правильної відповіді тут немає.

**7.** Металева куля радіусом 5 см заряджена до потенціалу 150 В. Напруженість поля в точці, віддаленій від поверхні кулі на 10 см, дорівнює, В/м:

1) 110; 2) 220; 3) 330; 4) 440; 5) правильної відповіді тут немає.

**8.** Електрон проходить в електричному полі різницю потенціалів 1 МВ. Він набуває додаткової кінетичної енергії,  $10^{-12}$  Дж:

1) 0,08; 2) 0,16; 3) 0,24; 4) 0,32; 5) правильної відповіді тут немає.

**9.** Відомо, що Земля утворює електричне поле, напруженість якого поблизу поверхні Землі становить 130 В/м. Радіус Землі 6400 км. Електричний потенціал поверхні Землі дорівнює ( $\cdot 10^8$  В):

1) 7,1; 2) 7,7; 3) 8,3; 4) 8,9; 5) правильної відповіді тут немає.

**10.** При переміщенні електричного заряду між точками з різницею потенціалів 6 В сили, що діють на заряд з боку електростатичного поля, виконали роботу 3 Дж. Величина заряду така:

1) 0,5 Кл; 2) 2 Кл; 3) 18 Кл; 4) інша відповідь.

**11.** Потенціал точки електричного поля, віддаленої на 5 см від точкового заряду, дорівнює 40 В. Визначити абсолютну величину цього заряду.

1) 2 нКл; 2) 1 нКл; 3) 0,5 нКл; 4) 0,2 нКл; 5) інша відповідь.

**12.** При переміщенні заряду 2 мкКл із точки 1 в точку 2 поля в напрямі, протилежному напрямку вектора напруженості електричного поля, виконано роботу 0,8 мДж. Визначити різницю потенціалів між цими точками.

1) 100 В; 2) 200 В; 3) 300 В; 4) 400 В; 5) інша відповідь.

13. Заряджена частинка починає рухатись зі стану спокою і проходить різницю потенціалів 1 кВ. Вона набуває енергії 8000 еВ. Визначити заряд частинки і подати його через заряд електрона.

1) 4  $e$ ; 2) 6  $e$ ; 3) 8  $e$ ; 4) 5,4  $e$ ; 5) інша відповідь.

14. Два заряди +10 нКл та –10 нКл перебувають на деякій відстані один від одного. Визначити потенціал точки електричного поля, розташованої на відстані 10 см від кожного із зарядів.

1) 100 В; 2) 200 В; 3) 0 В; 4) –200 В; 5) інша відповідь.

15. На скільки зміниться кінетична енергія електрона, якщо він подолає прискорювальну різницю потенціалів  $10^6$  В?

1) 1 МеВ; 2) 2 МеВ; 3) 3 МеВ; 4) 4 МеВ; 5) інша відповідь.

### ***Е-3.3. Висновки з теми***

1. Потенціалом електростатичного поля в даній точці поля називається скалярна величина, яка дорівнює відношенню потенціальної енергії заряду, внесеного в цю точку поля, до величини цього заряду.

2. Якщо поле створено кількома точковими зарядами, то потенціал цього поля в даній точці дорівнюватиме сумі потенціалів, створених у цій точці кожним зарядом окремо.

3. Потенціал електричного поля в напрямі силових ліній зменшується.

4. Якщо з'єднати провідником дві металеві кулі, потенціали яких різні, то заряди перерозподіляться між ними так, щоб потенціали куль стали однаковими.

5. Робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду між двома точками поля не залежить від форми шляху, а визначається тільки початковим і кінцевим положенням заряду, а робота по замкненому шляху дорівнює нулю.

6. Електростатичне поле — потенціальне. Електростатичні сили — консервативні.

### ***Е-3.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** Електричне поле в повітрі утворено точковим зарядом  $q = 1,2 \cdot 10^{-7}$  Кл. Яку роботу виконує поле під час переміщення однойменного заряду  $1,5 \cdot 10^{-10}$  Кл з точки  $B$ , віддаленої від заряду  $q$  на відстань 0,5 м, у точку  $A$ , віддалену від заряду  $q$  на відстань 2 м?

**Дано:**

$$\begin{aligned}q &= 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}; \\q_1 &= 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}; \\r_B &= 0,5 \text{ м}; \\r_A &= 2 \text{ м}; \\ \epsilon &= 1\end{aligned}$$

$A$  — ?

**Розв'язання**

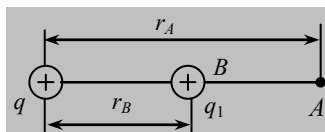


Рис. 1

Робота поля під час переміщення заряду  $q_1$  по будь-якому шляху з точки  $B$  у точку  $A$  визначається за формулою:

$$A = q_1 (\varphi_B - \varphi_A).$$

Підставивши формули для визначення потенціалу, дістанемо:

$$A = \frac{qq_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_B} - \frac{qq_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_A} = k \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) qq_1.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[A] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \text{Кл}^2 \cdot \frac{1}{\text{м}} \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}].$$

Виконуємо обчислення:

$$A = 9 \cdot 10^9 \cdot 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 1,5 \cdot 10^{-10} \left( \frac{1}{0,5} - \frac{1}{2} \right) = 2,43 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}.$$

**Відповідь.** Робота з переміщення заряду дорівнює  $0,243$  мкДж.

**Задача 2.** Електрон вилітає з точки електричного поля, потенціал якої  $300$  В, зі швидкістю  $0,6 \cdot 10^7$  м/с і рухається в напрямі силових ліній поля. Визначити потенціал точки поля, в якій швидкість електрона дорівнюватиме нулю.

**Дано:**

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= 300 \text{ В}; \\v_1 &= 0,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}; \\v_2 &= 0; \\e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \\m_e &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}\end{aligned}$$

$\varphi_2$  — ?

**Розв'язання**

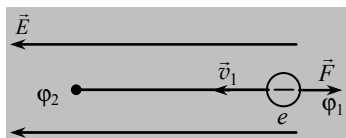


Рис. 2

Коли електрон рухається в напрямі силової лінії, електричне поле виконує роботу і гальмує його рух. Електрон рухатиметься доти, доки вистачить його кінетичної енергії. За законом збереження і перетворення енергії маємо:

$$A = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2},$$

або

$$q(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}.$$

Після перетворень дістанемо:

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \frac{m_e v_1^2}{2e}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\varphi] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{\text{Кл}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл}} \right] = [\text{В}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\varphi_2 = 300 - \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (0,6 \cdot 10^7)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 198 \text{ В}.$$

**Відповідь.** Потенціал поля дорівнюватиме 198 В.

**Задача 3.** Металева куля, радіус якої 10 см, заряджена до потенціалу 200 В. Визначити потенціал і напруженість поля в точці, віддаленій від поверхні кулі на 5 см (рис. 3).

**Дано:**

$\epsilon = 1;$   
 $R = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м};$   
 $r = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м};$   
 $\varphi = 200 \text{ В}$

$\varphi_A$  — ?  $E_A$  — ?  
 $\varphi_B$  — ?  $E_B$  — ?

**Розв'язання**

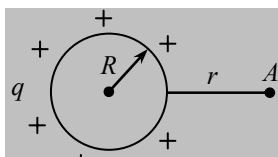


Рис. 3

Потенціал електричного поля, створеного зарядженою кулю в точці  $A$ , визначається за формулою:

$$\varphi_A = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon(R+r)}.$$

Напруженість поля в точці  $A$  дорівнюватиме

$$E_A = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon(R+r)^2},$$

де  $q$  — заряд металевої кулі.

Заряд металевої кулі визначимо так:

$$q = 4\pi\epsilon_0\epsilon R\varphi.$$

Тоді потенціал у точці  $A$  дорівнює

$$\varphi_A = \frac{\varphi R}{(R+r)}.$$

Напруженість у точці  $A$  визначається так:

$$E_A = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon(R+r)^2}.$$

Виконуємо обчислення:

$$\varphi_A = \frac{200 \cdot 0,1}{0,15} = 133,3 \text{ В};$$

$$E_A = \frac{200 \cdot 0,1}{(0,1+0,05)^2} = 888,9 = 889 \text{ В/м}.$$

**Відповідь.** Потенціал поля і напруженість в точці  $A$  дорівнюють відповідно 133,3 В та 889 В/м.

### ***E-3.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**3-1.** Два заряди, по 6 нКл кожний перебувають на відстані 100 см один від одного. Яку роботу потрібно виконати, щоб наблизити їх на відстань 50 см? ( $3,24 \cdot 10^{-7}$  Дж)

**3-2.** Поле утворено точковим зарядом  $q = 1,2 \cdot 10^{-7}$  Кл. Яку роботу виконає поле під час переміщення однойменного заряду  $1,5 \cdot 10^{-5}$  Кл із



точки  $B$ , яка віддалена від заряду  $q$  на відстань  $0,5$  м, у точку  $A$ , віддалену від заряду  $q$  на відстань  $2$  м? Середовище — повітря. ( $2,43 \cdot 10^{-5}$  Дж)

**3-3.** В однорідному електричному полі напруженістю  $6 \cdot 10^5$  В/м перемістили заряд  $70$  нКл на відстань  $8$  см під кутом  $60^\circ$  до вектора напруженості. Визначити роботу зовнішньої сили з переміщення заряду. ( $1,68 \cdot 10^{-3}$  Дж)

**3-4.** При переміщенні заряду  $2$  мкКл проти напрямку вектора напруженості електричного поля виконано роботу  $0,8$  мДж. Визначити різницю потенціалів між цими точками. ( $400$  В)

**3-4.** В однорідному електричному полі напруженістю  $1$  кВ/м перемістили заряд  $25$  нКл у напрямку силової лінії на  $2$  см. Визначити роботу поля, зміну потенціальної енергії заряду і різницю потенціалів між початковою й кінцевою точками переміщення. ( $-0,5$  мкДж;  $0,5$  мкДж;  $20$  В)

**3-5.** Електрон перемістився в прискорювальному електричному полі з точки з потенціалом  $200$  В у точку з потенціалом  $300$  В. Визначити кінетичну енергію електрона, зміну його потенціальної енергії і набуту швидкість. Початкова швидкість електрона дорівнює нулю. ( $1,6 \cdot 10^{-17}$  Дж;  $-1,6 \cdot 10^{-17}$  Дж;  $5,9 \cdot 10^6$  м/с)

**3-6.** Два заряди  $+10$  і  $-10$  нКл створюють електричне поле. Визначити потенціал точки поля, розташованої на відстані  $10$  см від першого заряду і на відстані  $20$  см від другого. ( $0,45$  кВ)

### ***E-3.6. Задачі для самостійного розв'язування***

**3-7.** При переміщенні заряду  $10^{-7}$  Кл в однорідному електричному полі вздовж силової лінії виконується робота  $5 \cdot 10^{-6}$  Дж. Визначити потенціал поля наприкінці шляху і напруженість електричного поля, якщо потенціальна енергія заряду на початку шляху дорівнювала  $10^{-5}$  Дж, а відстань, пройдена зарядом,  $5$  см. ( $50$  В;  $10^3$  В/м)

**3-8.** Електрон, рухаючись в однорідному електричному полі, вилітає з точки, потенціал якої  $6000$  В, зі швидкістю  $3 \cdot 10^7$  м/с і рухається вздовж силової лінії. Визначити потенціал точки, в якій швидкість електрона зменшиться вдвічі. ( $4080$  В)

**3-9.** Два заряди, по  $50$  нКл кожний, перебувають на відстані  $100$  см один від одного. Яку роботу потрібно виконати, щоб наблизити їх на відстань  $50$  см? ( $2,25$  нДж)

**3-10.** Електричне поле в гліцерині утворено точковим зарядом  $9$  нКл. Яка різниця потенціалів двох точок, віддалених від заряду на

відстані 3 і 12 см? Яку роботу виконує поле під час переміщення між цими точками заряду 5 нКл? (52 В;  $2,6 \cdot 10^{-7}$  Дж)

**3-11.** Визначити потенціали й напруженість електричного поля в точках  $B$  і  $C$ , які розташовані від заряду в  $1,7 \cdot 10^{-7}$  Кл на відстанях 5 і 20 см. Визначити роботу електричних сил з переміщення заряду  $10^{-9}$  Кл з точки  $B$  в точку  $C$ . ( $E_B = 6 \cdot 10^5$  В/м;  $E_C = 3,75 \cdot 10^4$  В/м;  $\varphi_B = 3 \cdot 10^4$  В;  $\varphi_C = 7,5 \cdot 10^3$  В;  $2,25 \cdot 10^{-5}$  Дж)

**3-12.** Визначити потенціальну енергію системи двох точкових зарядів 400 і 20 нКл, які перебувають на відстані 5 см один від одного. (1,44 мДж)

**3-13.** Заряд 0,1 Кл віддалений від заряду в 0,2 Кл на відстань 20 см. Чому дорівнює потенціал поля посередині відрізка, який сполучає ці заряди? ( $2,7 \cdot 10^4$  В)

**3-14.** Частинка пилу масою  $10^{-5}$  г, яка несе на собі заряд  $10^{-8}$  Кл, потрапляє в електричне поле і рухається в напрямі силових ліній. Після проходження різниці потенціалів 150 В частинка мала швидкість 20 м/с. Якою була швидкість частинки до того, як вона потрапила в поле? (10 м/с)

**3-15.** Вісім однакових за абсолютною величиною та однаково заряджених крапель олії зливаються в одну. У скільки разів потенціал краплі, що утворилася, буде більшим від потенціалу однієї краплі? (У чотири рази)

**3-16.** Порошинка масою  $10^{-5}$  кг, яка несе заряд  $10^{-8}$  Кл, потрапляє в електричне поле і рухається в напрямі силових ліній. Подолавши різницю потенціалів 150 В, вона набула швидкості 20 м/с. Визначити швидкість порошинки в момент потрапляння в електричне поле. (10 м/с)

**3-17.** Заряд  $+4 \cdot 10^{-8}$  Кл створює у просторі електричне поле. У полі цього заряду з однієї точки поля в іншу з потенціалом 1500 В переміщується заряд  $-6 \cdot 10^{-8}$  Кл. Визначити потенціал першої точки поля, якщо на переміщення заряду витрачено  $6 \cdot 10^{-5}$  Дж енергії. (2500 В)

**3-18.** Пучок електронів, який прискорюється електричним полем із різницею потенціалів 5 кВ, рухається між вертикальними пластинами довжиною 5 см, напруженість поля між якими дорівнює 40 кВ/м. Визначити вертикальне зміщення пучка на виході з пластин. (0,005 м)

**3-19.** Напруга між двома протилежно зарядженими пластинами, розташованими у вакуумі на відстані 5 см, дорівнює 1 кВ. Між пластин

тинами у стані рівноваги перебуває заряджена частинка масою  $10^{-6}$  кг. Визначити заряд частинки (...).

**3-20.** Скільки електронів потрібно передати у вакуумі металевій кульці радіусом 7,2 см, щоб її потенціал дорівнював 6000 В? ( $3 \cdot 10^{11}$ )

**3-21.** Електрон переміщується в однорідному електричному полі вздовж силових ліній. Він вилітає з точки, потенціал якої 600 В, зі швидкістю  $3 \cdot 10^6$  м/с. Визначити потенціал точки, в якій швидкість електрона буде дорівнювати нулю. (574,4 В)

**3-22.** Заряджена до потенціалу 1000 В куля радіуса 20 см з'єднується провідником із незарядженою кулею. Після цього з'єднання потенціал куль дорівнює 300 В. Який радіус другої кулі? (46,6 см)

**3-23.** Велика крапля ртуті утворилася при зливанні 27 однакових маленьких краплин ртуті, що мали потенціали 1 В кожна. Визначити потенціал великої краплі. (9 В)

**3-24.** Два заряди, по 1 мкКл кожний, містяться на відстані 50 см один від одного. Яку роботу потрібно виконати, щоб зблизити їх до 5 см? (0,16 Дж)

**E-4.1. Теоретичні відомості**

До **діелектриків** відносять речовини, в яких немає вільних електричних зарядів. Такі речовини не проводять електричний струм. Діелектрики бувають:

- полярні;
- неполярні.

Молекули **полярних** діелектриків являють собою диполі. У молекулах таких діелектриків позитивний і негативний заряди розподілені несиметрично. До таких діелектриків належать вода ( $H_2O$ ), соляна кислота ( $HCl$ ), аміак ( $NH_3$ ) тощо. Помістимо полярний діелектрик у зовнішнє електричне поле напруженістю  $\vec{E}_0$ . Тоді диполі, які перед цим були зорієнтованими хаотично (рис. E-4.1, а), орієнтуюватимуться вздовж силових ліній поля: позитивним зарядом у напрямі силової лінії (рис. E-4.1, б). У такий спосіб диполі взаємно підсилюють своє електричне поле, і діелектрик створює власне поле напруженістю  $\vec{E}_{вл}$ , напрямлене протилежно зовнішньому електричному полю (рис. E-4.1, б). Отже, напруженість результуючого електричного поля набирає вигляду:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{вл}.$$

Модуль вектора напруженості результуючого поля такий:

$$E = E_0 - E_{вл}.$$

Тобто зовнішнє електричне поле послаблюється.

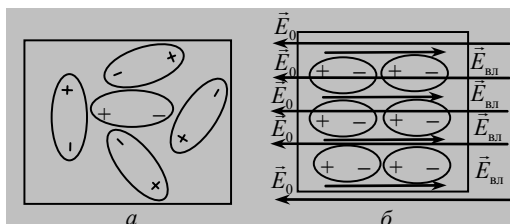


Рис. E-4.1

Якщо орієнтації диполів у діелектрику, який перебуває в зовнішньому електричному полі, називається **поляризацією діелектрика**, а сам діелектрик **поляризованим**.

У неполярних діелектриках центри позитивного і негативного зарядів збігаються (рис. Е-4.2, а). До таких діелектриків належать водень ( $H_2$ ), азот ( $N_2$ ), кисень ( $O_2$ ) тощо. Коли неполярний діелектрик потрапляє в зовнішнє електричне поле, відбувається зміщення зарядів у молекулах і молекули деформуються (рис. Е-4.2, б). Далі молекули поведуться так само, як і молекули полярного діелектрика.

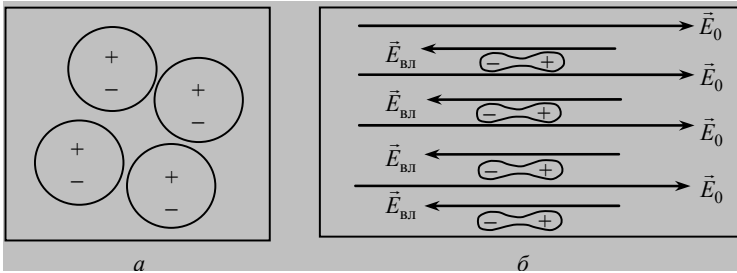


Рис. Е-4.2

Тепер зрозуміло, чому сили взаємодії між двома зарядами, зануреними в діелектрик, зменшуються. Завдяки поляризації діелектрика навколо кожного заряду з'являються так звані **поляризаційні заряди** (рис. Е-4.3), тому сили взаємодії зменшуються.

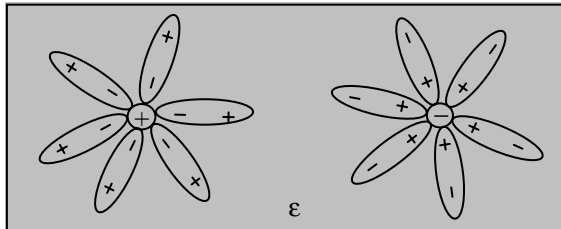


Рис. Е-4.3

Таку властивість діелектрика характеризує **діелектрична проникність**, яка дорівнює

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}$$

де  $F_0$  — це сила взаємодії між зарядами у вакуумі;  $F$  — сила взаємодії між тими самими зарядами в діелектрику.

Існує ще один вид діелектриків, які називаються *сегнетоелектриками*. Вони мають дуже велике значення діелектричної проникності. Наприклад, діелектрична проникність сегнетової солі дорівнює 10 000.

Порівняймо: серед «звичайних» діелектриків найбільше значення діелектричної проникності має вода  $\epsilon = 81$ .

*Провідниками* називають такі тіла, які мають велику кількість вільних зарядів, здатних переміщуватися всередині тіла. Типові представники провідників — **метали**, в яких носіями вільних зарядів є *електрони* (рис. Е-4.4).

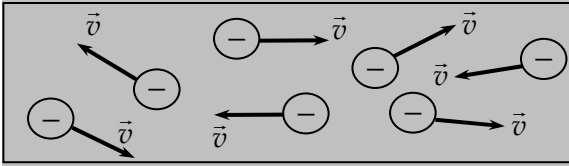


Рис. Е-4.4

Якщо провідник помістити в зовнішнє електричне поле, хаотичний рух вільних електронів стає впорядкованим. Електрони рухаються (рис. Е-4.5) в напрямі, протилежному напрямку вектора напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля.

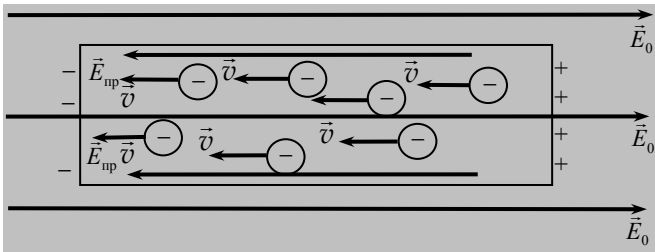


Рис. Е-4.5

У такий спосіб *на поверхні провідника* нагромаджуються надлишкові заряди. Це явище називається *електризацією* провідника. Усередині провідника виникає власне електричне поле, вектор напруженості  $\vec{E}_{np}$  якого напрямлений проти зовнішнього поля. Вектор напруженості результуючого електричного поля в провіднику визначається так:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{np}.$$

Модуль вектора напруженості результуючого поля такий:

$$E = E_0 - E_{\text{пр}}.$$

Проте рух електронів у провіднику відбуватиметься доти, доки напруженість результуючого поля в провіднику не дорівнюватиме нулю:

$$E = 0$$

**Тому електростатичне поле в провіднику завжди відсутнє.**

*На цій властивості ґрунтується спосіб захисту провідників від впливу зовнішнього електричного поля. Провідник уміщують у металеву оболонку, і тоді на її поверхні збирається надлишковий заряд, причому електричне поле не діє на провідник, що перебуває всередині. Такий спосіб називається **електростатичним захистом**.*

### Ємність провідника

**Ємність провідника** — це фізична величина, що дорівнює заряду, якого потрібно надати провіднику, щоб його потенціал змінився на одиницю:

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

**Ємність провідника не залежить від маси та властивостей речовини провідника, а залежить від його розмірів і діелектричної проникності середовища.**

Одиниця ємності в СІ — фарада (Ф).

Визначимо ємність сферичного провідника. Потенціал сфери визначається за формулою

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r},$$

де  $r$  — радіус провідника.

Підставивши вираз для потенціалу у формулу для визначення ємності, після перетворень дістанемо:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r.$$

Прилади, використовувані для нагромадження електричних зарядів, електроємність яких не залежить від зовнішніх умов, називаються **конденсаторами**. Конденсатор складається з двох провідників, між якими розміщено діелектрик. Ці провідники називають **обкладками конденсатора**. На обкладках конденсатора нагромаджуються однакові за модулем, але протилежні за знаком заряди, коли його підімкнено до зовнішнього джерела живлення. Оскільки відстань між обкладками конденсатора дуже мала, усе електричне поле зосереджено між ними і зовнішні тіла не впливають на його електроємність.

**Між обкладками конденсатора існує однорідне електричне поле.**

Процес нагромадження заряду на обкладках конденсатора називається його **зарядженням**.

Якщо конденсатор складається з двох плоских паралельних пластин, він називається **плоским**. Конденсатор, форма обкладок якого сферична, називається **сферичним**.

**Електроємністю, або ємністю, конденсатора** називають величину, яка дорівнює відношенню заряду конденсатора до різниці потенціалів між його обкладками:

$$C = \frac{q}{\Phi_1 - \Phi_2},$$

або

$$C = \frac{q}{\Delta\Phi}.$$

Ємність плоского конденсатора визначається так:

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

де  $S$  — площа обкладок конденсатора;  $d$  — відстань між ними.

**Ємність плоского конденсатора прямо пропорційна до площі обкладок та діелектричної проникності середовища і обернено пропорційна до відстані між обкладками.**

Ємність сферичного конденсатора визначається так:



$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

де  $r_1$  і  $r_2$  — радіус відповідно внутрішньої і зовнішньої обкладки.

Для практичних цілей конденсатори з'єднують у батареї. Послідовне з'єднання двох конденсаторів ємністю  $C_1$  і  $C_2$  подано на рис. Е-4.6. Визначимо ємність  $C$  такої батареї:

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2},$$

де  $\phi_1$  і  $\phi_2$  — потенціали крайніх обкладок.

Ємність першого і другого конденсаторів визначається так:

$$C_1 = \frac{q}{\phi_1 - \phi}; \quad C_2 = \frac{q}{\phi - \phi_2},$$

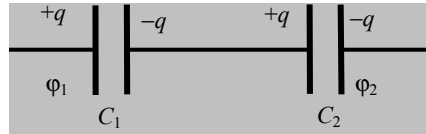


Рис. Е-4.6

де  $\phi$  — потенціал обкладок, з'єднаних між собою.

Визначимо різницю потенціалів  $\phi_1 - \phi_2$  і підставимо у формулу ємності. Після перетворень маємо:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Для будь-якої кількості конденсаторів цей вираз має вигляд:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Паралельне з'єднання двох конденсаторів ємністю  $C_1$  і  $C_2$  ілюструє рис. Е-4.7. Визначимо ємність  $C$  такої батареї. Різниця потенціалів  $\Delta\phi$  однакова для обох конденсаторів, а заряд батареї дорівнює сумі зарядів на кожному конденсаторі. Тоді ємність батареї визначається так:

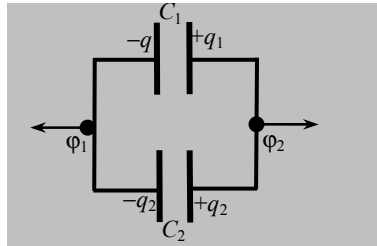


Рис. Е-4.7

$$C = \frac{q_1 + q_2}{\Delta\phi} = \frac{q_1}{\Delta\phi} + \frac{q_2}{\Delta\phi},$$

тобто

$$C = C_1 + C_2.$$

Для будь-якої кількості конденсаторів цей вираз має вигляд:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Енергія електричного поля конденсатора визначається за формулою:

$$W = \frac{qU}{2},$$

де  $U = \Delta\phi$  — різниця потенціалів або напруга на обкладках конденсатора.

Урахувавши зв'язок між  $C$ ,  $q$  і  $\Delta\phi$ , цю формулу можна записати ще й так:

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

#### ***Е-4.2. Завдання для поточного тестування***

**1.** Діелектрики характеризуються тим, що:

- 1) мають вільні заряди;
- 2) не проводять електричного струму;
- 3) не мають вільних зарядів;
- 4) не проводять електричного струму;
- 5) складаються з диполів.

**2.** Провідники характеризуються тим, що:

- 1) мають вільні заряди;
- 2) не проводять електричного струму;
- 3) не мають вільних зарядів;
- 4) проводять електричний струм;
- 5) складаються з диполів.

**3.** Ємність провідника залежить:

- 1) від заряду, наданого провіднику;
- 2) маси провідника;
- 3) розмірів;
- 4) діелектричної проникності середовища;
- 5) потенціалу провідника.

**4.** Формула, яка подає ємність сферичного провідника, така:

- 1)  $\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$ ;
- 2)  $4\pi\epsilon_0\epsilon r$ ;
- 3)  $\frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$ ;
- 4)  $\frac{q}{\Delta\phi}$ .

5. Формула, яка подає ємність конденсатора, така:

1)  $\frac{W}{q_0}$ ; 2)  $\frac{q}{\Phi}$ ; 3)  $\frac{q}{\Delta\Phi}$ ; 4)  $q_0\Delta\Phi$ ; 5)  $-\frac{\Delta\Phi}{l}$ .

6. Формула, яка подає ємність плоского конденсатора, така:

1)  $\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$ ; 2)  $4\pi\epsilon_0\epsilon r$ ; 3)  $\frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$ ; 4)  $\frac{q}{\Delta\Phi}$ .

7. Формула для визначення ємності батареї конденсаторів, з'єднаних паралельно, така:

1)  $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n C_i$ ; 2)  $C = \sum_{i=1}^n C_i$ ; 3)  $C = \frac{q}{\Phi_1 - \Phi_2}$ .

8. Формула для визначення ємності батареї конденсаторів, з'єднаних послідовно, така:

1)  $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n C_i$ ; 2)  $C = \sum_{i=1}^n C_i$ ; 3)  $C = \frac{q}{\Phi_1 - \Phi_2}$ .

9. Конденсатори ємністю  $10^4$  і  $1,5 \cdot 10^3$  пФ з'єднані паралельно. Якщо заряд першого конденсатора дорівнює 2 мкКл, то заряд другого конденсатора такий (мкКл):

1) 0,1; 2) 0,3; 3) 0,6; 4) 0,9; 5) правильної відповіді тут немає.

10. Три плоскі повітряні конденсатори з'єднано паралельно. Розміри конденсаторів однакові, площа пластини  $314 \text{ см}^2$ , відстань між пластинами 1 мм. Загальна ємність такої системи дорівнює, нФ:

1) 0,5; 2) 0,8; 3) 1,1; 4) 1,4; 5) правильної відповіді тут немає.

11. Два паралельно з'єднаних конденсатори з ємностями 2 і 1 мкФ зарядили до різниці потенціалів 20 В. Заряд, який надали цим конденсаторам, дорівнює, мкКл:

1) 20; 2) 40; 3) 60; 4) 80; 5) правильної відповіді тут немає.

12. Конденсатор заряджено до різниці потенціалів 600 В і відімкнено від джерела струму. Якщо відстань між пластинами конденсатора зменшити вдвічі, то різниця потенціалів дорівнюватиме, В:

1) 300; 2) 900; 3) 1500; 4) 2100; 5) правильної відповіді тут немає.

**13.** Площа пластини плоского повітряного конденсатора  $60 \text{ см}^2$ , заряд конденсатора  $1 \text{ нКл}$ , різниця потенціалів між його пластинами  $90 \text{ В}$ . Відстань між пластинами конденсатора дорівнює, мм:

1) 2,4; 2) 4,8; 3) 7,2; 4) 9,6; 5) правильної відповіді тут немає.

**14.** Напруженість електричного поля між пластинами плоского конденсатора у вакуумі дорівнює  $40 \text{ В/м}$ , відстань між пластинами  $2 \text{ см}$ . Напряга між пластинами конденсатора дорівнює:

1)  $2000 \text{ В}$ ; 2)  $80 \text{ В}$ ; 3)  $20 \text{ В}$ ; 4)  $0,8 \text{ В}$ ; 5)  $0,05 \text{ В}$ .

**15.** Пластини конденсатора несуть електричні заряди  $+4 \text{ і } -4 \text{ Кл}$ . Визначити напрягу між пластинами конденсатора, якщо його електроємність  $2 \text{ Ф}$ .

1) 0; 2)  $0,25 \text{ В}$ ; 3)  $0,5 \text{ В}$ ; 4)  $2 \text{ В}$ ; 5)  $4 \text{ В}$ .

**16.** Як зміниться електроємність плоского повітряного конденсатора, коли збільшити відстань між його пластинами у 2 рази та ввести між пластинами діелектрик, діелектрична проникність якого дорівнює 4.

1) збільшиться у 8 разів; 2) збільшиться у 2 рази; 3) не зміниться; 4) зменшиться у 2 рази; 5) зменшиться у 8 разів.

**17.** Як зміниться енергія електричного поля плоского повітряного конденсатора, якщо відстань між його пластинами збільшити у 2 рази? Конденсатор відімкнено від джерела струму.

1) збільшиться у 4 рази; 2) збільшиться у 2 рази; 3) не зміниться; 4) зменшиться у 2 рази; 5) зменшиться у 4 рази.

**18.** Визначити енергію електричного поля конденсатора, якщо його ємність дорівнює  $20 \text{ мкФ}$ , а напряга між пластинами становить  $220 \text{ В}$ .

1)  $2 \text{ Дж}$ ; 2)  $1 \text{ Дж}$ ; 3)  $0,484 \text{ Дж}$ ; 4)  $0,325 \text{ Дж}$ ; 5) інша відповідь.

**19.** Між пластинами плоского конденсатора розміщено слюду, діелектрична проникність якої дорівнює 6. Площа пластин конденсатора становить  $15 \text{ см}^2$ , відстань між ними  $0,02 \text{ см}$ . Ємність конденсатора така:

1)  $200 \text{ пФ}$ ; 2)  $300 \text{ пФ}$ ; 3)  $400 \text{ пФ}$ ; 4)  $500 \text{ пФ}$ ; 5) інша відповідь.

**20.** Як зміниться електроємність плоского повітряного конденсатора, коли зменшити відстань між його пластинами у 2 рази та ввести між пластинами діелектрика, діелектричну проникність якого дорівнює 4?

- 1) збільшиться у 8 разів; 2) збільшиться у 2 рази; 3) не зміниться; 4) зменшиться у 2 рази; 5) зменшиться у 8 разів.

**21.** Як зміниться енергія електричного поля плоского повітряного конденсатора, коли відстань між його пластинами зменшити у 2 рази? Конденсатор відімкнутий від джерела струму.

- 1) збільшиться у 4 рази; 2) збільшиться у 2 рази; 3) не зміниться; 4) зменшиться у 2 рази; 5) зменшиться в 4 рази.

**22.** Визначити енергію електричного поля конденсатора, якщо заряд конденсатора становить  $3,2 \cdot 10^{-3}$  Кл, а напруга між пластинами дорівнює 500 В.

- 1) 2 Дж; 2) 1 Дж; 3) 0,4 Дж; 4) 0,8 Дж; 5) інша відповідь.

### ***E-4.3. Висновки з теми***

1. Ємність провідника — це фізична величина, яка дорівнює заряду, наданого провіднику, щоб його потенціал змінився на одиницю.

2. Ємність конденсатора залежить від його геометричних розмірів та діелектричних властивостей середовища, що його оточує.

3. Між обкладками конденсатора утворюється однорідне електричне поле.

4. Послідовним називається з'єднання конденсаторів, коли негативно заряджену обкладку першого конденсатора з'єднано з зарядженою позитивно обкладкою другого конденсатора.

5. Паралельним називають таке з'єднання конденсаторів, коли з'єднують однойменно заряджені обкладки конденсатора.

6. Якщо вилучити діелектрик із конденсатора, то його енергія збільшиться в  $\epsilon$  раз.

7. Якщо ввести діелектрик між пластинами конденсатора, його енергія зменшиться в  $\epsilon$  раз.

8. Якщо конденсатор відімкнути від джерела живлення, то його заряд залишиться сталим. Під час розсування його пластин буде змінюватися ємність конденсатора.

9. Якщо конденсатор не відімкнено від джерела живлення, то залишається сталою різниця потенціалів між його обкладками. Під час розсування його пластин буде змінюватися як ємність, так і заряд пластин конденсатора.

### ***E-4.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** Визначити заряд на обкладках конденсатора, зарядженого до 100 В, ємність якого дорівнює 10 мкФ.

<i>Дано:</i>	<i>Розв'язання</i>
$C = 10 \text{ мкФ} = 10^{-5} \text{ Ф};$ $U = 100 \text{ В}$	Ємність конденсатора визначається за формулою
$q = ?$	$C = \frac{q}{\Phi_1 - \Phi_2} = \frac{q}{U},$

звідки заряд кожної з обкладок дорівнює

$$q = CU.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[q] = [\Phi \cdot \text{В}] = \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \text{В} \right] = [\text{Кл}].$$

Виконуємо обчислення:

$$q = 10^{-5} \cdot 100 = 10^{-3} \text{ Кл}.$$

**Відповідь.** Заряд на обкладках конденсатора дорівнює 1 мКл.

**Задача 2.** Плоский конденсатор, площа пластин якого дорівнює  $12 \text{ см}^2$ , а відстань між ними 5 см, має як діелектрик скляну пластину. Конденсатор зарядили до напруги 100 В, після чого від'єднали від джерела напруги. Визначити механічну роботу, яку потрібно виконати, щоб вийняти скляну пластину з конденсатора. Тертям і масою пластини знехтувати.

<i>Дано:</i>	<i>Розв'язання</i>
$S = 12 \text{ см}^2 = 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$ $d = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м};$ $U = 100 \text{ В};$ $\epsilon = 7;$ $\epsilon_2 = 1$	Для того, щоб вилучити скляну пластину із конденсатора, потрібно затратити роботу, яка виконується проти сил електричного поля і дорівнює зміні енергії конденсатора:
$A = ?$	$A = W_2 - W_1.$

Коли конденсатор відімкнули від джерела напруги, заряд на його обкладках залишився сталим. При вилученні діелектрика змінюється ємність конденсатора. Тоді енергію конденсатора визначимо за формулою

$$W = \frac{q^2}{2C}.$$

Формула для визначення роботи набирає вигляду:

$$A = \frac{q^2}{2} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) = \frac{q^2 (C_1 - C_2)}{2C_1 C_2}.$$

Заряд на обкладках конденсатора визначається так:

$$q = C \cdot U = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \cdot U.$$

Підставивши вираз для заряду і виконавши перетворення, дістанемо:

$$A = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2 \epsilon_0 S (\epsilon - \epsilon_2) d}{d \cdot d 2 \epsilon_2 \epsilon_0 S} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2 (\epsilon - \epsilon_2)}{2 d \epsilon_2},$$

або

$$A = \frac{\epsilon_0 S U^2 \epsilon (\epsilon - 1)}{2 d}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[A] = \left[ \frac{\text{Ф/м} \cdot \text{м}^2 \text{В}^2}{\text{м}} \right] = [\text{Ф} \cdot \text{В}^2] = \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \cdot \text{В}^2 \right] = [\text{Дж}].$$

Виконуємо обчислення:

$$A = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 42 \cdot 12 \cdot 10^{-4} \cdot 100^2}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 446,04 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

**Відповідь.** Робота з вилучення діелектрика з конденсатора дорівнює  $446,04 \cdot 10^{-10}$  Дж.

**Задача 3.** Конденсатор ємністю  $C_1$  зарядили до напруги 500 В і, від'єднавши від джерела, з'єднали паралельно з незарядженим конденсатором ємністю 4 мкФ. При цьому вольтметр показав 100 В (рис. 1). Визначити ємність  $C_1$ .

**Дано:**

$$U_1 = 500 \text{ В};$$

$$U_2 = 0;$$

$$C_2 = 4 \text{ мкФ} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$U = 100 \text{ В}$$

$$C_1 = ?$$

**Розв'язання**

Коли конденсатор відімкнули від джерела напруги, заряд на його обкладках залишився сталим. Визначимо його за формулою:

$$q = C_1 U_1.$$

Після з'єднання конденсаторів заряд перерозподіляється між ними. Для паралельного з'єднання заряд батареї конденсаторів дорівнює сумі зарядів на кожному конденсаторі:

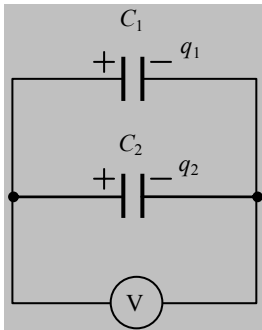


Рис. 1

або

$$q = q_1 + q_2,$$

звідки

$$C_1 U_1 = C_1 U + C_2 U,$$

$$C_1 = \frac{C_2 U}{U_1 - U}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[C_1] = \left[ \frac{\Phi \cdot B^2}{B} \right] = [\Phi].$$

Виконуємо обчислення:

$$C_1 = \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{500 - 100} = 10^{-6} \text{ Ф}.$$

**Відповідь.** Ємність конденсатора дорівнює 1 мкФ.

**Задача 4.** Електрон влітає в плоский конденсатор паралельно його пластинам із швидкістю  $4 \cdot 10^6$  м/с. Визначити швидкість електрона, коли він вилітає з конденсатора, довжина якого 10 см. Різниця потенціалів між обкладками становить 200 В, відстань між ними 4 мм.

**Дано:**

$$\begin{aligned} v_0 &= 4 \cdot 10^6 \text{ м/с}; \\ l &= 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}; \\ d &= 4 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ \Delta\phi &= 200 \text{ В} \end{aligned}$$

$v = ?$

**Розв'язання**

Оскільки з боку електричного поля конденсатора вздовж осі  $y$  на електрон діє сила, то траєкторія його руху являє собою параболу (рис. 2). Швидкість руху електрона можна розкласти на дві складові: уздовж осі  $x$  та вздовж осі  $y$ . Швидкість руху електрона, коли він вилітає із конденсатора, визначається за формулою.

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$



Оскільки вздовж осі  $x$  модуль сили з боку електричного поля дорівнює нулю, то швидкість  $v_x = v_0$ .

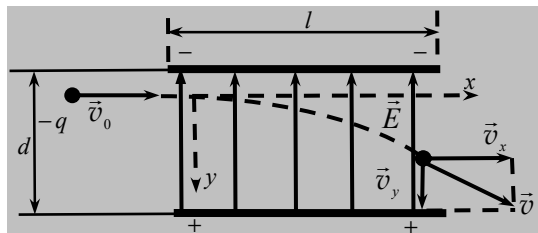


Рис. 2

Швидкість вздовж осі  $y$  визначатиметься так:

$$v_y = at.$$

Час руху електрона в середині конденсатора визначимо за формулою:

$$t = \frac{l}{v_0}.$$

Прискорення електрона визначимо за другим законом Ньютона:

$$a = \frac{F}{m},$$

де  $F = eE$  — сила, яка діє на електрон з боку електричного поля конденсатора.

Напруженість електричного поля визначимо так:

$$E = \frac{\Delta\phi}{d}.$$

Тоді швидкість вздовж осі  $y$  визначатиметься так:

$$v_y = \frac{e\Delta\phi l}{mdv_0}.$$

Після підставлень і перетворень швидкість електрона, коли він вилітає із конденсатора, визначимо за формулою

$$v = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{e\Delta\phi l}{mdv_0}\right)^2}.$$

Перевіримо одиниці величини:

$$[v] = \left[ \sqrt{\frac{\text{М}^2}{\text{с}^2} + \left( \frac{\text{КЛ} \cdot \text{В} \cdot \text{М} \cdot \text{с}}{\text{КГ} \cdot \text{М} \cdot \text{М}} \right)^2} \right] = \left[ \sqrt{\frac{\text{М}^2}{\text{с}^2} + \left( \frac{\text{КГ} \cdot \text{М} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{КГ}} \right)^2} \right] = \left[ \frac{\text{М}}{\text{с}} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$v = \sqrt{(4 \cdot 10^6)^2 + \left( \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 200 \cdot 0,1}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^6} \right)^2} = 4,56 \cdot 10^{12} \text{ м/с}.$$

**Відповідь.** Швидкість електрона дорівнює  $4,56 \cdot 10^{12}$  м/с.

**Задача 5.** Електрон, прискорений різницею потенціалів  $10^4$  В, влітає в горизонтальний плоский конденсатор паралельно до його пластин. Довжина пластин 10 см, відстань між ними 2 см, різниця потенціалів між пластинами 300 В. Визначити вертикальне зміщення електрона при виході його з конденсатора.

*Дано:*

$$\begin{aligned} U &= 10^4 \text{ В}; \\ l &= 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}; \\ d &= 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}; \\ U_1 &= 300 \text{ В}; \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \\ m_e &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\ \hline h &= ? \end{aligned}$$

*Розв'язання*

Набута електроном у прискорювальному електричному полі кінетична енергія дорівнює роботі електричних сил. За законом збереження і перетворення енергії маємо:

$$A = eU,$$

тобто

$$eU = \frac{m_e v^2}{2}.$$

Звідси визначимо швидкість, з якою електрон влітає в конденсатор:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}. \quad (1)$$

Оскільки з боку електричного поля конденсатора вздовж осі у на електрон діє сила, то траєкторія його руху являє собою параболу (рис. 3). Ця сила надає електрону прискорення, також направлено вздовж осі у:

$$a = \frac{F_e}{m},$$

де  $F_e = eE$ ,

або

$$a = \frac{eE}{m}.$$

Для однорідного поля конденсатора маємо:

$$E = \frac{U_1}{d} \Rightarrow a = \frac{eU_1}{m_e d}, \quad (2)$$

Проекція початкової швидкості  $\vec{v}$  на вісь  $y$  дорівнює нулю, тому вертикальне зміщення електрона визначається за формулою:

$$h = \frac{at^2}{2}, \quad (3)$$

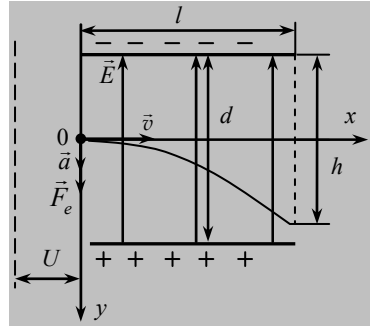


Рис. 3

де  $t$  — час руху електрона в конденсаторі.

Оскільки вздовж осі  $x$  модуль сили з боку електричного поля дорівнює нулю, то швидкість  $v_x = v$ .

Час руху електрона всередині конденсатора визначимо за формулою:

$$t = \frac{l}{v}. \quad (4)$$

Після підставлення у формулу (4) формули (1) та перетворень дістанемо:

$$t = \frac{l}{\sqrt{\frac{2eU}{m_e}}} = l \sqrt{\frac{m_e}{2eU}}. \quad (5)$$

Підставивши у формулу (3) формули (2) і (5) та виконавши перетворення, вертикальне зміщення електрона визначатиме так:

$$h = \frac{at^2}{2} = \frac{eU_1}{2m_e d} \cdot \frac{m_e l^2}{2eU},$$

або

$$h = \frac{U_1 l^2}{4d \cdot U}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[h] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{м}^2}{\text{м} \cdot \text{В}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$h = \frac{300 \cdot 0,01}{2 \cdot 0,02 \cdot 2 \cdot 10^4} = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,75 \text{ мм}.$$

**Відповідь.** Вертикальне зміщення електрона при виході з конденсатора дорівнює 3,75 мм.

#### ***Е-4.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**4-1.** Електричний заряд першої кульки дорівнює 200 нКл, а другої —  $10 \cdot 10^{-8}$  Кл. Кульки мають ємність відповідно 2 і 3 пФ. Визначити заряди кульок після того, як їх з'єднали проводом. ( $1,2 \cdot 10^{-7}$  Кл;  $1,8 \cdot 10^{-7}$  Кл)

**4-2.** Площа кожної пластини плоского конденсатора дорівнює  $520 \text{ см}^2$ . На якій відстані одна від одної потрібно розташувати пластини в повітрі, щоб ємність конденсатора дорівнювала 46 пФ? (1 см)

**4-3.** Два конденсатори ємностями 2 і 4 мкФ з'єднали в батарею. Визначити ємність батареї конденсаторів, якщо їх з'єднали: а) паралельно; б) послідовно. (6 мкФ; 1,3 мкФ)

**4-4.** Плоский конденсатор, відстань між пластинами якого 5 см, зарядили до напруги 200 В і від'єднали від джерела живлення. Визначити, яку роботу необхідно виконати, щоб розсунути пластини до 10 см, і яка при цьому буде напруга на конденсаторі. Площа кожної пластини  $12 \text{ см}^2$ . ( $4,25 \cdot 10^{-9}$  Дж; 400 В)

**4-5.** Конденсатору ємністю 10 мкФ надали заряд 4 мкКл. Визначити енергію зарядженого конденсатора. (800 нДж)

**4-6.** Площа кожної з пластин плоского конденсатора —  $200 \text{ см}^2$ , а відстань між ними — 1 см. Визначити енергію конденсатора, якщо напруженість електричного поля дорівнює 500 кВ/м. (220 мкДж)

**4-7.** У телевізійному кінескопі прискорювальна анодна напруга дорівнює 16 кВ, а відстань від катода до анода — 30 см. За який час електрони проходять цю відстань? Вважати, що початкова швидкість електрона дорівнює нулю. (4 нс)

**4-8.** В електронно-променевої трубки потік електронів, прискорений полем із різницею потенціалів 5 кВ, рухається між пластинами плоского конденсатора завдовжки 5 см. Напруженість поля між пла-

стинами конденсатора — 40 кВ/м. Визначити вертикальне зміщення променя на виході з простору між пластинами.  $\left( h = \frac{El^2}{4U} = 0,5 \text{ см} \right)$

#### ***Е-4.6. Задачі для самостійного розв'язування***

**4-9.** Порошинка масою 10 нг зависла в однорідному електричному полі між паралельними горизонтальними пластинами, до яких прикладено напругу 6 кВ. Відстань між пластинами — 6 см. Визначити заряд порошинки. ( $9,8 \cdot 10^{-16}$  Кл)

**4-10.** Між двома паралельними пластинами відстань дорівнює 2 см, а різниця потенціалів — 300 В. Як зміниться різниця потенціалів, якщо, не змінюючи заряду, розсунути пластини до 6 см? ( $\Delta U = 600$  В)

**4-11.** Різниця потенціалів між двома паралельними пластинами дорівнює 1 кВ, відстань між пластинами 10 см. Яка сила діє на заряд  $10^{-4}$  Кл, розташований між пластинами? (1 Н)

**4-12.** Скільки електронів містить заряджена порошинка масою  $10^{-11}$  г, якщо вона вільно висить у повітрі між паралельними горизонтальними пластинами, до яких прикладено різницю потенціалів 76,5 В? Відстань між пластинами — 5 мм. (40 електронів)

**4-13.** Різниця потенціалів між двома паралельними горизонтальними пластинами дорівнює 700 В, відстань між ними — 0,4 см. Між пластинами вільно зависла в повітрі краплина олії радіусом 1,5 мкм. Визначити заряд краплини. Густина олії —  $0,8 \text{ г/см}^3$ . ( $6,4 \cdot 10^{-19}$  Кл)

**4-14.** Усередині конденсатора горизонтально паралельно його пластинам завдовжки 6,5 см летять електрони зі швидкістю  $85 \cdot 10^3$  км/с. Коли на пластини конденсатора подається напруга, то електрони зміщуються на виході в напрямі до однієї з пластин на 1,8 мм. Визначити напруженість електричного поля в конденсаторі. ( $3,5 \cdot 10^4$  В/м)

**4-15.** Пучок електронів напрямлений паралельно пластинам плоского конденсатора завдовжки 5 см, відстань між якими 3 см. З якою швидкістю влетіли електрони в конденсатор, коли відомо, що вони відхиляються від горизонталі за час польоту в конденсаторі на 3 мм? Різниця потенціалів між пластинами 700 В. Визначити кінетичну енергію електронів. ( $4,1 \cdot 10^{-7}$  м/с;  $7,8 \cdot 10^7$  Дж)

**4-16.** Між пластинами плоского конденсатора міститься слюда. Площа пластин конденсатора  $15 \text{ см}^2$ , відстань між ними 0,02 см. Визначити ємність конденсатора. (400 пФ)

**4-17.** Якою має бути прискорювальна різниця потенціалів, щоб надати електрону швидкості  $10^3$  км/с? (2,8 В)

**4-18.** Який заряд мають обкладки повітряного конденсатора площею  $200 \text{ см}^2$  кожна, якщо відстань між обкладками дорівнює  $0,1 \text{ см}$ , а різниця потенціалів між ними  $600 \text{ В}$ ? ( $1,06 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ )

**4-19.** Визначити електроємність конденсатора, для виготовлення якого використано смужки алюмінієвої фольги завдовжки  $2 \text{ м}$  і завширшки  $0,1 \text{ м}$ . Товщина парафінового паперу, розташованого між смужками, становить  $10^{-4} \text{ м}$ , його діелектрична проникність дорівнює  $2$ . Чому дорівнює енергія конденсатора, якщо різниця потенціалів між обкладками дорівнює  $400 \text{ В}$ ? ( $3,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ ;  $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ )

**4-20.** На пластинах плоского конденсатора рівномірно розподілено заряд  $5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ . Площа обкладок дорівнює  $100 \text{ см}^2$ , а відстань між ними —  $3 \text{ мм}$ . Заряджений конденсатор від'єднали від батареї. Визначити роботу, яку потрібно виконати, щоб розсунути пластини до  $8 \text{ мм}$ ? ( $7,06 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ )

**4-21.** Два конденсатори ємностями  $3$  і  $6 \text{ мкФ}$  з'єднали в батарею і приєднали до акумулятора  $\text{ЕРС } 120 \text{ В}$ . Визначити заряди на конденсаторах і різницю потенціалів між їхніми обкладками, якщо конденсатори з'єднано: 1) паралельно; 2) послідовно. (1)  $360 \text{ мкКл}$ ;  $720 \text{ мкКл}$ ;  $120 \text{ В}$ ; 2)  $240 \text{ мкКл}$ ;  $80 \text{ В}$ ;  $40 \text{ В}$ )

**4-22.** Два конденсатори ємностями  $4$ ,  $5$ ,  $10$  і  $20 \text{ мкФ}$  з'єднали в батарею. Визначити ємність батареї, якщо їх з'єднали: а) паралельно; б) послідовно. ( $39 \text{ мкФ}$ ;  $2,7 \text{ мкФ}$ )

**4-23.** Два конденсатори, електроємність кожного з яких  $1,2 \text{ мкФ}$ , з'єднано послідовно. До них прикладено напругу  $900 \text{ В}$ . Визначити напругу на пластинах конденсаторів. ( $450 \text{ В}$ )

**4-24.** Два конденсатори, електроємність кожного з яких  $10^{-8} \text{ Ф}$ , з'єднано паралельно. Послідовно до них приєднано конденсатор електроємністю  $0,01 \text{ мкФ}$ . Визначити електроємність батареї конденсаторів. ( $6,7 \text{ нФ}$ )

**4-25.** У плоский конденсатор вноситься ебонітова пластинка. На скільки потрібно розсунути пластини конденсатора, щоб дістати попередню електроємність, якщо товщина ебонітової пластини дорівнює  $0,5 \text{ см}$ ? ( $0,3 \text{ см}$ )

**4-26.** Визначити силу, з якою одна пластинка конденсатора площею  $100 \text{ см}^2$  притягується другою, якщо різниця потенціалів між пластинами дорівнює  $100 \text{ В}$ , а відстань між ними —  $1 \text{ см}$ . ( $4,43 \text{ мН}$ )

**4-27.** Визначити роботу, яку потрібно виконати для того, щоб пластини плоского конденсатора, які перебувають на відстані  $1 \text{ см}$  одна від одної, розсунути на відстань  $4 \text{ см}$ , якщо площа кожної пластини дорівнює  $100 \text{ см}^2$ , а різниця потенціалів між ними становить  $500 \text{ В}$  і при розсуванні пластин не змінюється. ( $8,3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$ )

### Е-5.1. Теоретичні відомості

#### Умови існування електричного струму. Джерело струму

Ми знаємо, що у провідниках — металах — існують вільні електрони, рух яких хаотичний. Якщо провідник помістити в зовнішнє електричне поле, то електрони рухатимуться впорядковано.

**Саме впорядкований напрямлений рух носіїв заряду називають *електричним струмом*.**

Струм, що виникає під час руху заряджених макроскопічних тіл, називається *конвекційним струмом*. Якщо всередині провідника рухаються впорядковано і напрямлено саме *вільні* електричні заряди, такий струм називають *струмом провідності*.

**Умови існування струму провідності такі:**

- 1) наявність вільних електронів;**
- 2) наявність замкненого кола;**
- 3) наявність джерела струму, тобто пристрою, який підтримує в провіднику електричне поле.**

Перша умова зрозуміла, а от решта потребує пояснень. Уявімо таку ситуацію. Ми маємо намір з'їхати на санчатах із засніженої гірки. Які умови для цього потрібні? По-перше, забратися на вершину гірки. Далі потрібно сісти в санчата, стати на край гірки — і сила тяжіння спустить нас вниз. А для того, аби не один раз з'їхати з гірки, а тривалий час спускатися з неї, необхідно мати когось (або щось), хто безперервно піднімав би нас із санчатами на вершину гірки! А от вниз нас спускає вже сила тяжіння! Отож за цим принципом діє і джерело струму. Сили електричного поля самі рухають електричні заряди лише в один бік (згадаємо явище поляризації провідників), скажімо, з точки 1 у точку 2, як зображено на рис. Е-5.1. І все! А електричний струм має протікати в провіднику довго. Так от із цією метою і потрібні замкнене коло та джерело струму. Саме джере-

ло струму має «доставити» електричні заряди по замкненому колу назад у точку 1 у напрямі, протилежному силам електричного поля.

**Джерело струму:**

- перетворює неелектричну енергію в енергію електричного струму;
- не створює електричних зарядів, а лише надає їм упорядкованого руху.

Відношення роботи сторонніх сил із переміщення позитивного заряду вздовж замкненого кола до абсолютної величини (модуля) цього заряду називається **електрорушійною силою** (ЕРС) джерела струму:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

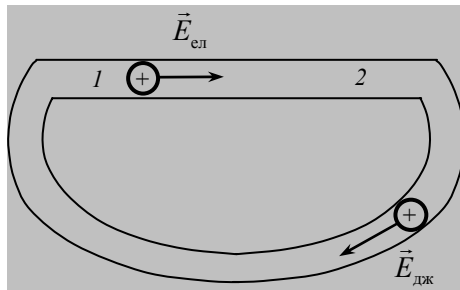


Рис. Е-5.1

Замкнене коло поділяють на дві ділянки: зовнішню і внутрішню. До **зовнішньої** ділянки належить та частина кола, де заряди витрачають енергію, нагромаджену ними в електричному полі, і рухаються в напрямі сил поля. Вона складається зі **споживача і з'єднувальних провідників** (рис. Е-5.2).



Рис. Е-5.2

До **внутрішньої** ділянки належить та частина кола, де заряди рухаються в напрямі, протилежному силам поля під дією сторонніх



сил. Вона складається із *джерела струму* (рис. Е-5.2). Джерело струму має два полюси: позитивний, із вищим значенням потенціалу, і негативний, із нижчим значенням потенціалу. Домовилися за напрям струму в зовнішній ділянці кола взяти напрям від позитивного полюсу джерела струму «+» до негативного «-». На внутрішній ділянці кола струм протікатиме навпаки: від «-» джерела струму до «+».

### Сила електричного струму. Опір провідника

**Силою струму  $I$  називають скалярну величину, яка дорівнює кількості електрики  $q$ , перенесеної через площинку площиною  $S$  в одиницю часу  $t$ :**

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

Якщо електричний струм *сталий*, то його напрям і сила не змінюються в часі. Одиниця струму — ампер (А), або кулон на секунду (Кл/с). Силу струму можна визначити ще так:

$$I = enSv_{\text{ср}},$$

де  $e$  — заряд електрона;  $n$  — концентрація вільних електронів у провіднику;  $S$  — площа перерізу провідника;  $v_{\text{ср}}$  — швидкість руху електронів.

**Опір провідника  $R$  при сталій температурі прямо пропорційний до його довжини  $l$  і обернено пропорційний до площі його перерізу  $S$ , а також залежить від матеріалу, з якого виготовлено провідник:**

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

де  $\rho$  — питомий опір провідника, залежний від хімічних властивостей відповідного матеріалу та температури.

Одиниці опору провідника — Ом.

Опір чистих металів із підвищенням температури збільшується:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

де  $R_0$  — опір при  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору, або

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

де  $\rho_0$  — питомий опір при  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

Опір вугілля, розчинів солей і кислот із підвищенням температури зменшується.

### Закон Ома

Г. Ом експериментально встановив **закон**:

**сила струму на ділянці кола прямо пропорційна до напруги на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційна до її опору:**

$$I = \frac{U}{R}.$$

Добуток

$$U = IR$$

називається спадом **напруги** на опорі.

**Закон Ома для замкненого кола**, яке містить джерело струму, формулюється так:

**сила струму в колі прямо пропорційна до ЕРС джерела струму і обернено пропорційна до суми опорів зовнішньої  $R$  і внутрішньої  $r$  ділянок кола:**

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

де  $r$  — опір джерела струму або внутрішній опір.

Потрібно пам'ятати, що закон Ома, записаний для ділянки кола, є частинним випадком загального формулювання закону Ома для замкненого кола. Закон Ома для замкненого кола можна переписати в такому вигляді:

$$IR = \varepsilon - Ir,$$

або

$$U = \varepsilon - Ir, \quad (1)$$

де  $U$  — **спад** напруги на зовнішній ділянці кола або на затискачах джерела струму;  $Ir$  — спад напруги на внутрішній ділянці кола.

Розглянемо *наслідки*, які випливають із закону Ома для замкненого кола:

1. Перепишемо рівняння (1) у вигляді

$$U = \varepsilon - r \frac{\varepsilon}{R + r},$$

або

$$U = \varepsilon \left( 1 - \frac{r}{R + r} \right).$$

Коли коло розімкнене, тобто  $R \rightarrow \infty$ , маємо:

$$\frac{r}{R + r} \rightarrow 0.$$

Тоді  $U \approx \varepsilon$  і сила струму в колі  $I = 0$ .

2. Якщо  $R \rightarrow 0$ , то відбувається різке збільшення сили струму в колі:

$$I = I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r},$$

а напруга на затискачах джерела струму дорівнює нулю. Такий випадок називається *коротким замиканням*.

### Послідовне і паралельне з'єднання провідників

Схему послідовного з'єднання провідників наведено на рис. Е-5.3.

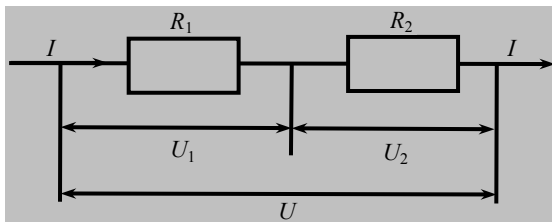


Рис. Е-5.3

Для того щоб визначити загальний опір на цій ділянці, потрібно скористатись такими правилами:

- через кожний провідник протікає однаковий струм:  $I = \text{const}$ ;
- напруга на кожному провіднику дорівнює :

$$U_1 = IR_1 \text{ та } U_2 = IR_2;$$

- напруга на всій ділянці кола така:

$$U = U_1 + U_2.$$

Згідно з цими правилами напруга на всій ділянці кола визначається так:

$$IR = IR_1 + IR_2,$$

де  $R$  — загальний опір ділянки кола.

Після перетворень маємо:

$$R = R_1 + R_2,$$

або

$$R = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Схему паралельного з'єднання провідників наведено на рис. Е-5.4.

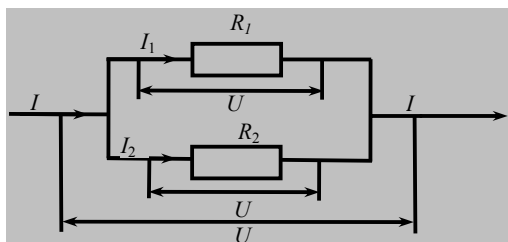


Рис. Е-5.4

Для того щоб визначити загальний опір на цій ділянці, потрібно скористатись такими правилами:

- напруга на кожному провіднику і на всій ділянці однакова:

$$U_1 = U_2 = U = \text{const};$$

• сила струму, який протікає через кожний провідник, визначається за формулами:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ і } I_2 = \frac{U}{R_2};$$

- сила струму на всій ділянці кола така:

$$I = I_1 + I_2.$$

Згідно з цими правилами, сила струму на всій ділянці кола ви-значатиметься так:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2},$$

де  $R$  — загальний опір ділянки кола.

Після перетворень маємо:

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

або

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$

### Шунт і додатковий опір

**Амперметр** підмикають до кола послідовно з опором, через який протікає струм, силу якого потрібно виміряти. **Вольтметр** підмикають паралельно між двома точками кола, де потрібно виміряти напру-гу. Ціною поділки будь-якого вимірювального приладу, наприклад амперметра або вольтметра, називається значення у відповідних оди-ницях, наприклад амперах або вольтях, вимірюваної величини, яке припадає на одну найменшу поділку шкали цього приладу.

Отже, ціна поділки відповідно для амперметра та вольтметра становить — А/поділку та В/поділку.

Для того щоб розширити межі вимірювання амперметра, пара-лельно до нього (рис. Е-5.5) підмикають опір, який називається **шунтом**.

Нехай у колі протікає струм, сила якого в  $n$  раз перевищує но-мінальне значення шкали ампер-метра:  $I = nI_a$ . **Номинальним зна-ченням** називається найбільше значення шкали вимірювального приладу. Визначимо опір шунта. Згідно з правилами паралельного з'єднання провідників маємо:

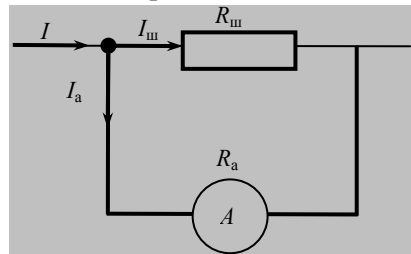


Рис. Е-5.5

$$I = I_a + I_{ш}.$$

Скориставшись законом Ома для ділянки кола, запишемо:

$$n \frac{U}{R_a} = \frac{U}{R_a} + \frac{U}{R_{ш}}$$

Після перетворень отримаємо формулу для визначення опору шунта:

$$R_{ш} = \frac{R_a}{n-1}$$

Для того, щоб розширити межі вимірювання вольтметра, послідовно до нього (рис. Е-5.6) підмикають **додатковий опір**. Нехай у колі потрібно виміряти напругу, значення якої в  $n$  раз перевищує номінальне значення шкали вольтметра:  $U = nU_V$ . Визначимо додатковий опір. Згідно з правилами послідовного з'єднання провідників маємо:

$$U = U_V + U_{\text{дод}}$$

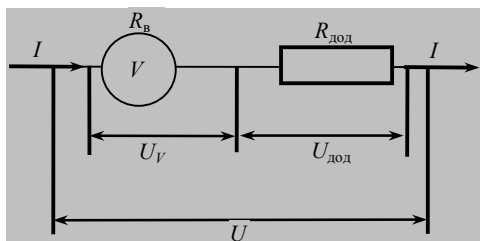


Рис. Е-5.6

Скориставшись законом Ома для ділянки кола, запишемо:

$$nIR_V = IR_V + IR_{\text{дод}}$$

Після перетворень дістанемо формулу для визначення додаткового опору:

$$R_{\text{дод}} = R_V (n-1)$$

### Е-5.2. Завдання для поточного тестування

1. Зазначити умови існування струму провідності в колі:

1) наявність вільних електронів;

- 2) наявність споживача;
- 3) наявність замкненого кола;
- 4) наявність з'єднувальних провідників;
- 5) наявність джерела струму.

2. Дописати визначення сили струму: *Силою струму називають ..... величину, яка дорівнює ....., перенесеної через ..... за одиницю .....*

3. Сила струму визначається за такою формулою:

1)  $I = enSv_{\text{ср}}$ ; 2)  $I = \frac{q}{t}$ ; 3)  $I = \frac{U}{R}$ ; 4)  $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$ .

4. Записати формулу для визначення опору провідника  $R = \rho \frac{l}{S}$ :

1)  $\rho$ ; 2)  $I$ ; 3)  $l$ ; 4)  $S$ ; 5)  $r$ .

5. Опір провідника залежить:

1) від температури; 2) довжини провідника; 3) матеріалу провідника; 4) площини перерізу провідника; 5) сили струму в колі; 6) напруги.

6. Опір провідника не залежить:

1) від температури; 2) довжини провідника; 3) матеріалу провідника; 4) площі перерізу провідника; 5) сили струму в колі; 6) напруги.

7. Закон Ома для ділянки кола записується так:

1)  $IR = \varepsilon - Ir$ ; 2)  $I = \frac{U}{R}$ ; 3)  $I = \frac{U}{R}$ ; 4)  $U = \varepsilon - Ir$ ; 5)  $I = \frac{\varepsilon}{r}$ .

8. Закон Ома для замкненого кола записується так:

1)  $IR = \varepsilon - Ir$ ; 2)  $I = \frac{U}{R}$ ; 3)  $I = \frac{U}{R}$ ; 4)  $U = \varepsilon - Ir$ ; 5)  $I = \frac{\varepsilon}{r}$ .

9. Сила струму короткого замикання визначається так:

1)  $IR = \varepsilon - Ir$ ; 2)  $I = \frac{U}{R}$ ; 3)  $I = \frac{U}{R}$ ; 4)  $U = \varepsilon - Ir$ ; 5)  $I = \frac{\varepsilon}{r}$ .

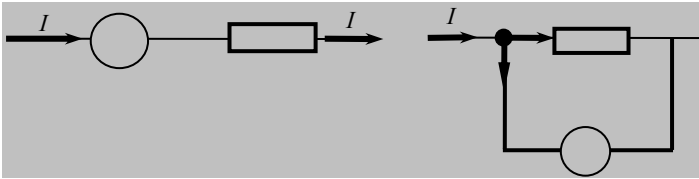
10. Зазначити правила, які стосуються паралельного з'єднання двох провідників:

- 1)  $I = \text{const}$ ; 2)  $U = \text{const}$ ; 3)  $U = U_1 + U_2$ ; 4)  $I = I_1 + I_2$ ;  
 5)  $R = R_1 + R_2$ ; 6)  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ .

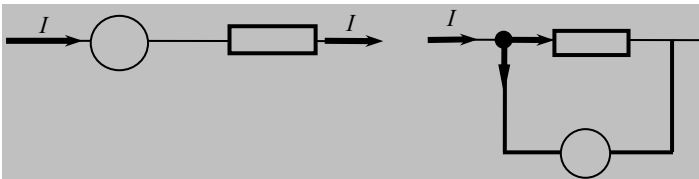
**11.** Зазначити правила, які стосуються послідовного з'єднання двох провідників:

- 1)  $I = \text{const}$ ; 2)  $U = \text{const}$ ; 3)  $U = U_1 + U_2$ ; 4)  $I = I_1 + I_2$ ;  
 5)  $R = R_1 + R_2$ ; 6)  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ .

**12.** Показати схему, яка ілюструє підімкнення до амперметра шунта:



**13.** Показати схему, яка ілюструє підімкнення до вольтметра додаткового опору:



**14.** Формула для визначення опору шунта така:

- 1)  $\frac{R_a}{n-1}$ ; 2)  $R_0(1 + \alpha t)$ ; 3)  $R_v(n-1)$ ; 4)  $\rho \frac{l}{S}$ .

**15.** Формула для визначення додаткового опору така:

- 1)  $\frac{R_a}{n-1}$ ; 2)  $R_0(1 + \alpha t)$ ; 3)  $R_v(n-1)$ ; 4)  $\rho \frac{l}{S}$ .

**16.** Потужність струму визначається так:

- 1)  $\frac{A}{t}$ ; 2)  $\epsilon I$ ; 3)  $IU$ ; 4)  $\frac{U^2}{R}$ ; 5)  $I^2 R$ ; 6)  $\frac{R}{R+r}$ .



17. Потужність джерела струму визначається так:

1)  $\frac{A}{t}$ ; 2)  $\epsilon I$ ; 3)  $IU$ ; 4)  $\frac{U^2}{R}$ ; 5)  $I^2 R$ ; 6)  $\frac{R}{R+r}$ .

18. ККД джерела струму визначається так:

1)  $\frac{A}{t}$ ; 2)  $\epsilon I$ ; 3)  $IU$ ; 4)  $\frac{U^2}{R}$ ; 5)  $I^2 R$ ; 6)  $\frac{R}{R+r}$ .

19. До провідника опором 8 Ом прикладено напругу 10 В. Заряд, що пройшов через провідник впродовж 16 с, дорівнює, Кл:

1) 10; 2) 15; 3) 20; 4) 25; 5) правильної відповіді тут немає

20. Дві однакові електричні лампи опором 200 Ом з'єднано послідовно і ввімкнено в мережу напругою 120 В. Струм, який проходить через кожну лампочку, дорівнює, А:

1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) правильної відповіді тут немає.

21. У мережу напругою 120 В ввімкнено дві електричні лампи опором 200 Ом кожна, які з'єднано паралельно. Струм, що проходить через кожну лампочку, дорівнює, А:

1) 0,3; 2) 0,6; 3) 0,9; 4) 1,2; 5) правильної відповіді тут немає.

22. ЕРС батареї дорівнює 6 В, її внутрішній опір 0,5 Ом, опір зовнішнього кола 11,5 Ом. Спад напруги всередині батареї дорівнює, В:

1) 0,1; 2) 0,25; 3) 0,5; 4) 0,6; 5) правильної відповіді тут немає.

23. У мережі з джерелом струму, ЕРС якого дорівнює 2,1 В, а зовнішній опір 4 Ом, протікає струм 0,5 А. Внутрішній опір джерела струму, Ом, такий:

1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) правильної відповіді тут немає.

24. Опір одиниці довжини мідного дроту дорівнює 2,23 Ом/м, діаметр дроту 0,1 мм. Питомий опір міді такий, нОм · м:

1) 15; 2) 17,5; 3) 22,5; 4) 27,5; 5) правильної відповіді тут немає.

25. До батареї з ЕРС 7,2 В і внутрішнім опором 0,4 Ом підімкнули зовнішній опір 12 Ом. Напруга на затискачах батареї, В, дорівнює:

1) 6,8; 2) 6,9; 3) 7; 4) 7,1; 5) правильної відповіді тут немає.

26. Електричну лампу опором 430 Ом увімкнено в мережу напругою 220 В. Опір з'єднувальних проводів 10 Ом. Спад напруги на лампі такий, В:

1) 200; 2) 205; 3) 210; 4) 215; 5) правильної відповіді тут немає.

27. Напруга на ділянці кола довжиною 5 м дорівнює 1 В. Питомий опір цієї ділянки становить  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом · м. Густина струму в колі, МА/м<sup>2</sup>, така:

1) 6; 2) 12; 3) 18; 4) 24; 5) правильної відповіді тут немає.

28. Опір провідника довжиною 100 м та площею поперечного перерізу  $10^{-4}$  м<sup>2</sup> дорівнює 2 Ом. Питомий опір матеріалу провідника такий:

1)  $2 \cdot 10^8$  Ом · м; 2)  $2 \cdot 10^4$  Ом · м; 3)  $2 \cdot 10^{-4}$  Ом · м; 4)  $2 \cdot 10^{-6}$  Ом · м; 5) інша відповідь.

29. Вольтметр із внутрішнім опором  $R_v$  має максимальну межу вимірювання 10 В. Визначити додатковий опір, який потрібно під'єднати до нього, щоб збільшити межу вимірювань до 100 В.

1)  $11 R_v$ ; 2)  $10 R_v$ ; 3)  $9 R_v$ ;  $9R_v$ ; 4)  $1/10 R_v$ ; 5) інша відповідь.

30. ЕРС джерела струму дорівнює 12 В. Яку роботу виконують сторонні сили, переміщуючи заряд 50 Кл всередині джерела від одної клеми до другої?

1) 1200 Дж; 2) 600 Дж; 3) 300 Дж; 4) 4,16 Дж; 5) інша відповідь.

31. Визначити внутрішній опір елемента живлення, якщо його ЕРС дорівнює 1,2 В, а при зовнішньому опорі 5 Ом сила струму у колі 0,2 А.

1) 1 Ом; 2) 2 Ом; 3) 3 Ом; 4) 4 Ом; 5) інша відповідь.

32. До джерела струму з ЕРС, що дорівнює 12 В, і внутрішнім опором 2 Ом підімкнули електричний опір 4 Ом. Сила струму у колі така:

1) 2 А; 2) 0,5 А; 3) 16 А; 4) 32 А; 5) 8 А; 6) інша відповідь.

33. Час проходження заряду 600 Кл по провіднику при силі струму в ньому 1 А такий:

1) 1 хв; 2) 5 хв; 3) 10 хв; 4) 20 хв; 5) інша відповідь.

34. Опори двох провідників однакової площі перерізу і матеріалу відносяться, як 1:4. Другий провідник важчий від першого:

1) у 2 рази; 2) у 16 раз; 3) у 4 рази; 4) у 8 раз.

### ***Е-5.3. Висновки з теми***

1. Опір — це величина, яка характеризує електричні властивості провідника.

2. Опір провідника залежить тільки від матеріалу провідника, його довжини і площі перерізу.

3. Напряга і сила струму не визначають опору провідника. Для даного провідника при різних значеннях напруги сила струму матиме різні значення, але відношення напруги до сили струму буде однаковим і дорівнюватиме опору цього провідника.

4. У замкненому колі струм протікає як на зовнішній ділянці кола, так і на внутрішній, тобто всередині джерела струму.

5. Сили електричного поля рухають заряди тільки в один бік. Оскільки електричне поле потенціальне, то робота кулонівських сил по замкненому контуру дорівнює нулю. Тому сили електричного поля не можуть переміщувати заряди по замкненому колу.

6. Джерело струму повертає заряди на початкові «позиції» і рухає їх за рахунок роботи неелектричних сторонніх сил.

7. Закон Ома записується для замкненого кола. Частинним випадком загального закону є закон Ома для ділянки кола, яка не містить джерела струму.

8. При короткому замиканні в електричному колі зовнішній опір дорівнює нулю.

9. Якщо коло розімкнене, то це означає, що зовнішній опір прямує до нескінченності.

10. Опір амперметра має бути якомога меншим, щоб менше впливати на силу струму, який вимірюється.

11. Опір вольтметра має бути якомога більшим, щоб сила струму, який через нього проходить, була якомога меншою.

### ***Е-5.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** Електричне коло складається з трьох послідовно з'єднаних провідників і джерела струму напругою 24 В. Опір першого провідника становить 4 Ом, другого — 6 Ом, напруга на кінцях третього провідника — 4 В. Визначити силу струму в колі, опір третього провідника і напругу на кінцях першого і другого провідників.

***Дано:***

$$U = 24 \text{ В};$$

$$R_1 = 4 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 6 \text{ Ом};$$

$$U_3 = 4 \text{ В}$$

$$I = ? \quad R_3 = ? \quad U_1 = ? \quad U_2 = ?$$

***Розв'язання***

При послідовному з'єднанні провідників (рис. 1) напруга на ділянці кола *ad* дорівнює:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Звідси

$$U - U_3 = U_1 + U_2.$$

Запишемо закон Ома для ділянки кола *ac*:

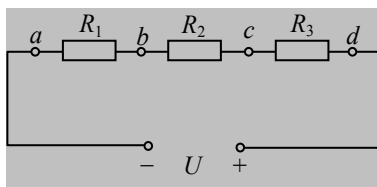


Рис. 1

$$I = \frac{U_{ac}}{R_{ac}} = \frac{U_1 + U_2}{R_1 + R_2} = \frac{U - U_3}{R_1 + R_2}.$$

Напругу на першому і другому провідниках визначаємо за законом Ома для ділянки кола:

$$U_1 = I \cdot R_1; \text{ та } U_2 = I \cdot R_2 = 2 \cdot 6 \text{ В} = 12 \text{ В}.$$

Опір третього провідника визначимо також за законом Ома для ділянки кола:

$$R_3 = \frac{U_3}{I}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[I] = \left[ \frac{\text{В}}{\text{Ом}} \right] = [\text{А}];$$

$$[U_1] = [\text{А} \cdot \text{Ом}] = [\text{В}];$$

$$[R] = \left[ \frac{\text{В}}{\text{А}} \right] = [\text{Ом}].$$

Виконуємо обчислення:

$$I = \frac{24 - 4}{4 + 6} = 2 \text{ А}.$$

$$U_1 = 2 \cdot 4 = 8 \text{ В};$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 2 \cdot 6 = 12 \text{ В};$$

$$R_3 = \frac{4}{2} = 2 \text{ Ом.}$$

**Відповідь.** Сила струму в колі дорівнює 2 А; опір третього провідника — 2 Ом; напруга на кінцях першого провідника становить 8 В, другого провідника — 12 В.

**Задача 2.** Який опір можна отримати за допомогою трьох резисторів опором по 2 Ом кожний?

**Дано:**

$$R_1 = R_2 = R_3 = R = 2 \text{ Ом}$$

$R_{\text{зар}} = ?$

**Розв'язання**

Розглянемо можливі варіанти з'єднання резисторів і визначимо їхній загальний опір.

1. Загальний опір для ділянки кола при послідовному з'єднанні провідників (рис. 2, а) дорівнює:

$$R_{\text{зар}} = R_1 + R_2 + R_3 = 3 R = 6 \text{ Ом.}$$

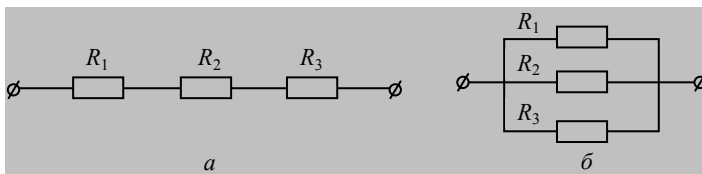


Рис. 2

2. Загальний опір для ділянки кола при паралельному з'єднанні резисторів (рис. 2, б) можна визначити за формулою:

$$\frac{1}{R_{\text{зар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}{R_1 R_2 R_3} = \frac{3R^2}{R^3} = \frac{3}{R},$$

звідки

$$R_{\text{зар}} = \frac{R}{3} = \frac{2}{3} = 0,67 \text{ Ом.}$$

3. Резистори  $R_1$  і  $R_2$  з'єднано паралельно (рис. 3, а), тоді

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2} = \frac{2R}{R^2} = \frac{2}{R},$$

звідки

$$R_{12} = \frac{R}{2}.$$

Резистори  $R_{12}$  і  $R_3$  з'єднано послідовно, тому

$$R_{\text{зар}} = R_{12} + R_3 = \frac{R}{2} + R = \frac{3R}{2} = 3 \text{ Ом}.$$

4. Резистори  $R_1$  і  $R_2$  з'єднано послідовно (рис. 3, б):

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 2R.$$

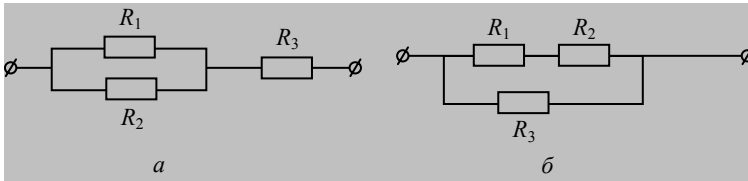


Рис. 3

Загальний опір при паралельному з'єднанні  $R_{12}$  і  $R_3$  визначимо так:

$$\frac{1}{R_{\text{зар}}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} = \frac{3}{2R},$$

звідки

$$R_{\text{зар}} = \frac{2R}{3} = \frac{2 \cdot 2}{3} = \frac{4}{3} = 1,33 \text{ Ом}.$$

**Відповідь.** За допомогою трьох резисторів можна отримати такий опір: 6 Ом; 2/3 Ом; 3 Ом; 4/3 Ом.

**Задача 3.** Визначити кількість електричних лампочок, що їх може живити батарея акумуляторів, ЕРС якої дорівнює 130 В, а внутрішній опір 2,6 Ом. Споживана напруга лампочок становить 110 В, опір кожної лампочки дорівнює 200 Ом, опір з'єднувальних провідників — 0,4 Ом.

**Дано:**

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 130 \text{ В}; \\ r &= 2,6 \text{ Ом}; \\ U &= 110 \text{ В}; \\ R_n &= 200 \text{ Ом}; \\ R_{\text{пр}} &= 0,4 \text{ Ом}\end{aligned}$$

$$n - ?$$

**Розв'язання**

Згідно із законом Ома для замкнутого кола визначимо струм, який споживають усі лампочки:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Опір зовнішнього кола дорівнює сумі опорів з'єднувальних провідників та загальному опору паралельно з'єднаних лампочок:

$$R = R_{\text{пр}} + \frac{R_n}{n}.$$

За законом Ома для ділянки кола визначає силу струму, який протікає через кожну лампочку:

$$I_n = \frac{U}{R_n}.$$

Тоді струм, що його споживають усі лампочки, можна визначити так:

$$I = nI_n = n \frac{U}{R_n}.$$

Далі згідно із законом Ома для замкнутого кола маємо:

$$n \frac{U}{R_n} = \frac{\varepsilon}{\frac{R_n}{n} + R_{\text{пр}} + r}.$$

Після перетворень дістаємо шукану кількість електричних лампочок:

$$n = \frac{R_n(\varepsilon - U)}{U(R_{\text{пр}} + r)}.$$

Виконаємо обчислення:

$$n = \frac{200(130 - 110)}{110(0,4 + 2,6)} = 12.$$

**Відповідь.** Батарея акумуляторів може жити 12 лампочок.

**Задача 4.** Генератор і споживач перебувають на відстані 500 м один від одного. Напруга і потужність споживача відповідно дорівнюють 400 В і 10 кВт. Визначити спад напруги в мідних провідниках із площею перерізу  $26 \text{ мм}^2$ , які з'єднують генератор зі споживачем.

**Дано:**

$$P = 10 \text{ кВт} = 10 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$

$$U_{\text{сп}} = 400 \text{ В};$$

$$S = 26 \text{ мм}^2 = 26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$l = 500 \text{ м};$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

---


$$U_{\text{пр}} - ?$$

**Розв'язання**

Потужність споживача визначається за формулою:

$$P = IU_{\text{сп}},$$

Сила струму, який протікає в колі, дорівнює:

$$I = \frac{P}{U_{\text{сп}}}.$$

Спад напруги в мідних провідниках визначається так:

$$U_{\text{пр}} = IR_{\text{пр}}.$$

Опір мідного провідника

$$R_{\text{пр}} = \rho \frac{l}{S}.$$

Звідси дістаємо:

$$U_{\text{пр}} = \frac{P}{U_{\text{сп}}} \rho \frac{l}{S}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[U] = \left[ \frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{В}^2 \cdot \text{Ом}}{\text{В}} \right] = [\text{В}].$$

Виконуємо обчислення:

$$U_{\text{пр}} = \frac{P}{U_{\text{сп}}} \rho \frac{l}{S} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 500}{400 \cdot 26 \cdot 10^{-6}} = 8,5 \text{ В}.$$

**Відповідь.** Спад напруги дорівнює 8,5 В.

**Задача 5.** Амперметром, який має опір 0,9 Ом та номінальне значення шкали 10 А, потрібно вимірювати струм до 100 А. Якою має бути довжина залізного провідника з площею перерізу  $0,28 \text{ мм}^2$ , щоб із нього можна було виготовити відповідний шунт?



**Дано:**

$$R_a = 0,9 \text{ Ом};$$

$$I_{\max} = 10 \text{ А};$$

$$I = 100 \text{ А};$$

$$S = 0,28 \text{ мм}^2 = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \text{ де}$$

$$\rho = 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$l - ?$$

**Розв'язання**

Опір шунта визначається за формулою:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_a}{n-1},$$

$$n = \frac{I}{I_{\max}}.$$

Опір провідника визначається так:

$$R_{\text{ш}} = \rho \frac{l}{S}.$$

Виконавши відповідні перетворення, дістанемо шукану довжину провідника:

$$l = \frac{R_a S I_{\max}}{\rho (I - I_{\max})}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[l] = \left[ \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}}{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{А}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$l = \frac{0,9 \cdot 0,28 \cdot 10^{-6} \cdot 10}{9,8 \cdot 10^{-8} \cdot (100 - 10)} = 0,29 \text{ м}.$$

Відповідь. Довжина залізного провідника дорівнює 0,29 м.

### ***Е-5.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**5-1.** Визначити силу струму в сталевому провіднику завдовжки 10 м та площею перерізу  $2 \text{ мм}^2$ , на який подано напругу 12 мВ. (20 мА)

**5-2.** У провіднику за 30 хв проходить електричний заряд 1800 Кл. Визначити силу струму і час, упродовж якого проходить заряд 600 Кл. (1 А; 10 хв)

**5-3.** Чотири лампи, розраховані на напругу 3 В і силу струму 0,3 А, потрібно ввімкнути паралельно і живити від джерела напру-

гою 5,4 В. Визначити опір резистора, який потрібно ввімкнути послідовно з лампами? (2 Ом)

**5-4.** Площа перерізу провідника дорівнює  $1,2 \text{ мм}^2$ . За 0,4 с через провідник проходить  $6 \cdot 10^{18}$  електронів. Визначити густину струму. ( $2 \text{ МА/м}^2$ )

**5-5.** Загальний опір двох провідників, з'єднаних послідовно дорівнює 50 Ом, а паралельно — 12 Ом. Визначити опір кожного провідника. (20 Ом; 30 Ом)

**5-6.** Визначити площу перерізу і довжину алюмінієвого дроту, якщо його опір дорівнює 0,1 Ом, а маса — 54 г. ( $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ; 8,5 м)

**5-7.** Моток дроту, виготовлений із міді, має опір 0,83 Ом і масу 0,21 кг. Визначити довжину дроту і площу його перерізу. (33,9 м;  $0,695 \text{ мм}^2$ )

**5-8.** ЕРС батареї дорівнює 6 В, її внутрішній опір — 0,5 Ом. До клем батареї під'єднали резистор опором 11,5 Ом. Визначити силу струму в колі, напругу на клеммах батареї та спад напруги всередині батареї. (0,5 А; 5,8 В; 0,25 В)

**5-9.** До батареї з ЕРС 3 В підімкнули послідовно два резистори з опором 12 та 8 Ом. Спад напруги на резисторах при цьому дорівнює 2 В. Визначити силу струму короткого замикання джерела ЕРС. (0,3 А)

**5-10.** Вольтметр, підімкнений до затискачів гальванічного елемента, показав 1,2 В за струму 0,4 А і 1 В за струму 0,8 А. Визначити ЕРС, внутрішній опір елемента та струм короткого замикання. (1,4 В; 0,5 Ом; 2,8 А)

**5-11.** Джерело з ЕРС 2 В, внутрішній опір якого дорівнює 0,8 Ом, замкнули нікеліновим дротом завдовжки 2,1 м з площею перерізу  $0,21 \text{ мм}^2$ . Визначити напругу на клеммах джерела струму. (1,7 В)

**5-12.** Яку довжину повинен мати сталевий дріт з площею перерізу  $0,2 \text{ мм}^2$ , щоб, замкнувши ним елемент з ЕРС 2 В і внутрішнім опором 1,2 Ом, дістати струм у колі 250 мА? (11 м)

**5-13.** Генератор з ЕРС 132 В та внутрішнім опором 0,4 Ом дає струм для живлення 50 паралельно з'єднаних ламп з опором 180 Ом кожна. Визначити силу струму в мережі. Опір з'єднувальних провідників не враховувати. (33 А)

**5-14.** Гальванічний елемент спочатку замикають провідником з опором 0,64 Ом, а потім — з опором 2,25 Ом. В обох випадках теплова потужність струму виявилась однаковою. Який внутрішній опір елемента? (1,2 Ом)

**5-15.** У персональному комп'ютері від одного елемента до другого передається  $3 \cdot 10^8$  імпульсів струму за 1 с. Яку найбільшу довжину може мати провідник, що з'єднує ці елементи? (1 м)

### Е-5.6 Задачі для самостійного розв'язування

**5-16.** Визначити густину струму, якщо за 10 с через переріз провідника площа якого дорівнює  $5 \text{ мм}^2$ , протікає заряд у 100 Кл. ( $2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ )

**5-17.** При ввімкненні в електричне коло провідника діаметром 0,5 мм та завдовжки 4,5 м різниця потенціалів на його кінцях дорівнювала 1,2 В за струму 1 А. Визначити питомий опір матеріалу провідника. ( $5,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

**5-18.** Ділянка кола складається зі сталевого дроту завдовжки 2 м з площею перерізу  $0,48 \text{ мм}^2$ , з'єднаного послідовно з нікелевим дротом завдовжки 1 м з площею поперечного перерізу  $0,21 \text{ мм}^2$ . Визначити напругу, яку потрібно підвести до ділянки, щоб одержати струм 0,6 А. (1,5 В)

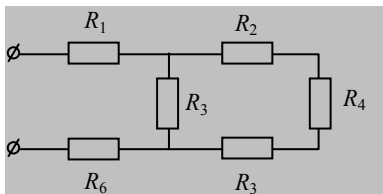
**5-19.** Площа перерізу ніхромового дроту  $0,55 \text{ мм}^2$ . Після приєднання цього дроту до джерела з напругою 120 В у колі тече струм 2,4 А. Визначити довжину дроту. (25 м)

**5-20.** Моток дроту, виготовлений з алюмінію, має опір 16,1 Ом і масу 3,24 кг. Визначити довжину дроту і площу поперечного перерізу. (831 м;  $1,44 \text{ мм}^2$ )

**5-21.** Коло складається з трьох послідовно з'єднаних провідників, приєднаних до джерела напругою 24 В. Опір першого провідника дорівнює 4 Ом, другого — 6 Ом, напруга на кінцях третього провідника 4 В. Визначити силу струму в колі, опір третього провідника і напругу на кінцях першого і другого провідників. (2 А; 2 Ом; 8 В; 12 В)

**5-22.** Визначити опір і довжину нікелевого дроту масою 88 г та площею перерізу  $0,5 \text{ мм}^2$ . (20 м; 16,8 Ом)

**5-23.** Визначити повний опір зображеного на рисунку кола, якщо  $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 24 \text{ Ом}$ . Визначити силу струму, який проходить через кожен резистор, якщо до кола прикладено напругу 36 В. (18 Ом; 2 А; 1,2 А).



**5-24.** У мережу 220 В послідовно ввімкнули дві лампи. Яка напруга припадає на кожену лампу, якщо опір першої лампи вдвічі більший, ніж другої? (73,4 В; 146,6 В)

**5-25.** ЕРС джерела струму дорівнює 10 В. Коли до нього приєднали опір 2 Ом, сила струму в колі становила 4 А. Визначити струм короткого замикання. (20 А)

**5-26.** За допомогою амперметра, що має опір 0,9 Ом та розрахований на вимірювання максимального струму 10 А, необхідно виміряти струм 100 А. Якої довжини має бути залізний провідник з площею перерізу 0,28 мм<sup>2</sup> для виготовлення шунта? (0,28 м)

**5-27.** Міліамперметр зі шкалою, розрахованою на 20 мА, потрібно використати як амперметр для вимірювання струмів до 1 А. Розрахувати опір шунта, якщо опір міліамперметра дорівнює 7 Ом. (0,14 Ом)

**5-28.** Амперметр має опір 0,02 Ом, його шкала розрахована на струм 1,2 А. Визначити опір шунта, щоб цим амперметром можна було виміряти струм до 6 А? (0,005 Ом)

**5-29.** Який додатковий опір необхідно приєднати до вольтметра, що має опір 1500 Ом, щоб ціна кожної поділки на шкалі збільшилась у 5 разів? (6000 Ом)

**5-30.** Вольтметр, розрахований на вимірювання напруги до 30 В, має внутрішній опір 3 кОм. Визначити додатковий опір, який потрібно приєднати до вольтметра, щоб ним можна було виміряти напруги до 300 В. (27 кОм)



## Е-6.1. Теоретичні відомості

Якщо до кінців ділянки кола прикладено напругу  $U$ , у цьому колі за час  $t$  через переріз провідника протікатиме деякий заряд і спричинений ним струм  $I$  виконуватиме **роботу**:

$$A = qU,$$

або

$$A = ItU.$$

Згідно із законом Ома для ділянки кола роботу струму можна визначити ще й так:

$$A = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt.$$

Робота сторонніх сил джерела струму визначається аналогічно:

$$A_{\text{джер}} = q\varepsilon = It\varepsilon.$$

Згідно із законом Ома для замкненого кола роботу джерела струму знайдемо так:

$$A_{\text{джер}} = \frac{\varepsilon^2}{R+r}t = I^2(R+r)t.$$

**Потужність** — це робота, виконувана за одиницю часу. З огляду на це потужність струму визначається за формулами:

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

Потужність джерела струму визначається аналогічно:

$$P_{\text{джер}} = \varepsilon I.$$

Відомо, що коли джерело струму підімкнено до зовнішнього кола, то електричний струм протікає також і всередині джерела стру-

му. Через це джерело втрачає деяку частину потужності електричного струму на теплоту, що виділяється всередині джерела. Коефіцієнт корисної дії (ККД) джерела струму визначається так:

$$\eta = \frac{P - P_{\text{втр}}}{P},$$

де  $P$  — повна потужність джерела струму;  $P_{\text{втр}}$  — втрати потужності на нагрівання джерела струму, або

$$\eta = \frac{I^2 R + I^2 r - I^2 r}{I^2 R + I^2 r} = \frac{R}{R + r}.$$

При  $R = r$  корисна потужність максимальна, і ККД дорівнює  $\frac{1}{2}$ .

Оскільки  $U \leq \varepsilon$ , то ККД завжди менший від одиниці ( $\eta \leq 1$ ).

Однією з характерних властивостей електричного струму є його теплова дія. Річ у тім, що під час протікання струму по провіднику робота електричного струму витрачається на збільшення внутрішньої енергії провідника, і провідник нагрівається.

**Закон Джоуля — Ленца** формулюється так:

**кількість теплоти, виділена струмом у провіднику, прямо пропорційна до квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму:**

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

Скориставшись законом Ома для ділянки кола, закон Джоуля — Ленца можна записати так:

$$Q = \frac{U^2}{R} t.$$

Усі провідники можна поділити на дві групи: провідники першого роду і провідники другого роду. У провідниках першого роду під час протікання електричного струму не відбувається хімічних перетворень. До таких провідників належать метали.

У провідниках другого роду під час протікання електричного струму відбуваються хімічні перетворення. До таких провідників належать електроліти. **Електролітами** називають речовини, які хімічно розкладаються на складові частини, коли через них проходить електричний струм. До електролітів належать водні розчини солей,

кислот, лугів і розплави солей. Носіями заряду в електролітах виступають іони. Струм в електролітах підпорядкований закону Ома.

**Електролізом** називається процес відкладання речовини на електродах під час проходження струму через електроліт. Закони електролізу встановив Фарадей.

**Перший закон Фарадея:** маса речовини, відкладеної під час електролізу на кожному з електродів, прямо пропорційна до заряду, перенесеного через електроліт:

$$m = kq,$$

де  $k$  — електрохімічний еквівалент речовини, або

$$m = kIt.$$

**Другий закон Фарадея:** електрохімічний еквівалент речовини прямо пропорційний до хімічного еквівалента:

$$k = \frac{1}{F} \chi = \frac{1}{F} \frac{A}{n}.$$

де  $A$  — атомна маса;  $F = 9,65 \cdot 10^7$  Кл/кг-екв — число Фарадея ;  $n$  — валентність.

Об'єднаний закон електролізу:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q.$$

На практиці електроліз використовують у гальванічних елементах для нанесення дуже тонких покриттів дорогоцінних металів на поверхню іншого металу тощо.

### ***Е-6.2. Завдання для поточного тестування***

1. Дописати формулювання закону Джоуля — Ленца: *Кількість ....., виділена струмом у провіднику, ..... квадрата ....., опору провідника і ..... струму.*

2. Закон Джоуля—Ленца записується так:

1)  $Pt$ ; 2)  $\epsilon It$ ; 3)  $I^2 Rt$ ; 4)  $\frac{U^2}{R} t$ ; 5)  $IUt$ .

3. Дописати визначення електролізу: *Електролізом називається процес ..... на електродах ..... під час ..... через електроліт.*

4. Перший закон Фарадея для електролізу записується так:

1)  $m = kq$ ; 2)  $k = \frac{1}{F} \chi = \frac{1}{F} \frac{A}{n}$ ; 3)  $m = kIt$ ; 4)  $m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q$ .

5. Другий закон Фарадея для електролізу записується так:

1)  $m = kq$ ; 2)  $k = \frac{1}{F} \chi = \frac{1}{F} \frac{A}{n}$ ; 3)  $m = kIt$ ; 4)  $m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q$ .

6. Об'єднаний закон Фарадея для електролізу записується так:

1)  $m = kq$ ; 2)  $k = \frac{1}{F} \chi = \frac{1}{F} \frac{A}{n}$ ; 3)  $m = kIt$ ; 4)  $m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q$ .

7. Мідний та залізний провідники однакової довжини та площі перерізу з'єднано послідовно. Питомий опір міді дорівнює  $\rho_1$ , заліза —  $\rho_2$ , причому  $\rho_1 < \rho_2$ . Який провідник нагрівається більше при проходженні через нього струму і у скільки раз?

1) Мідний, у  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  раз; 2) залізний, у  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ ; 3) однаково; 4) інша відповідь.

8. Два провідники, опір першого з яких дорівнює  $R$ , а другого —  $2R$ , з'єднано послідовно. Відношення потужностей  $\frac{P_2}{P_1}$ , які виділяються в кожному провіднику, таке:

1) 4; 2) 8; 3) 2; 4)  $\frac{1}{2}$ .

9. Два провідники, опір першого з яких дорівнює  $R$ , а другого —  $2R$ , з'єднано паралельно. Відношення потужностей  $\frac{P_2}{P_1}$ , які виділяються в кожному провіднику, таке:

1) 4; 2) 8; 3) 2; 4)  $\frac{1}{2}$ .

10. Два провідники, опір кожного з яких дорівнює  $R$ , перший раз з'єднують послідовно, а другий — паралельно і підмикають до джерела струму з внутрішнім опором  $2R$ . Відношення потужностей  $\frac{P_1}{P_2}$ , які виділяються в зовнішньому колі в обох випадках, таке:



1)  $16/25$ ; 2)  $4/5$ ; 3)  $25/16$ ; 4)  $5/4$ .

**11.** Дві електричні лампочки з'єднано паралельно. Опір першої дорівнює  $360 \text{ Ом}$ , другої —  $240 \text{ Ом}$ . Яка із лампочок споживає більшу потужність та у скільки разів?

1) Перша, в  $3/2$  раза; 2) перша, в  $2/3$  раза; 3) друга, в  $2/3$  раза; 4) друга в  $3/2$  раза.

**12.** У коло з напругою  $120 \text{ В}$  увімкнено дві електричні лампочки з однаковими опорамі, по  $200 \text{ Ом}$  кожна. Коли лампочки з'єднано послідовно, у колі виділяється така потужність:

1)  $144 \text{ Вт}$ ; 2)  $72 \text{ Вт}$ ; 3)  $36 \text{ Вт}$ ; 4)  $18 \text{ Вт}$ .

**13.** У коло з напругою  $120 \text{ В}$  увімкнено дві електричні лампочки з однаковими опорамі, по  $200 \text{ Ом}$  кожна. Коли лампочки з'єднано паралельно, у колі виділяється така потужність:

1)  $144 \text{ Вт}$ ; 2)  $72 \text{ Вт}$ ; 3)  $36 \text{ Вт}$ ; 4)  $18 \text{ Вт}$ .

**14.** Кількість теплоти, що виділяється за  $1 \text{ хв}$  у провіднику з опором  $20 \text{ Ом}$ , ввімкненому в мережу з напругою  $200 \text{ В}$ , така:

1)  $120 \text{ кДж}$ ; 2)  $60 \text{ кДж}$ ; 3)  $1 \text{ кДж}$ ; 4)  $100 \text{ кДж}$ ; 5) інша відповідь.

### ***Е-6.3. Висновки з теми***

1. Потужність — це робота, виконувана за одиницю часу.

2. Під час протікання струму по провіднику робота електричного струму витрачається на збільшення внутрішньої енергії провідника, і провідник нагрівається.

3. Електролітами називають речовини, які хімічно розкладаються на складові частини, коли через них проходить електричний струм.

4. Носіями заряду в електролітах виступають іони.

5. Струм в електролітах підпорядкований закону Ома.

6. Електролізом називається процес виділення на електродах речовини під час проходження струму через електроліт.

### ***Е-6.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** Генератор і споживач перебувають на відстані  $500 \text{ м}$  один від одного. Напруга і потужність споживача відповідно дорівнюють  $400 \text{ В}$  і  $10 \text{ кВт}$ . Визначити спад напруги в мідних провідниках із площею перерізу  $26 \text{ мм}^2$ , які з'єднують генератор зі споживачем.

**Дано:**

$$P = 10 \text{ кВт} = 10 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$

$$U_{\text{сп}} = 400 \text{ В};$$

$$S = 26 \text{ мм}^2 = 26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$l = 500 \text{ м};$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

---

$$U_{\text{пр}} - ?$$

**Розв'язання**

Потужність споживача визначається за формулою

$$P = IU_{\text{сп}}.$$

Сила струму, який протікає в колі, дорівнює

$$I = \frac{P}{U_{\text{сп}}}.$$

Спад напруги в мідних провідниках визначається так:

$$U_{\text{пр}} = IR_{\text{пр}}.$$

Опір мідного провідника

$$R_{\text{пр}} = \rho \frac{l}{S}.$$

Звідси дістаємо:

$$U_{\text{пр}} = \frac{P}{U_{\text{сп}}} \rho \frac{l}{S}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[U] = \left[ \frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{В}^2 \cdot \text{Ом}}{\text{В}} \right] = [\text{В}].$$

Виконуємо обчислення:

$$U_{\text{пр}} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 500}{400 \cdot 26 \cdot 10^{-6}} = 8,5 \text{ В}.$$

**Відповідь.** Спад напруги дорівнює 8,5 В.

**Задача 2.** Енергія іонізації атомів ртуті дорівнює 10,4 еВ. З якою найменшою швидкістю має летіти електрон, щоб відбулась іонізація атома ртуті при ударі?

**Дано:**

$$W_i = 10,4 \text{ еВ} = 16,64 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

---

$$v_{\text{min}} - ?$$

**Розв'язання**

Для того щоб іонізувати атом ртуті, електрон повинен мати кінетичну енергію, яка дорівнює енергії іонізації:

або

$$W_k = W_i,$$

$$\frac{m_e v_{\min}^2}{2} = W_1.$$

Швидкість електрона визначатиметься так:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2W_1}{m}}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[v_{\min}] = \left[ \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} \right] = \left[ \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} \right] = \left[ \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} \right] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot 16,64 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 1,9 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Відповідь.** Найменша швидкість електрона дорівнює  $1,9 \cdot 10^6$  м/с.

**Задача 3.** Електрокип'ятильник, опір спіралі якого дорівнює 160 Ом, помістили в посудину з 0,5 л води за температури 20 °С й увімкнули в мережу напругою 220 В. Через 20 хв кип'ятильник вимкнули. Яка кількість води википіла, якщо ККД електрокип'ятильника дорівнює 80 %?

*Дано:*

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

$$m = 0,5 \text{ кг};$$

$$t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ К};$$

$$t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C} = 373 \text{ К};$$

$$U = 220 \text{ В};$$

$$\tau = 20 \text{ хв} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ с};$$

$$c = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$R = 160 \text{ Ом}$$

$$m_1 \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

ККД електрокип'ятильника визначимо за формулою

$$\eta = \frac{Q_k}{Q_3}.$$

Корисна теплота йде:

1) на нагрівання води від  $T_1$  до  $T_2$ :

$$Q_1 = cm(T_1 - T_2);$$

2) на перетворення деякої частини води на пару:

$$Q_2 = rm_1,$$

де  $m_1$  — маса води, яка перетворюється на пару.

За законом Джоуля—Ленца під час роботи кип'ятильника виділяється така кількість теплоти:

$$Q_3 = \frac{U^2}{R} \cdot \tau.$$

За законом збереження і перетворення енергії вона витрачається на нагрівання води і випаровування деякої її кількості, тобто

$$Q_к = Q_1 + Q_2.$$

Тоді ККД електрокип'ятильника визначатиметься за формулою:

$$\eta = \frac{[cm(T_2 - T_1) + rm_1]R}{U^2\tau},$$

звідки маса води, що википіла, дорівнює:

$$m_1 = \frac{\eta \cdot U^2\tau - cm(T_2 - T_1)R}{rR}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[m_1] = \left[ \frac{\text{В}^2 \cdot \text{с}}{(\text{Дж/кг}) \cdot \text{Ом}} \right] = \left[ \frac{\text{В}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{А}}{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}} \right] = [\text{кг}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{0,8 \cdot 220^2 \cdot 1,2 \cdot 10^3 - 4,2 \cdot 10^3 \cdot 0,5(373 - 293) \cdot 160}{2,3 \cdot 10^6 \cdot 160} = \\ &= 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ кг}. \end{aligned}$$

**Відповідь.** Википіло 53 г води.

**Задача 4.** В електричний чайник налили  $600 \text{ см}^3$  води температурою  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  і забули вимкнути. Споживана напруга в мережі дорівнює  $220 \text{ В}$ , опір спіралі чайника  $16 \text{ Ом}$ , ККД —  $60 \%$ . Визначити час, за який википить уся вода після ввімкнення чайника.

**Дано:**

$$V = 600 \text{ см}^3 = 600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$t_1 = 0^\circ \text{ С};$$

$$R = 16 \text{ Ом};$$

$$U = 220 \text{ В};$$

$$\eta = 60 \%;$$

$$t_2 = 100^\circ \text{ С};$$

$$c = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$r = 2260 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг};$$

$$\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$\tau - ?$$

**Розв'язання**

ККД чайника визначається за формулою:

$$\eta = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{в}}},$$

де  $Q_{\text{к}}$  і  $Q_{\text{в}}$  — відповідно корисна і витрачена кількість теплоти.

Корисна кількість теплоти

$$Q_{\text{к}} = cm(t_2 - t_1) + rm.$$

Витрачена кількість теплоти визначається за законом Джоуля — Ленца:

$$Q_{\text{в}} = \frac{U^2}{R} \tau.$$

Виконавши відповідні перетворення, дістанемо:

$$\eta = \frac{(cm(t_2 - t_1) + rm)R}{U^2 \tau}.$$

Масу води визначимо так:

$$m = \rho \cdot V.$$

Остаточно час википання води визначатиметься за формулою:

$$\tau = \frac{(c(t_2 - t_1) + r)R\rho V}{\eta U^2}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$\tau = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{Ом}}{\text{В}^2} \right] = \left[ \frac{\text{В}^2 \cdot \text{Ом} \cdot \text{с}}{\text{В}^2 \cdot \text{Ом}} \right] = [\text{с}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{(4190 \cdot 100 + 2260 \cdot 10^3) \cdot 16 \cdot 1000 \cdot 600 \cdot 10^{-6}}{0,6 \cdot 220^2} = \\ &= 885,6 \text{ с} = 14,75 \text{ хв.} \end{aligned}$$

**Відповідь.** Уся вода википіла через 14,75 хв.

**Задача 5.** Скільки нікелю виділиться при електролізі за 1 год при силі струму 10 А, якщо відомо, що молярна маса нікелю 0,0587 кг/моль, а валентність нікелю 2?

*Дано:*

$$t = 1 \text{ год} = 3600 \text{ с}$$

$$I = 10 \text{ А};$$

$$A = 5,87 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль};$$

$$n = 2;$$

$$F = 96485 \text{ Кл/моль}$$

$m$  — ?

*Розв'язання*

За законом Фарадея

$$m = kIt,$$

де  $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}$  згідно із другим законом Фарадея для електролізу.

Тоді маса нікелю, яка виділилася на електроді, дорівнює

$$m = \frac{AI}{Fn} \cdot t.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[m] = \left[ \frac{\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{Кл/моль}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{Кл}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{Кл} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{с}} \right] = [\text{кг}].$$

Виконуємо обчислення:

$$m = \frac{5,87 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 3600}{96485 \cdot 2} = 1,095 \cdot 10^{-2} \text{ кг}.$$

**Відповідь.** Виділиться 11 г нікелю.

**Задача 6.** При електролізі розчину  $\text{ZnSO}_4$  було витрачено 20 гВт · год енергії. Визначити масу цинку, яка виділилася на електроді, якщо напруга на затискачах електродів дорівнює 4 В.

*Дано:*

$$W = 20 \text{ гВт} \cdot \text{год} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$U = 4 \text{ В};$$

$$k = 0,34 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$$

$m$  — ?

*Розв'язання*

За законом Фарадея

$$m = kIt.$$

Витрачена на електроліз енергія дорівнює роботі електричного струму, яка визначається за формулою:

звідки

$$W = A = IUt,$$

$$It = \frac{A}{U} = \frac{W}{U}.$$

Тоді маса цинку, яка виділилася на електроді, дорівнює

$$m = k \frac{W}{U}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[m] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{В}} \right] = [\text{кг}].$$

Визначимо енергію в джоулях:

$$W = 20 \text{ гВт} \cdot \text{год} = 20 \cdot 100 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 72 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Виконуємо обчислення:

$$m = 0,34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{7,2 \cdot 10^6}{4} = 0,612 \text{ кг}.$$

**Відповідь.** На електроді виділилося 612 г цинку.

**Задача 7.** Коли в зовнішньому колі протікає струм 30 А, в ньому виділяється потужність 180 Вт, а коли протікає струм 10 А, виділяється потужність 100 Вт. Визначити внутрішній опір і ЕРС джерела струму.

**Дано:**

$$\begin{aligned} I_1 &= 30 \text{ А}; \\ P_1 &= 180 \text{ Вт}; \\ I_2 &= 10 \text{ А}; \\ P_2 &= 100 \text{ Вт} \end{aligned}$$

$$r \text{ — ? } \quad \varepsilon \text{ — ?}$$

**Розв'язання**

Сили струму в обох випадках визначимо за законом Ома для замкненого кола:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}; \quad \text{та} \quad I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r}.$$

ЕРС джерела струму визначатиметься так:

$$\varepsilon = I_1 R_1 + I_1 r; \quad \varepsilon = I_2 R_2 + I_2 r.$$

Прирівняємо ці рівняння

$$I_1 R_1 + I_1 r = I_2 R_2 + I_2 r.$$

Внутрішній опір джерела струму визначимо за формулою:

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

Опори  $R_1$  і  $R_2$  визначимо так:

$$P_1 = I_1^2 R_1 \text{ тоді } R_1 = \frac{P_1}{I_1^2};$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 \text{ тоді } R_2 = \frac{P_2}{I_2^2}.$$

Отже, внутрішній опір джерела струму визначатиметься так:

$$r = \frac{I_2 \frac{P_2}{I_2^2} - I_1 \frac{P_1}{I_1^2}}{I_1 - I_2} = \frac{\frac{P_2}{I_2} - \frac{P_1}{I_1}}{I_1 - I_2}.$$

Щоб визначити ЕРС джерела струму, скористаємося законом Ома:

$$\varepsilon = I_1 R_1 + I_1 r;$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[r] = \left[ \frac{\text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{А}} \right] = [\text{Ом}].$$

Виконуємо обчислення:

$$r = \frac{\frac{100}{30} - \frac{180}{10}}{10 - 30} = \frac{4}{20} = 0,2 \text{ Ом};$$

$$\varepsilon = \frac{180}{10} + 10 \cdot 0,2 = 12 \text{ В}.$$

**Відповідь.** Внутрішній опір джерела струму дорівнює 0,2 Ом, ЕРС — 12 В.

**Задача 8.** Коли в колі протікає струм 2 А, то ККД джерела струму дорівнює 0,75. Визначити внутрішній опір джерела струму, якщо ЕРС джерела дорівнює 8 В.



**Дано:**

$$\varepsilon = 8 \text{ В};$$

$$I = 2 \text{ А};$$

$$\eta = 0,75$$

$$r = ?$$

**Розв'язання**

Корисну потужність електричного струму, яка виділяється на зовнішньому опорі, визначимо за формулою

$$P_{\text{к}} = I^2 R.$$

Загальна потужність джерела струму визначається так:

$$P_3 = I\varepsilon.$$

ККД джерела струму дорівнює

$$\eta = \frac{A_{\text{к}}}{A_3} = \frac{P_{\text{к}}}{P_3} = \frac{I^2 R}{I\varepsilon} = \frac{IR}{\varepsilon}.$$

Тоді зовнішній опір такий:

$$R = \frac{\varepsilon\eta}{I}.$$

За законом Ома для замкненого кола маємо:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}.$$

Тоді

$$R+r = \frac{\varepsilon}{I}.$$

Звідси внутрішній опір джерела струму дорівнює:

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - R.$$

Підставивши  $R$ , дістанемо:

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - \frac{\varepsilon\eta}{I}$$

або

$$r = \frac{\varepsilon}{I}(1-\eta).$$

Виконуємо обчислення:

$$r = \frac{8(1-0,75)}{2} = 1,1 \text{ Ом}.$$

**Відповідь.** Внутрішній опір джерела струму дорівнює 1,1 Ом.

**Задача 9.** Ліфт масою 1,8 т піднімається на висоту 25 м за 1 хв. ККД електродвигуна дорівнює 90 %, а напруга на його клеммах становить 220 В. Визначити потужність електродвигуна та електричну енергію, яку потрібно витратити на один підйом ліфта.

*Дано:*

$$m = 1,8 \text{ т} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ кг};$$

$$h = 25 \text{ м};$$

$$t = 1 \text{ хв} = 60 \text{ с};$$

$$U = 220 \text{ В};$$

$$\eta = 90 \%$$

---

$$P - ? \quad E - ?$$

*Розв'язання*

ККД двигуна визначається як відношення корисної роботи до всієї виконаної:

$$\eta = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{в}}}.$$

Корисна робота:

$$A_{\text{к}} = mgh.$$

Уся виконана робота визначається так:

$$A_{\text{в}} = Pt.$$

Тоді ККД електродвигуна

$$\eta = \frac{mgh}{Pt}.$$

Звідси знаходимо потужність, споживану електродвигуном:

$$P = \frac{mgh}{\eta t}.$$

Електрична енергія, витрачена на один підйом ліфта, визначається так:

$$E = Pt.$$

Виконуємо обчислення:

$$P = \frac{1,8 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 25}{0,9 \cdot 60} = 8167 \text{ Вт};$$

$$E = 8167 \cdot 60 = 490 \text{ кДж}.$$

**Відповідь.** Потужність двигуна дорівнює 8167 Вт; на один підйом витрачається 490 кДж енергії.

### ***Е-6.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**6-1.** Від генератора з ЕРС 250 В та внутрішнім опором 0,1 Ом необхідно протягти до споживача двопроводову лінію завдовжки 100 м. Визначити масу алюмінію, необхідного для її виготовлення, якщо максимальна потужність споживача 22 кВт і він розрахований на напругу 220 В. (5 кг)

**6-2.** Потужність споживача дорівнює 10 кВт за напруги 400 В. Визначити спад напруги на мідних проводах лінії передач, якщо площа перерізу проводу дорівнює 26 мм<sup>2</sup>, а відстань від генератора до споживача — 500 м. (18 В)

**6-3.** Визначити внутрішній опір джерела струму, якщо при збільшенні зовнішнього опору від 3 до 10,5 Ом ККД джерела збільшується вдвічі. (у 4 рази)

**6-4.** Два провідники перший раз з'єднують послідовно, а другий — паралельно і підмикають до джерела струму з внутрішнім опором  $2R$ . Визначити відношення потужностей, які виділяються в зовнішньому колі в обох випадках, якщо опір кожного провідника дорівнює  $R$ .  $\left(\frac{P_1}{P_2} = \frac{25}{16}\right)$

**6.5.** Визначити силу струму короткого замикання, якщо при протіканні струму силою 5 А в колі виділяється потужність 9,5 Вт, а при протіканні струму силою 8 А — потужністю 14,4 Вт. (62,6 А)

**6.6** За який час підйомний кран піднімає вантаж масою 5 т на висоту 3 м, якщо сила постійного струму у двигуні дорівнює 60 А при напрузі 220 В? ККД крана — 80 %. (14 с)

**6-7.** Скільки часу триває нанесення на виріб олова масою 650 мг при силі струму 1,8 А? (582 с)

**6-8.** Деталь потрібно покрити шаром хрому завтовшки 50 мкм. Скільки часу потрібно для цього, якщо густина струму під час хромування дорівнює 2 кА/м<sup>2</sup>? (16,7 хв)

**6-9.** Визначити опір розчину сірчаної кислоти, коли відомо, що під час проходження струму за 2 год виділилося 0,72 г водню. Кількість енергії, витраченої на нагрівання електроліту, дорівнює  $667 \cdot 10^5$  Дж. (1 Ом)

**6-10.** Скільки витрачається електроенергії на виділення 1 кг алюмінію, якщо електроліз ведеться при напрузі 10 В, ККД установки дорівнює 0,8? (134,4 МДж)

**6-11.** На пластину площею 48 см<sup>2</sup> впродовж 4 год наноситься шар металу. Визначити товщину шару металу, яким покрили пластину, якщо його густина дорівнює 8800 кг/м<sup>3</sup>, молярна маса  $58,7 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, валентність 2. Електроліз триває при силі струму 0,15 А. (16 мкм)

**6.12.** Електровоз рухається зі сталою швидкістю 43,2 км/год, розвиваючи середню силу тяги 43,7 кН. Визначити силу струму, споживану двигуном, якщо він перебуває під напругою 1500 В. ККД двигуна 92 %. (380 А)

**6-13.** Яку мінімальну швидкість повинен мати електрон, щоб іонізувати атом водню? Потенціал іонізації атома водню — 13,5 В. ( $2,2 \cdot 10^6$  м/с)

### *Е-6.6. Задачі для самостійного розв'язування*

**6-14.** Електровоз масою 300 т рухається вниз із гори зі швидкістю 72 км / год. Нахил гори становить 1 м на кожні 100 м шляху. Коефіцієнт опору руху 0,02, напруга в лінії 3 кВ, ККД електровоза 80 %. Визначити силу струму, що проходить через мотор електровоза. (240 А)

**6-15.** Трамвайний вагон масою 10 т за 10 с набуває швидкості 36 км/год. Визначити силу струму в кожному з двох однакових двигунів, якщо напруга в електричній мережі дорівнює 600 В, коефіцієнт тертя становить 0,02. (50 А)

**6-16.** Напруга в електричній мережі міста становить 220 В. Електрична енергія подається до будинку на відстань 50 м. Визначити переріз мідних з'єднувальних провідників, коли відомо, що при підімкненні 100 лампочок потужністю 75 Вт і 50 лампочок потужністю 25 Вт напруга на лампочках становить 210 В. ( $7,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>)

**6-17.** До джерела струму з ЕРС 140 В на відстані 400 м підімкнемо лампочку, розраховану на напругу 120 В, що має потужність 100 Вт. На скільки зміниться спад напруги на лампочці, якщо паралельно з нею підімкнути другу таку саму лампочку? Питомий опір проводів 0,028 мкОм · м, площа перерізу 1 мм<sup>2</sup>. (Зменшиться на 14 В)

**6-18.** Якої довжини потрібно взяти провід з нікелю площею перерізу 0,84 мм<sup>2</sup>, щоб виготовити нагрівач на 220 В, за допомогою якого можна було б нагріти 2 л води від 20 °С до кипіння за 10 хв? ККД нагрівача становить 80 %? (69 м)

**6-19.** У посудині міститься 1 л води і 50 г льоду в термодинамічній рівновазі. У воду опускають нагрівач потужністю 500 Вт, теплова віддача якого становить 60 %. За який час закипить вода? Теплоємністю посудини знехтувати. (25 хв)

**6-20.** Електровоз рухається зі сталою швидкістю 43,2 км/год, розвиваючи середню силу тяги 43,7 кН. Визначити силу струму, яку споживає двигун, якщо він перебуває під напругою 1500 В. ККД двигуна — 92 %. (380 А)

**6-21.** Підйомний кран рівномірно піднімає на висоту 10 м вантаж масою 0,5 т за 20 с. Двигун крана працює під напругою 220 В. Визначити потужність двигуна і силу струму, який він споживає, якщо ККД установки дорівнює 0,8? (3,1 кВт; 14 А)

**6-22.** Визначити довжину та площу перерізу ніхромового проводу, з якого потрібно виготовити нагрівач, що має потужність 480 Вт і призначений для вмикання в мережу 120 В. Припустима густина струму — 10 А/мм<sup>2</sup>. (11 м; 0,4 мм<sup>2</sup>)

**6-23.** Скільки часу триває нанесення на виріб шару срібла масою 210 мг при силі струму 0,86 А? (3,6 хв)

**6-24.** Скільки алюмінію можна отримати електрохімічним способом, витративши 100 кВт·год енергії. Напруга між електродами 6 В. ККД установки — 80 %. (4,5 кг)

**6-25.** Визначити потужність електричного струму в електролітичній ванні, якщо за 1 год в ній виділяється 15 кг алюмінію. Напруга на затискачах електродів дорівнює 4,8 В. (215 кВт)

**6-26.** Струм у 2 А впродовж 5 год пропускають через розчин солі срібла. Катодом слугують 10 ложок, кожна з яких має площу поверхні 50 см<sup>2</sup>. Визначити товщину шару срібла. ( $7,7 \cdot 10^{-5}$  м)

**6-27.** У двох електролітичних ваннах, з'єднаних послідовно, є розчин мідного купоросу й золота. Скільки виділиться тривалентного золота, якщо на катоді відклалося 2 г міді? Скільки атомів міді й золота виділилося на катодах? (4 г;  $1,89 \cdot 10^{22}$ ;  $1,22 \cdot 10^{21}$ )

### E-7.1. Теоретичні відомості

Експериментально встановлено, що два паралельні провідники, які перебувають на деякій відстані, один від одного, притягуються, якщо в них протікають струми в одному напрямі. І, навпаки, відштовхуються, якщо струми протікають в різних напрямках. Тобто кожний провідник зі струмом створює у просторі навколо себе поле, яке діє на інший провідник зі струмом. Таке поле називається *магнітним*.

**Магнітне поле — невід’ємний супутник електричного струму. А оскільки електричний струм — це напрямлений рух електричних зарядів, то магнітне поле виникає як навколо провідника зі струмом, так і навколо електричного заряду або зарядженого тіла, що рухається.**

Магнітне і електричне поля мають як схожі, так і відмінні характеристики. Тому є сенс розглянути саме порівняльну характеристику цих полів.

Магнітне поле, так само як електричне, зображується лініями, які називаються лініями індукції магнітного поля. *Лінія індукції магнітного поля* — це лінія, дотична до якої в кожній точці збігається з напрямом вектора магнітної індукції. *Лінії магнітної індукції замкнені і лежать у площині, перпендикулярній до площини провідника зі струмом.* Тому магнітне поле називається *вихровим*. Лінії електричного поля, як пам’ятаємо, не замкнені і мають початок та кінець, тобто електричне поле безвихрове.

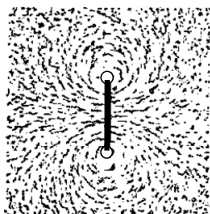


Рис. E-7.1

На рис. E-7.1 подано лінії магнітного поля провідника, який має форму кола. Ці лінії стали видимими завдяки залізним ошуркам, які розташувалися вздовж них.

Як побудувати лінії магнітної індукції і визначити напрям вектора магнітної індукції магнітного поля в будь-якій точці поля, створеного нескінченно довгим прямолінійним провідником зі струмом? Нехай струм у провіднику тече так, як зображено на рис. Е-7.2, і потрібно визначити напрям вектора магнітної індукції в точці  $M$ . Провідник лежить у площині сторінки. У площині, перпендикулярній до площини сторінки, потрібно через точку  $M$  провести коло, центр якого міститься на осі провідника.

Далі правий гвинт потрібно обертати так, щоб напрям його поступального руху збігався зі напрямом струму в провіднику. Тоді напрям обертання правого гвинта збігається зі напрямом лінії магнітної індукції. Вектор магнітної індукції — дотична до кола в точці  $M$ .

Модуль вектора магнітної індукції магнітного поля, створеного нескінченно довгим провідником зі струмом, визначається за формулою:

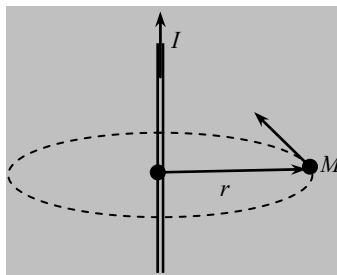


Рис. Е-7.2

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r},$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнітна стала;  $\mu$  — магнітна проникність середовища;  $I$  — сила струму, який створює магнітне поле;  $r$  — відстань від провідника зі струмом до точки поля. Одиниця магнітної індукції — Тл.

Модуль вектора напруженості магнітного поля визначається так:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu}.$$

Його напрям збігається із напрямом вектора магнітної індукції.

Якщо магнітне поле створюють кілька нескінченно довгих провідників зі струмом, то результуючий вектор магнітної індукції визначається так само за принципом суперпозиції полів, як і для електричного поля:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

Якщо напрям і модуль вектора магнітної індукції сталі в усіх точках магнітного поля, то таке поле називається **однорідним**.

## Магнітні властивості речовини

Кількісною характеристикою магнітних властивостей речовини виступає відносна **магнітна проникність середовища**  $\mu$ . Вона показує, у скільки разів модуль вектора магнітної індукції  $B$  всередині речовини більший або менший за модуль вектора магнітної індукції  $B_0$  того самого поля у вакуумі:

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

Залежно від значення  $\mu$  усі речовини можна поділити на такі групи:

- діамагнетики, для яких  $\mu < 1$ ;
- парамагнетики, для яких  $\mu \geq 1$ ;
- феромагнетики, для яких  $\mu \gg 1$ .

**Діамагнетики** — це речовини, магнітні моменти атомів яких за відсутності магнітного поля дорівнюють нулю. Після внесення такої речовини в зовнішнє магнітне поле всередині речовини виникає власне магнітне поле, напрямлене протилежно зовнішньому. Тоді поле в діамагнетиках стає меншим від зовнішнього магнітного поля.

**Парамагнетики** — це речовини, атоми яких мають власні магнітні моменти. Після внесення такої речовини в зовнішнє магнітне поле всередині речовини виникає власне магнітне поле, напрям якого збігається з напрямом зовнішнього магнітного поля. Результуюче магнітне поле в парамагнетиках підсилюється.

**Феромагнетики** — це речовини, які всередині мають окремі сильно намагнічені області. Ці області називаються **доменами** і зазвичай мають правильну форму. Власне магнітне поле феромагнетиків може в сотні разів перевищувати зовнішнє магнітне поле; феромагнетики — це сильно магнітні середовища. Із них виготовляють осердя трансформаторів, деталі електродвигунів, постійні магніти.

### Дія магнітного поля на провідник зі струмом

Оскільки магнітне поле в просторі створюється провідником зі струмом, зрозуміло, що й наявне вже в просторі магнітне поле має діяти на внесений в це поле провідник зі струмом. Таку дію експериментально виявив Ампер, тому сила, з якою діє магнітне поле на провідник зі струмом, називається силою Ампера.



**Модуль сили Ампера** визначається так:

$$F_A = IBl \sin \alpha,$$

де  $l$  — довжина провідника зі струмом;  $\alpha$  — кут між напрямом струму в провіднику і напрямом вектора магнітної індукції.

Проаналізуємо цей закон.

1. Кут  $\alpha = 0$ , тоді і сила Ампера дорівнює нулю ( $F_A = 0$ ), тобто на провідник зі струмом сила не діє. Отже, якщо провідник зі струмом перебував у стані спокою або рухався рівномірно, його стан не зміниться. Пам'ятаємо, що за другим законом Ньютона сила завжди спричинює прискорення.

2. Кут  $\alpha = \pi$ , сила Ампера також дорівнює нулю ( $F_A = 0$ ). Маємо випадок згідно з п. 1.

3. Кут між напрямом струму у провіднику і напрямом вектора магнітної індукції гострий ( $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ), тоді сила Ампера визначається так:

$$F_A = IBl \sin \alpha,$$

тобто провідник набуде деякого прискорення, і стан спокою або його швидкість зміниться.

4. Кут  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , тоді сила Ампера набуває максимального значення і дорівнює

$$F_A = IBl.$$

У цьому разі провідник набуває максимального прискорення.

Напрямок сили Ампера визначається за правилом **лівої руки** так: **вектор магнітної індукції має входити в долоню, чотири пальці мають бути напрямленими вздовж струму в провіднику, тоді відігнутий на  $90^\circ$  великий палець покаже напрям сили Ампера.**

Сила Ампера, вектор магнітної індукції і провідник зі струмом утворюють трійку взаємно перпендикулярних векторів.

### **Дія магнітного поля на рухомий електричний заряд**

Ми знаємо, що магнітне поле створюється також і рухомими зарядами. Магнітне поле діє тільки на заряд, що рухається в магнітному полі, тоді як електричне поле діє і на нерухомий, і на рухомий електричний заряд.

Сила, з якою магнітне поле діє на рухомий заряд, називається **силою Лоренца**. Її модуль визначається так:

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha,$$

де  $v$  — швидкість руху заряду;  $\alpha$  — кут між напрямом вектора магнітної індукції і напрямом швидкості руху заряду.

Проаналізуємо цей закон.

1. Кут  $\alpha = 0$ , тоді й сила Лоренца дорівнює нулю ( $F_{\text{Л}} = 0$ ), тобто на заряд сила не діятиме. Тоді швидкість руху заряду не змінюється, тобто він рухатиметься рівномірно (рис. Е-7.3, а).

2. Кут  $\alpha = \pi$ , сила Лоренца також дорівнює нулю ( $F_{\text{Л}} = 0$ ). Маємо випадок згідно з п.1 (рис. Е-7.3, б).

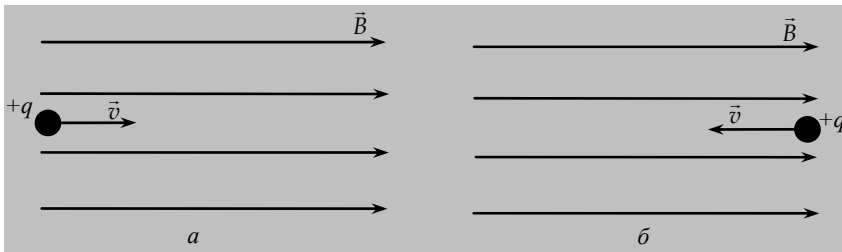


Рис. Е-7.3

3. Кут  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , тоді сила Лоренца набуває максимального значення і дорівнює

$$F_{\text{Л}} = qvB.$$

Для визначення напрямку сили Лоренца також можна скористатися правилом лівої руки: **вектор магнітної індукції має входити в долоню, чотири пальці мають бути напрямленими вздовж напрямку швидкості руху заряду, тоді відігнутий на  $90^\circ$  великий палець покаже напрям сили Лоренца.**

Проте потрібно пам'ятати, що це правило діє для позитивного заряду. Якщо заряд негативний, то визначаємо напрям сили Лоренца як для позитивного заряду і беремо протилежний напрям.

**Отже, сила Лоренца перпендикулярна до вектора швидкості руху заряду і вектора магнітної індукції.**

Оскільки сила Лоренца не виконує роботи, вона змінює тільки напрям швидкості руху заряду, а саме: *заряд рухатиметься по колу* (рис. Е-7.4).

На рис. Е-7.4 вектор магнітної індукції напрямлений перпендикулярно до площини сторінки від нас, тому він показаний хрестиками «+». Якщо вектор магнітної індукції напрямлений перпендикулярно до площини сторінки до нас, то його напрям показують крапками «•».

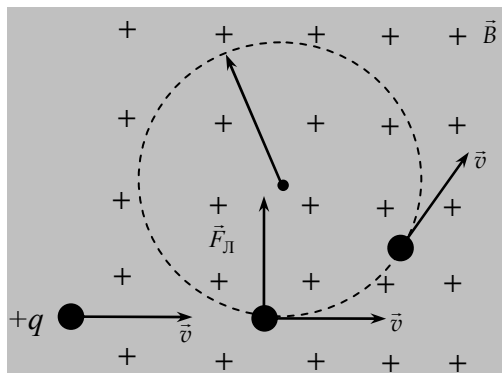


Рис. Е-7.4

За другим законом Ньютона сила завжди спричинює прискорення. Прискорення має такий самий напрям, як і сила. Тоді прискорення, з яким рухатиметься заряд, напрямлене перпендикулярно до швидкості його руху. Таке прискорення називається доцентровим, тому другий закон Ньютона запишемо так:

$$F_{\text{Л}} = ma_{\text{доц}},$$

або

$$qvB = m \frac{v^2}{R},$$

де  $m$  — маса зарядженої частинки;  $R$  — радіус траєкторії руху заряду.

Після перетворень радіус кола визначатиметься так:

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Період обертання зарядженої частинки по колу можна визначити за формулою:

$$T = \frac{2\pi R}{v},$$

або

$$T = 2\pi \frac{m}{qB}.$$

**Період обертання частинки не залежить від швидкості її руху.**

До речі, саме так вивчається в циклотронах рух заряджених частинок і розраховується їхній питомий заряд, за яким можна визначити вид частинки.

4. Кут між напрямом вектора швидкості заряду і напрямом вектора магнітної індукції гострий  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  (рис. Е-7.5), тоді модуль сили Лоренца

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha.$$

А як же рухатиметься заряд в магнітному полі? Тут можна провести аналогію з рухом тіла, кинутого під кутом до горизонту. Тобто вектор швидкості руху заряду можна розкласти на дві складові: уздовж осі  $x$  і осі  $y$ .

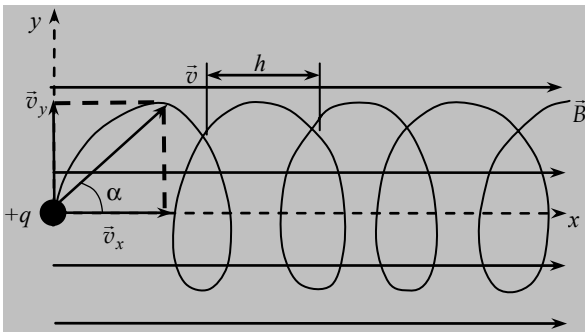


Рис. Е-7.5

Тут маємо одночасно випадки руху заряду згідно з п. 1 і 3. Комбінація таких двох рухів діє так, що заряд рухається по гвинтовій лінії, яка накручується на вектор магнітної індукції. Радіус гвинтової лінії визначає складова швидкості руху заряду  $v_x$ :

$$R = \frac{mv_x}{qB},$$

або

$$R = \frac{m}{qB} v \sin \alpha.$$

Крок гвинтової лінії визначає складова швидкості руху заряду  $v_y$  :

$$h = v_y T$$

або

$$h = 2\pi \frac{m}{qB} v \cos \alpha.$$

### ***Е-7.2. Завдання для поточного тестування***

**1.** Зазначити джерела магнітного поля:

- 1) нерухомий заряд; 2) провідник зі струмом; 3) рухомий заряд;
- 4) рухоме заряджене тіло.

**2.** Зазначити властивості магнітного поля:

- 1) ще одна форма існування матерії;
- 2) має фізичні властивості, так само як і речовина;
- 3) виникає в просторі навколо провідника зі струмом;
- 4) виникає у просторі навколо рухомого заряду;
- 5) виникає у просторі навколо нерухомого заряду;
- 6) лінії напруженості поля замкнені;
- 7) лінії напруженості поля незамкнені;
- 8) поле вихрове;
- 9) поле безвихрове;
- 10) поле діє на нерухомі заряди;
- 11) поле діє на рухомі заряди.

**3.** Дописати формулу  $B = \frac{???}{2\pi?}$  для визначення модуля вектора магнітної індукції магнітного поля, створеного нескінченно довгим провідником зі струмом:

- 1)  $r^2$ ; 2)  $\mu$  ; 3)  $\mu_0$ ; 4)  $r$ ; 5)  $I$ ; 6)  $q$ .

**4.** Дописати формулу  $F_A = ?? B \sin \alpha$  для визначення сили Ампера:

- 1)  $I$ ; 2)  $q$ ; 3)  $v$ ; 4)  $l$ .

5. Дописати формулу  $F_{\perp} = ?? B \sin \alpha$  для визначення сили Лоренца:

1)  $I$ ; 2)  $q$ ; 3)  $v$ ; 4)  $l$ .

6. Сила Ампера дорівнює нулю за умови:

1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

7. Траєкторія руху заряду в магнітному полі не змінюється за умови:

1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

8. Траєкторія руху заряду в магнітному полі має форму кола за умови:

1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

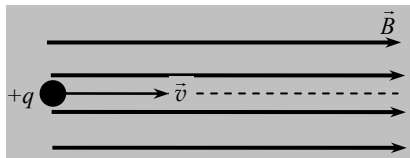
9. Траєкторія руху заряду в магнітному полі не змінюється за умови:

1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

10. Траєкторія руху заряду в магнітному полі має форму гвинтової лінії за умови:

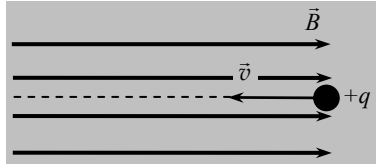
1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

11. Траєкторія руху заряду така, як зображено на рисунку, за умови:



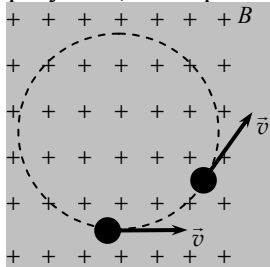
1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

12. Траєкторія руху заряду така, як зображено на рисунку, за умови:



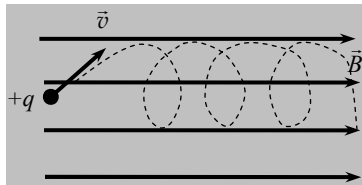
- 1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

13. Траєкторія руху заряду така, як зображено на рисунку, за умови:



- 1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

14. Траєкторія руху заряду така, як зображено на рисунку, за умови:



- 1)  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ; 2)  $\alpha = 0$ ; 3)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ; 4)  $\alpha = \pi$ .

15. Як називають одиницю магнітної індукції?

- 1) Тесла (Тл); 2) вебер (Вб); 3) вольт (В); 4) генрі (Гн).

16. Прямолінійний провідник, в якому тече струм 23 А, довжиною 0,8 м розміщений перпендикулярно до ліній магнітної індукції однорідного поля. Коли на провідник діє сила 1,84 Н, магнітна індукція магнітного поля, Тл, така:

- 1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) правильної відповіді тут немає.

17. На провідник, в якому тече струм 50 А, довжиною 0,1 м діє магнітне поле індукцією 10 мТл. Лінії магнітного поля і напрям струму взаємно перпендикулярні. Сила, з якою діє магнітне поле на провідник, мН, така:

1) 0,5; 2) 5; 3) 50; 4) 500; 5) правильної відповіді тут немає.

18. На прямий провідник довжиною 0,5 м, розміщений перпендикулярно до ліній магнітного поля індукцією  $2 \cdot 10^{-2}$  Тл, діє сила 0,15 Н. Сила струму, який тече в провіднику, А, така:

1) 5; 2) 10; 3) 15; 4) 20; 5) правильної відповіді тут немає.

19. Провідник довжиною 0,4 м, в якому тече струм 20 А, рухається перпендикулярно до ліній магнітної індукції, яка дорівнює 1,2 Тл. При переміщенні на 0,25 м робота, яка при цьому виконується, Дж, така:

1) 1,2; 2) 2,4; 3) 12; 4) 24; 5) правильної відповіді тут немає.

20. Прямолінійний провідник, в якому тече струм 4 А, довжиною 0,5 м перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією 2 Тл. Провідник розташовано під кутом  $30^\circ$  до вектора індукції магнітного поля. Сила Ампера, що діє на провідник з боку магнітного поля, така:

1) 4 Н; 2) 2Н; 3) 8Н; 4)  $2\sqrt{3}$  Н; 5) інша відповідь.

21. Заряджена частинка рухається зі швидкістю  $v$  у вакуумі в однорідному магнітному полі з індукцією  $B$  по колу радіуса  $R$ . Визначити радіус кола, якщо швидкість частинки дорівнює  $2v$ , а індукція магнітного поля  $2B$ .

1)  $R$ ; 2)  $2R$ ; 3)  $R/2$ ; 4)  $4R$ ; 5)  $R/4$ ; 6) інша відповідь.

22. У магнітному полі з індукцією 2 Тл рухається електричний заряд  $10^{-10}$  Кл зі швидкістю 4 м/с. Сила, що діє на заряд з боку магнітного поля, якщо вектор швидкості заряду перпендикулярний до вектора індукції магнітного поля, така:

1) 0; 2)  $8 \cdot 10^{-10}$  Н; 3)  $2 \cdot 10^{-10}$  Н; 4)  $0,5 \cdot 10^{-10}$  Н; 5)  $4 \cdot 10^{-10}$  Н; 6) інша відповідь.

23. Провідник зі струмом, який розташовано перпендикулярно до ліній індукції, переміщується в магнітному полі. Чи виконує магнітне поле при цьому роботу?

1) Виконує; 2) не виконує; 3) інша відповідь.



### *Е-7.3. Висновки з теми*

1. У природі існує єдина сутність — електромагнітне поле.
2. Магнітне поле діє тільки на рухомий заряд або провідник із струмом.
3. Магнітне поле — вихрове, тобто лінії магнітної індукції замкнені.
4. При будь-якій зміні в часі магнітного поля в просторі, який оточує магнітне поле, що змінюється, виникає вихрове електричне поле.
5. Вихрове електричне поле виникає незалежно від того, є в магнітному полі провідний контур чи немає.
6. Оскільки магнітне поле в просторі створює рухомий електричний заряд, то наявне вже в просторі магнітне поле діятиме на заряд, що рухається в полі.
7. Оскільки магнітне поле в просторі створює провідник зі струмом, зрозуміло, що й наявне вже в просторі магнітне поле має діяти на провідник зі струмом, внесений в це поле.
8. Дія магнітного поля на провідник зі струмом залежить від його розташування в магнітному полі.
9. Сила Лоренца діє тільки на заряд або заряджене тіло, які рухаються в магнітному полі в певному напрямі відносно вектора магнітної індукції.
10. Форма траєкторії руху частинки в магнітному полі залежить від орієнтації її швидкості відносно вектора магнітної індукції.
11. Період обертання частинки в магнітному полі не залежить від швидкості її руху, але залежить від модуля вектора магнітної індукції.

### *Е-7.4. Приклади розв'язування задач*

**Задача 1.** Два паралельні нескінченно довгі провідники, по яких в одному напрямі течуть електричні струми  $60\text{ А}$ , розміщено на відстані  $10\text{ см}$  один від одного. Визначити напрям та модуль вектора магнітної індукції магнітного поля в точці, розміщеній на відстані  $5\text{ см}$  від осі першого провідника і на відстані  $12\text{ см}$  від осі другого.

*Дано:*

$$I_1 = I_2 = 60\text{ А};$$

$$r = 10 \cdot 10^{-2}\text{ м};$$

$$r_1 = 5 \cdot 10^{-2}\text{ м};$$

$$r_2 = 12 \cdot 10^{-2}\text{ м}$$

$B$  — ?

*Розв'язання*

Нехай струми течуть у напрямі, перпендикулярному до площини аркуша (рис. 6), від нас. Відомо, що в такому разі напрям струму показують хрестиком. Нагадаємо, що протилежний напрям струму позначається точкою.

Згідно з принципом суперпозиції полів вектор індукції магнітного поля в точці С дорівнюватиме векторній сумі векторів індукції магнітних полів, створених кожним провідником окремо:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Знайдемо напрям вектора  $\vec{B}_1$ . Для цього сполучимо перший провідник на рис. 1 з точкою С. Поставимо ніжку циркуля на вісь першого провідника і побудуємо через точку С радіусом  $r_1$  коло — це є лінія магнітної індукції магнітного поля, створеного першим провідником. Відомо, що магнітне поле — вихрове, тому лінії магнітної індукції замкнені й розміщені в площині, перпендикулярній до площини, в якій міститься провідник. Тепер визначимо напрям лінії магнітної індукції. Скористаємось правилом правого гвинта: під час обертання правого гвинта його поступальний рух має збігатися із напрямом струму в провіднику. Тоді напрям обертання гвинта покаже напрям лінії магнітної індукції. На рис. 1 цей напрям показано стрілкою на колі. Вектор магнітної індукції  $\vec{B}_1$  — це дотична до лінії магнітної індукції в точці С. Аналогічно визначимо напрям вектора  $\vec{B}_2$ . Векторна сума векторів  $\vec{B}_1$  та  $\vec{B}_2$  подає вектор індукції  $\vec{B}$  магнітного поля в точці С.

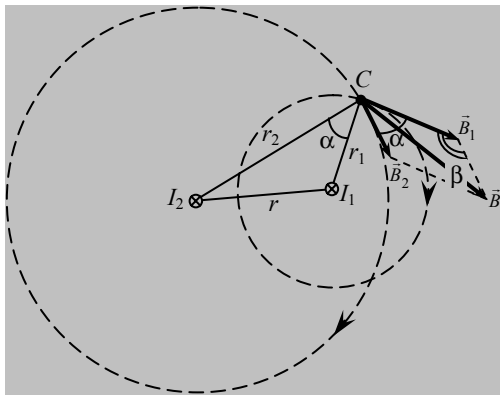


Рис. 1.

Визначимо модуль вектора  $\vec{B}$  за теоремою косинусів:

$$B^2 = B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cos \beta,$$

причому  $\beta = 180 - \alpha$ . Кут  $\alpha$  визначимо з трикутника:

$$r^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha.$$

тоді

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - r^2}{2r_1r_2}.$$

Модулі векторів  $\vec{B}_1$  та  $\vec{B}_2$  визначаються за формулами:

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi r_1} \quad \text{та} \quad B_2 = \frac{\mu\mu_0 I_2}{2\pi r_2}.$$

Після підставлень та перетворень маємо формулу для визначення модуля вектора  $\vec{B}$  ( $\mu=1$ ):

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_2}\right)^2} + 2 \cdot \frac{1}{r_1 r_2} \cdot \frac{r_1^2 + r_2^2 - r^2}{2r_1 r_2}.$$

Виконаємо обчислення:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{25 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{144 \cdot 10^{-4}}} + \frac{2}{60 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{23 \cdot 10^{-4}}{40 \cdot 10^{-4}} = 3,08 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

**Відповідь.** Модуль вектора магнітної індукції дорівнює 0,308 мТл.

**Задача 2.** Соленоїд із залізним осердям, відносна магнітна проникність якого  $\mu = 400$ , має 1000 витків. На скільки потрібно збільшити кількість витків  $\Delta N$  соленоїда, щоб після вилучення осердя із соленоїда, магнітна індукція його магнітного поля не змінилися? Сила струму, який проходить через соленоїд не змінюється.

*Дано:*

$$\mu = 400;$$

$$N = 1000$$

$$\Delta N \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Магнітну індукцію магнітного поля соленоїда визначимо за формулою

$$B = \frac{\mu_0 \mu \cdot I \cdot N}{l},$$

де  $l$  — довжина соленоїда.

Магнітна індукція соленоїда без осердя, тобто коли  $\mu = 1$ , дорівнює

$$B_1 = \frac{\mu_0 I N}{l}.$$

За умовами задачі  $B = B_1$ , а отже, вилучивши осердя, необхідно збільшити кількість витків соленоїда на  $\Delta N$ , тобто

$$B_1 = \frac{\mu_0 I (N + \Delta N)}{l}.$$

Тоді

$$\frac{\mu_0 \mu N}{l} = \frac{\mu_0 I (N + \Delta N)}{l},$$

або

$$\mu N = N + \Delta N,$$

звідки

$$\Delta N = (\mu - 1) N.$$

Виконуємо обчислення:

$$\Delta N = (400 - 1) \cdot 1000 = 399\,000 \text{ витків.}$$

**Відповідь.** Кількість витків соленоїда треба збільшити на 399 000.

**Задача 3.** На лінійний провідник завдовжки 50 см, який перебуває в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 0,1 Тл, діє сила 0,05 Н. Визначити кут між напрямом струму та вектором магнітної індукції поля, якщо сила струму в провіднику дорівнює 2 А.

**Дано:**

$$\begin{aligned} B &= 0,1 \text{ Тл;} \\ l &= 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м;} \\ F_A &= 0,05 \text{ Н;} \\ I &= 2 \text{ А} \end{aligned}$$

$\alpha$  — ?

**Розв'язання**

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера, модуль якої визначимо за формулою

$$F_A = I l B \sin \alpha,$$

звідки

$$\sin \alpha = \frac{F_A}{I l B}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\sin \alpha] = \left[ \frac{H}{A \cdot m \cdot \frac{H}{A \cdot m}} \right] = \left[ \frac{H \cdot A \cdot m}{A \cdot m \cdot H} \right] = [1].$$

Виконуємо обчислення:

$$\sin \alpha = \frac{0,05}{2 \cdot 0,5 \cdot 0,1} = 5 \cdot 10^{-10} = 0,5,$$

$$\alpha = \arcsin 0,5 = 30^\circ$$

**Відповідь.** Кут між напрямом струму та вектором магнітної індукції дорівнює  $30^\circ$ .

**Задача 4.** Через два нескінченно довгі паралельні провідники, що перебувають один від одного на відстані 2 см, протікає однаковий струм 100 А. Визначити силу взаємодії провідників зі струмом, що припадає на одиницю довжини провідника.

*Дано:*

$$I = 100 \text{ А};$$

$$d = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$\mu = 1$$

$$\frac{F}{l} \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Сила, з якою магнітне поле провідника зі струмом  $I_1$  діє на провідник зі струмом  $I_2$ , визначається за формулою Ампера:

$$F_A = B_1 I_2 l \sin \alpha.$$

Магнітна індукція  $B_1$  магнітного поля, яке створює провідник зі струмом  $I_1$  на відстані  $d$  від нього, дорівнює

$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi d}.$$

Тоді сила, яка діє на одиницю довжини провідника  $I_2$ , дорівнює

$$\frac{F_A}{l} = \frac{\mu \mu_0 \cdot I_1 I_2}{2\pi d}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$\left[ \frac{F_A}{l} \right] = \left[ \frac{\text{Гн/м} \cdot \text{А} \cdot \text{А}}{\text{м}} \right] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$\frac{F}{l} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 100^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,02} = 0,1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

**Відповідь.** Сила взаємодії провідників зі струмом дорівнює 0,1 Н/м.

**Задача 5.** В однорідному полі з індукцією 0,01 Тл протон описав коло радіусом 10 см.. Визначити швидкість протона та період його обертання по колу.

**Дано:**

$$\begin{aligned} B &= 0,01 \text{ Тл}; \\ q &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \\ m &= 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}; \\ R &= 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м} \end{aligned}$$

---

$$v \text{ — ? } T \text{ — ?}$$

**Розв'язання**

На протон, який рухається в магнітному полі, діє сила Лоренца:

$$F_{\text{Л}} = Bqv \cdot \sin \alpha.$$

Оскільки протон рухається по колу, то  $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$ , тоді

$$F_{\text{Л}} = Bqv.$$

Ця сила напрямлена по радіусу до центра кола й надає протону доцентрового прискорення:

$$a_{\text{доц}} = \frac{v^2}{R}.$$

Тоді можна записати другий закон Ньютона так:

$$F_{\text{Л}} = ma_{\text{доц}} = m \frac{v^2}{R},$$

де  $m$  — маса протона.

Тоді

$$\frac{mv^2}{R} = Bqv.$$

Звідси

$$v = \frac{BqR}{m}.$$

Період обертання протона в однорідному магнітному полі знайдемо за формулою

$$T = \frac{2\pi R}{v}$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[v] = \left[ \frac{\text{Тл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{кг}} \right] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \frac{\text{Кл} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{с}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} \right] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right];$$

$$[T] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{м/с}} \right] = [\text{с}].$$

Виконуємо обчислення:

$$v = \frac{10^{-2} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,672 \cdot 10^{-27}} = 9,6 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$T = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1}{9,6 \cdot 10^4} = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

**Відповідь.** Швидкість протона дорівнює  $9,6 \cdot 10^4$  м/с; період його обертання по колу —  $6,5 \cdot 10^{-6}$  с.

**Задача 6.** Мідний провідник із струмом 2 А довжиною 20 см і площею перерізу  $2 \text{ см}^2$  розміщено в однорідному магнітному полі так, що кут між вектором магнітної індукції і напрямом струму в провіднику становить  $30^\circ$ . Визначити прискорення, з яким рухатиметься провідник в магнітному полі, якщо магнітна індукція дорівнює 0,2 Тл.

**Дано:**

$$I = 2 \text{ А};$$

$$l = 20 \text{ см} = 20 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$S = 2 \text{ см}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\alpha = 30^\circ;$$

$$B = 0,2 \text{ Тл};$$

$$\rho = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$a = ?$

**Розв'язання**

На провідник, розміщений в магнітному полі, діє сила Ампера, яка визначається за формулою:

$$F_A = IBl \sin \alpha.$$

За другим законом Ньютона сила Ампера створює прискорення:

$$F_A = ma.$$

Тоді можна записати так:

$$|B| \sin \alpha = ma.$$

Звідки прискорення, з яким рухатиметься провідник в магнітному полі, визначатиметься так:

$$a = \frac{|B| \sin \alpha}{m}.$$

Коли за умовами задачі відомі розміри і матеріал провідника, його масу можна визначити так:

$$m = \rho V.$$

Об'єм провідника такий:

$$V = Sl.$$

Тоді маса провідника дорівнюватиме:

$$m = \rho Sl.$$

Підставивши масу провідника у формулу для визначення його прискорення, матимемо:

$$a = \frac{|B| \sin \alpha}{\rho Sl}.$$

Перевіримо одиниці величини:

$$[a] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{М}^2 \cdot \text{М}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{М} \cdot \text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{М}^3} \right] = \left[ \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$a = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot \sin 30^\circ}{2 \cdot 10^{-4} \cdot 8900} = 0,11 \text{ м/с}^2.$$

**Відповідь.** Прискорення, з яким рухається провідник, дорівнює  $0,11 \text{ м/с}^2$ .

**Задача 7.** В однорідному магнітному полі у стані рівноваги перпендикулярно до вектора магнітної індукції перебуває горизонтальний прямий провідник довжиною  $0,2 \text{ м}$  і масою  $40 \text{ г}$ . Визначити індукцію магнітного поля, якщо струм в провіднику дорівнює  $10 \text{ А}$ .



**Дано:**

$$I = 10 \text{ А};$$

$$l = 0,2 \text{ м};$$

$$m = 40 \text{ г} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$B = ?$$

**Розв'язання**

На горизонтальний провідник, розміщений в магнітному полі перпендикулярно до вектора магнітної індукції полі, діє сила Ампера і сила тяжіння (рис. 2). За правилом лівої руки сила Ампера напрямлена вертикально вгору.

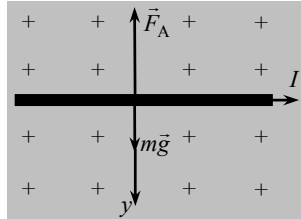


Рис. 2

Оскільки провідник перебуває у стані рівноваги, рівнодійна сили Ампера і сили тяжіння дорівнює нулю:

$$mg - F_A = 0.$$

Сила Ампера визначається за формулою:

$$F_A = IBl,$$

оскільки  $\sin \alpha = 1$ .

Тоді

$$IBl = mg.$$

Звідки магнітна індукція визначатиметься так:

$$B = \frac{mg}{Il}.$$

Перевіримо одиниці величини:

$$[B] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{м}} \right] = [\text{Тл}].$$

Виконуємо обчислення:

$$B = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8}{10 \cdot 0,2} = 0,196 \text{ Тл}.$$

**Відповідь.** Індукція магнітного поля дорівнює 0,196 Тл.

### *Е-7.5. Задачі для аудиторного розв'язування*

7-1. Напруженість магнітного поля в вакуумі дорівнює 79,6 кА/м. Визначити магнітну індукцію цього поля. (0,1 Тл)

7-2. По двох паралельних нескінченно довгих провідниках в одному напрямі течуть струми силою 20 і 30 А. Відстань між провідниками дорівнює 10 см. Визначити магнітну індукцію в точці, розташованій на відстані 10 см від кожного провідника. (87,2 мкТл)

7-3. Визначити напруженість та індукцію магнітного поля прямого нескінченно довгого провідника зі струмом у точці, яка розташована на відстані 4 м від провідника, якщо сила струму дорівнює 100 А. (4 А/м;  $5 \cdot 10^{-6}$  Тл)

7-4. Визначити відстань між двома паралельними провідниками, якщо при силі струму 120 А в кожному провіднику сила взаємодії між ними дорівнює 0,4 Н/м. (0,72 см)

7-5. На прямий провідник завдовжки 0,5 м, розміщений перпендикулярно до ліній магнітного поля з індукцією  $2 \cdot 10^{-2}$  Тл, діє сила 0,15 Н. Визначити значення сили струму, що протікає через провідник. (15 А)

7-6. На прямолінійний провідник завдовжки 50 см, який перебуває в однорідному магнітному полі, діє сила 0,0314 Н. Визначити кут між напрямом струму і вектором магнітної індукції, якщо сила струму у провіднику дорівнює 10 А, а напруженість поля —  $10^4$  А/м. ( $30^\circ$ )

7-7. По горизонтально розташованому провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г протікає електричний струм 10 А. Визначити індукцію магнітного поля, в яке треба помістити провідник, щоб він перебував у рівновазі. ( $2 \cdot 10^{-2}$  Тл)

7-8. В однорідному горизонтальному магнітному полі перебуває в рівновазі перпендикулярно до ліній поля горизонтальний прямолінійний алюмінієвий провідник зі струмом 10 А. Визначити індукцію поля, якщо радіус провідника дорівнює 2 мм. ( $3,4 \cdot 10^{-2}$  Тл)

7-9. У магнітному полі по горизонтальній площині рухається з прискоренням  $0,2 \text{ м/с}^2$  прямолінійний провідник площею перерізу  $1 \text{ мм}^2$ . По провіднику тече електричний струм 5 А, напрям якого перпендикулярний до ліній магнітного поля. Визначити індукцію магнітного поля. Тертям знехтувати. ( $1,1 \cdot 10^{-4}$  Тл)

7-10. Електрон зі сталою швидкістю  $10^7$  м/с влітає в однорідне магнітне поле з індукцією 20 мТл перпендикулярно до лінії індукції. Визначити радіус і період обертання електрона по колу. ( $2,8 \cdot 10^{-3}$  м;  $1,8 \cdot 10^{-9}$  Тл)

**7-11.** Протон рухається зі сталою швидкістю  $10^4$  м/с в однорідному магнітному полі перпендикулярно до лінії індукції, яка дорівнює 1 Тл. Визначити силу, яка діє на протон і радіус кола, по якому він рухається. ( $1,6 \cdot 10^{-11}$  Н; 1 м)

**7-12.** Двовалентний іон рухається зі швидкістю 480 км/год в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. Визначити масу іона, якщо він описує коло радіусом 10 см. ( $6,7 \cdot 10^{-25}$  кг)

**7-13.** Протон та електрон, рухаючись з однаковою швидкістю, потрапляють в однорідне магнітне поле перпендикулярно до лінії індукції. У скільки разів радіус кривини траєкторії протона більший, ніж радіус кривини траєкторії електрона? (у 1840 разів)

**7-14.** У магнітне поле, утворене у вакуумі, перпендикулярно до лінії магнітної індукції влітають електрони з енергією 1 еВ. Індукція магнітного поля — 1,26 мТл. Визначити силу Лоренца й радіус траєкторії електронів. ( $1,2 \cdot 10^{-16}$  Н;  $2,7 \cdot 10^{-3}$ )

### ***Е-7.6. Задачі для самостійного розв'язування***

**7-15.** Два нескінченно довгі паралельні провідники зі струмом перебувають на відстані 20 см один від одного. Визначити, на якій відстані від другого провідника вздовж прямої, перпендикулярної до осі кожного провідника, індукція магнітного поля дорівнює нулю. У провідниках течуть струми 16 і 20 А у протилежних напрямках. (0,4 м)

**7-16.** Через два паралельні нескінченно довгі провідники, відстань між якими 5 см, течуть в однаковому напрямку струми 10 А. Визначити напруженість магнітного поля в точці на відстані 5 см від кожного з провідників. (55 В/м)

**7-17.** Яка сила діє на провідник завдовжки 0,1 м, розміщений в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 2 Тл, якщо струм у провіднику — 5 А, а кут між напрямом струму та лініями індукції —  $30^\circ$ ? (0,5 Н)

**7-18.** В однорідному магнітному полі з індукцією 0,8 Тл на провідник зі струмом 30 А, довжина якого 10 см, діє сила 1,5 Н. Визначити кут між вектором магнітної індукції та провідником? ( $39^\circ$ )

**7-19.** На провідник зі струмом в однорідному магнітному полі, вектор магнітної індукції якого утворює з провідником кут  $27^\circ$ , діє сила  $2 \cdot 10^{-3}$  Н. Визначити модуль вектора магнітної індукції, якщо довжина провідника 50 см, опір провідника дорівнює 10 Ом, різниця потенціалів на його кінцях – 200 В. ( $4,4 \cdot 10^{-4}$  Тл)

**7-20.** На лінійний провідник завдовжки 50 см, який перебуває в однорідному магнітному полі, діє сила 0,0314 Н. Визначити кут між

напрямом струму і магнітного поля, якщо струм у провіднику дорівнює 10 А, а напруженість поля —  $10^4$  А/м. ( $30^\circ$ )

**7-21.** Електрон влітає в однорідне магнітне поле з індукцією  $1,4 \cdot 10^{-3}$  Тл зі швидкістю 500 км/с перпендикулярно до лінії індукції. Визначити силу, що діє на протон, і радіус кола, по якому він рухається. ( $1,1 \cdot 10^{-16}$  Н;  $4,06 \cdot 10^{-4}$  м)

**7-22.** В однорідному магнітному полі протон рухається зі швидкістю  $10^7$  м/с перпендикулярно до ліній магнітного поля з індукцією 1 Тл. Визначити силу, що діє на протон і радіус кола, по якому він рухається. ( $1,6 \cdot 10^{-12}$  Н; 0,104 м)

**7-23.** Пройшовши різницю потенціалів  $2 \cdot 10^3$  В, електрон влітає в однорідне магнітне поле з індукцією  $1,5 \cdot 10^{-4}$  Тл і рухається в ньому по колу радіусом 1 м. Визначити відношення заряду електрона до його маси. ( $1,8 \cdot 10^{11}$  кг/Кл)

**7-24.** Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією  $4 \cdot 10^{-3}$  Тл. Визначити частоту та період обертання електрона по коловій орбіті. ( $1,1 \cdot 10^8$  с $^{-1}$ ;  $8,9 \cdot 10^{-9}$  с)

**7-25.** Протон, прискорений в електричному полі різницею потенціалів  $1,5 \cdot 10^5$  В, влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції й рухається рівномірно по колу радіусом 0,6 м. Визначити швидкість протона, модуль вектора магнітної індукції та силу, з якою магнітне поле діє на протон. ( $5,4 \cdot 10^6$  м/с;  $9,3 \cdot 10^{-2}$  Тл;  $8 \cdot 10^{-14}$  Н)

**7-26.** Електрон, рухаючись зі швидкістю  $\vec{v}$ , потрапляє в однорідне магнітне поле, вектор індукції якого  $\vec{B}$  утворює з вектором швидкості кут  $\alpha$ . Визначити роботу сили, що діє на електрон. Визначити крок гвинтової лінії, по якій рухається електрон.

$$\left( A = 0; h = v \cdot \cos \alpha \frac{2\pi m}{eB} \right)$$

**7-27.** В однорідне магнітне поле з індукцією 10 мТл перпендикулярно до ліній індукції влітає електрон, кінетична енергія якого дорівнює 30 кеВ. Визначити радіус кривини траєкторії руху електрона.

$$\left( r = \frac{\sqrt{2mE_k}}{eB} = 5,8 \text{ см} \right)$$

**7-28.** Провідник, в якому тече струм 10 А, підвішено горизонтально за кінці на двох нитках. Визначити, на скільки зміниться сила натягу кожної нитки, якщо провідник помістити в магнітне поле так,

щоб вектор магнітної індукції був перпендикулярним до напрямку струму в провіднику. Довжина провідника 10 см, а модуль вектора магнітної індукції дорівнює 10 мТл. ( $10^{-2}$  Тл)

**7-29.** Мідний провідник зі струмом 2 А довжиною 20 см і площею перерізу  $2 \text{ см}^2$  розміщено в однорідному магнітному полі так, що кут між вектором магнітної індукції і напрямком струму в провіднику становить  $30^\circ$ . Визначити прискорення, з яким рухатиметься провідник в магнітному полі, якщо магнітна індукція дорівнює 0,2 Тл. ( $0,11 \text{ м/с}^2$ )

**7-30.** Яку роботу потрібно виконати при переміщенні на 0,25 м провідника довжиною 0,4 м зі струмом 21 А в однорідному магнітному полі з індукцією 1,2 Тл? Провідник рухається перпендикулярно до лінії магнітної індукції. (2,52 Дж)

**7-31.** У вертикальному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл на горизонтальній поверхні лежить стрижень довжиною 25 см і масою 0,05 кг. Коефіцієнт тертя між стрижнем і поверхнею 0,255. При пропусканні струму він починає ковзати по поверхні. Визначити силу струму в провіднику. (5 А)

**7-32.** Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією  $4 \cdot 10^{-3}$  Тл по гвинтовій лінії. Знайти період обертання електрона. (8,9 нс)

**7-33.** Іон, який пройшов прискорювальну різницю потенціалів 645 В, влетів у схрещені під прямим кутом однорідне магнітне поле індукцією 1,5 мТл та електричне поле напруженістю 200 В/м. Визначити відношення заряду іона до його маси, якщо іон у цих полях рухається прямолінійно. ( $14 \cdot 10^6$  Кл/кг)

*Е-8.1. Теоретичні відомості*

**Електромагнітною індукцією називається явище виникнення електрорушійної сили в провідному контурі, коли він перебуває у змінному магнітному полі.**

Для математичного опису явища електромагнітної індукції вводиться поняття потоку магнітної індукції. *Потоком магнітної індукції  $\Phi$*  через деяку площинку називається скалярний добуток вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  на вектор  $\vec{S}$ :

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

де  $\alpha$  — кут між напрямом вектора магнітної індукції і нормаллю, побудованою до площинки  $S$  (рис. Е-8.1).

Одиниця магнітного потоку — Вб (вебер).

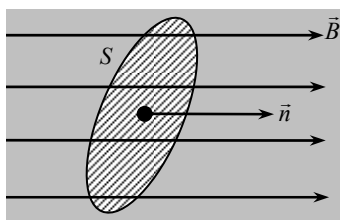


Рис. Е-8.1

ЕРС електромагнітної індукції виникає, коли змінюється магнітний потік, який пронизує контур. Зміна магнітного потоку відбуватиметься за таких умов.

1.  $B \neq \text{const}$ ,  $S = \text{const}$ ,  $\alpha = \text{const}$ . Провідний контур розміщено в змінному магнітному полі.

2.  $B = \text{const}$ ,  $\alpha = \text{const}$ , але  $S \neq \text{const}$ .

Магнітне поле **однорідне**, але змінюється площа, яку охоплює контур у магнітному полі. Можна, наприклад, деформувати контур, витягнути його (рис. Е-8.2), тобто змінити площу  $\vec{S}$ , яку охоплює контур в магнітному полі. Тоді зміна магнітного потоку

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi,$$

або

$$\Delta\Phi = BS_1 \cos \alpha - BS \cos \alpha = B \cos \alpha (S_1 - S).$$

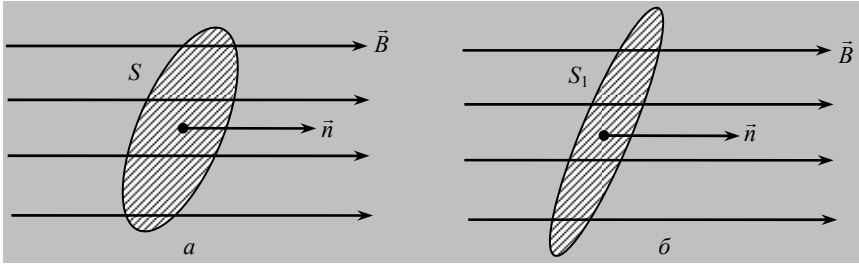


Рис. Е-8.2

3.  $B = \text{const}$ ,  $S = \text{const}$ , але  $\alpha \neq \text{const}$ . Магнітне поле **однорідне**, але контур повертається в магнітному полі так, що кут  $\alpha$  змінюється. Наприклад, можна повернути контур у магнітному полі на  $180^\circ$  так, як показано на рис. Е-8.3.

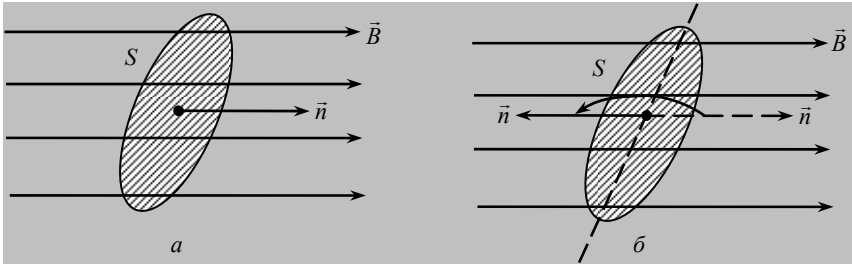


Рис. Е-8.3

Маємо таку зміну магнітного потоку:

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi,$$

або

$$\Delta\Phi = BS \cos \pi - BS \cos 0^\circ = -2BS.$$

ЕРС електромагнітної індукції визначається за **законом Фарадея**:

**ЕРС електромагнітної індукції в контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, узятій зі знаком «мінус»:**

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Знак «мінус» відповідає правилу Ленца:

при будь-якій зміні магнітного потоку через площинку, яку охоплює провідний контур у магнітному полі, у контурі виникає індукційний струм такого напрямку, що його власне магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, який спричинив цей індукційний струм.

Якщо магнітний потік через провідний контур змінюється в часі рівномірно, закон Фарадея можна записати в такому вигляді:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Частинним випадком електромагнітної індукції виступає явище самоіндукції. *Самоіндукцією* називається явище виникнення ЕРС електромагнітної індукції в електричному колі, коли в ньому протікає змінний електричний струм:

$$\varepsilon_{c,i} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

де  $\Phi = LI$  — магнітний потік;  $L$  — коефіцієнт самоіндукції або індуктивність електричного кола;  $I$  — сила струму в колі.

Одиниця індуктивності Гн (Генрі). Індуктивність залежить від геометричної форми і розмірів контура і магнітних властивостей середовища. Отже, ЕРС самоіндукції визначатиметься так:

$$\varepsilon_{c,i} = -\left( L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \right).$$

Таким чином магнітне поле виявляє себе так: діє на рухомі заряди; рухає провідник із струмом; змінюючись у часі, спричиняє ЕРС індукції. Тобто так само як і електричне поле, магнітне має енергію, яка визначається за формулами:

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{I\Phi}{2}.$$

### ***Е-8.2. Завдання для поточного тестування***

1. Дописати формулювання явища електромагнітної індукції:  
*Електромагнітною індукцією називається явище .....*  
*сили в провідному контурі, коли він перебуває в ..... полі.*



2. Для виникнення ЕРС електромагнітної індукції в провідному контурі потрібно:

- 1) помістити провідник у однорідне магнітне поле;
- 2) помістити провідник у змінне магнітне поле;
- 3) провідний контур обертати в однорідному магнітному полі навколо осі, яка лежить в площині контура і напрямлена перпендикулярно до вектора магнітної індукції;
- 4) провідний контур обертати в однорідному магнітному полі навколо осі, яка лежить у площині контура і напрямлена вздовж вектора магнітної індукції;
- 5) змінити площу, яку охоплює провідний контур, розміщений в однорідному магнітному полі;
- 6) щоб в електричному колі протікав змінний електричний струм.

3. Дописати правило Ленца: *При будь-якій зміні магнітного потоку через поверхню, яку охоплює провідний контур у магнітному полі, в контурі виникає ..... такого напрямку, що його ..... протидіє зміні ....., що спричинив цей .....*

4. ЕРС електромагнітної індукції визначається за такою формулою:

$$1) \varepsilon = -L \frac{dI}{dt}; \quad 2) \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad 3) \varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \quad 4) \varepsilon = -I \frac{dL}{dt}.$$

5. Для виникнення явища самоіндукції потрібно:

- 1) помістити провідник у однорідне магнітне поле;
- 2) помістити провідник у змінне магнітне поле;
- 3) провідний контур обертати в однорідному магнітному полі навколо осі, яка лежить у площині контура і напрямлена перпендикулярно до вектора магнітної індукції;
- 4) провідний контур обертати в однорідному магнітному полі навколо осі, яка лежить у площині контура і напрямлена вздовж вектора магнітної індукції;
- 5) змінити площу, яку охоплює провідний контур, розміщений в однорідному магнітному полі;
- 6) щоб в електричному колі протікав змінний електричний струм.

6. ЕРС самоіндукції визначається за такою формулою:

$$1) \varepsilon = -L \frac{dI}{dt}; \quad 2) \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad 3) \varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \quad 4) \varepsilon = -I \frac{dL}{dt}.$$

7. Круглий провідник розміщено в однорідному магнітному полі індукцією 40 мТл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Якщо діаметр контура дорівнює 20 см, то магнітний потік, який пронизує контур, мВб, такий:

1) 1,256; 2) 2,512; 3) 5,024; 4) 10,048; 5) правильної відповіді тут немає.

8. Магнітне поле, індукція якого дорівнює 0,4 Тл, пронизує поверхню площею 50 см<sup>2</sup>. Якщо поверхня перпендикулярна до вектора індукції поля, то потік магнітної індукції через цю поверхню, мВб, такий:

1) 1; 2) 2; 3) 20; 4) 200; 5) правильної відповіді тут немає.

9. Рамка, яка має 25 витків, розміщена в магнітному полі. Коли магнітний потік, який пронизує рамку, за 0,16 с змінюється від 0,098 до 0,018 Вб, у рамці наводиться така ЕРС індукції, В:

1) 0,125; 2) 1,25; 3) 12,5; 4) 125; 5) правильної відповіді тут немає.

10. Магнітний потік, який пронизує контур опором  $3 \cdot 10^2$  Ом, за 2 с рівномірно змінюється на  $1,2 \cdot 10^2$  Вб. По провіднику потече струм, А:

1) 0,1; 2) 0,2; 3) 1; 4) 2; 5) правильної відповіді тут немає.

11. Соленоїд має 500 витків. Магнітний потік, який його пронизує, рівномірно зменшується зі швидкістю 60 мВб/с. ЕРС індукції в соленоїді, В, така:

1) 30; 2) 60; 3) 120; 4) 180; 5) правильної відповіді тут немає.

12. Визначити магнітний потік, що пронизує поверхню площею 40 см<sup>2</sup>, розташовану в магнітному полі індукцією 5 Тл, якщо кут між вектором магнітної індукції та нормаллю до поверхні становить 60°.

1)  $10^{-2}$  Вб; 2)  $2 \cdot 10^{-2}$  Вб; 3) 100 Вб; 4) інша відповідь.

13. Одиниця індуктивності така?

1) тесла (Тл); 2) вебер (Вб); 3) вольт (В); 4) генрі (Гн).

14. Енергія магнітного поля котушки, індуктивність якої дорівнює 2 Гн при силі струму в ній 3 А, така:

1) 6 Дж; 2) 3 Дж; 3) 8 Дж; 4) 9 Дж; 5) інша відповідь.

15. З якою швидкістю рухається провідник у повітрі перпендикулярно до ліній магнітного поля індукцією 0,1 Тл, якщо на кінцях провідника довжиною 0,6 м виникла різниця потенціалів 3 В?

1) 3 м/с; 2) 5 м/с; 3) 10 м/с; 4) 12 м/с; 5) інша відповідь.

16. Чи виникне індукційний струм в незамкненому провідному контурі, який пронизує змінне магнітне поле?

1) Виникне; 2) не виникне; 3) інша відповідь.

17. Визначити швидкість зміни сили струму в обмотці електромагніту індуктивністю 4 Гн, якщо в ній збуджується ЕРС самоіндукції 100 В.

1) 400 А/с; 2) 200 А/с; 3) 100 А/с; 4) 25 А/с; 5) інша відповідь.

### ***Е-8.3. Висновки з теми***

1. При будь-якій зміні в часі магнітного поля в просторі, який оточує магнітне поле, що змінюється, виникає вихрове електричне поле.

2. Вихрове електричне поле виникає незалежно від того, є в магнітному полі провідний контур чи немає.

3. Розміщуючи в змінному магнітному полі провідний контур, можна виявити вихрове електричне поле через спричинений ним індукційний струм.

4. Із припиненням зміни магнітного поля вихрове електричне поле зникне і індукційний струм припиниться.

5. Магнітний потік не змінюється, якщо провідний контур обертається в однорідному магнітному полі навколо осі, яка лежить у площині контура і напрямлена вздовж вектора магнітної індукції. ЕРС електромагнітної індукції не виникає.

6. Магнітний потік змінюється, якщо провідний контур обертається в однорідному магнітному полі навколо осі, яка лежить у площині контура і напрямлена перпендикулярно до вектора магнітної індукції. ЕРС електромагнітної індукції виникає.

7. Індукційний струм у провідному контурі підпорядкований закону Ома.

### ***Е-8.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** За який проміжок часу магнітний потік змінюється на 0,04 Вб, якщо в контурі збуджується ЕРС індукції 16 В?

*Дано:*

$$\Delta\Phi = 0,04 \text{ Вб};$$

$$\varepsilon_i = 16 \text{ В}$$

$$\Delta t \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

За законом електромагнітної індукції

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

звідки

$$\Delta t = \frac{\Delta \Phi}{\varepsilon_i}$$

Перевіримо одиницю величини:

$$\begin{aligned} [\Delta t] &= \left[ \frac{\text{Вб}}{\text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{В}} \right] = \left[ \frac{\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \text{м}^2}{\text{В}} \right] = \\ &= \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{Дж}} \right] = [\text{с}]. \end{aligned}$$

Виконуємо обчислення:

$$\Delta t = \frac{4 \cdot 10^{-2}}{16} = 0,25 \cdot 10^{-2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

**Відповідь.** Магнітний потік змінюється через  $2,5 \cdot 10^{-3}$  с.

**Задача 2.** В однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює 0,1 Тл, розміщено перпендикулярно до ліній поля контур площею  $10^{-3} \text{ м}^2$ . Опір контура — 1 Ом. Який заряд пройде через контур, якщо магнітне поле спадає зі сталою швидкістю.

*Дано:*

$$\begin{aligned} B &= 0,1 \text{ Тл}; \\ S &= 10^{-3} \text{ м}^2; \\ R &= 1 \text{ Ом} \end{aligned}$$

$$q = ?$$

*Розв'язання*

Коли магнітне поле змінюється рівномірно, ЕРС індукції визначається так:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Початковий магнітний потік через контур:

$$\Phi_1 = BS.$$

Кінцевий магнітний потік такий:

$$\Phi_2 = 0.$$

Оскільки зміна магнітного потоку

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -BS,$$

то ЕРС електромагнітної індукції визначається так:

$$\varepsilon_i = \frac{BS}{\Delta t}.$$

За законом Ома маємо:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

Заряд, який пройде через переріз контура визначається так:

$$q = I_i \Delta t,$$

або

$$q = \frac{\varepsilon_i \Delta t}{R} = -\frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{BS}{R}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[q] = \left[ \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{Ом}} \right] = \left[ \frac{\text{Вб}}{\text{В/А}} \right] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{В}} \right] = [\text{Кл}].$$

Виконуємо обчислення:

$$q = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{1} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Кл.}$$

**Відповідь.** Через контур пройде заряд  $10^{-4}$  Кл.

**Задача 3.** Літак Ту-104, довжина крила якого 36,5 м, летить горизонтально зі швидкістю 850 км/год. Визначити ЕРС індукції, що виникає на кінцях його крила, якщо вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює  $0,5 \cdot 10^{-4}$  Тл.

**Дано:**

$$l = 36,5 \text{ м};$$
$$v = 850 \text{ км/год} = 236 \text{ м/с};$$
$$B = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$$

$$\varepsilon_i - ?$$

**Розв'язання**

ЕРС індукції, що виникає на кінцях крил літака, визначають за формулою

$$\varepsilon_i = B \cdot l \cdot v.$$

Перевіримо одиницю вимірювання:

$$[\varepsilon_i] = \left[ \frac{\text{Тл} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right] = \left[ \frac{\text{Вб}}{\text{с}} \right] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{с}} \right] = [\text{В}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\varepsilon_i = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 36,5 \cdot 236 = 0,43 \text{ В}.$$

**Відповідь.** На кінцях крила виникає ЕРС 0,43 В.

**Задача 4.** Площина алюмінієвого кільця, розміщеного в магнітному полі, перпендикулярна до вектора магнітної індукції поля. Діаметр кільця 25 см, площа перерізу провідника, з якого виготовлено кільце, дорівнює  $3,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Визначити швидкість зміни магнітної індукції з часом, коли в кільці виникає індукційний струм 12 А.

**Дано:**

$$I_i = 12 \text{ А};$$

$$d = 25 \text{ см} = 25 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$S_{\text{Al}} = 3,14 \cdot 10^{-6};$$

$$\rho_{\text{Al}} = 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

---

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} - ?$$

Оскільки  $\cos \alpha = 1$ , то

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta BS}{\Delta t}.$$

Площу, яку охоплює алюмінієве кільце в магнітному полі, визначимо так:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

За законом Ома

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

Визначимо ЕРС електромагнітної індукції:

$$\varepsilon_i = I_i R. \quad (1)$$

Опір кільця знайдемо так:

$$R = \rho_{Al} \frac{l}{S_{Al}}.$$

Довжина кільця

$$l = \pi d.$$

Підставивши ці формули у вираз (1), дістанемо:

$$\varepsilon_i = I_i \rho_{Al} \frac{\pi d}{S_{Al}}.$$

Водночас згідно із законом Фарадея маємо:

$$I_i \rho_{Al} \frac{\pi d}{S_{Al}} = \frac{\Delta B S}{\Delta t}.$$

Підставивши площу кільця, визначимо швидкість зміни магнітної індукції з часом:

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{4I_i \rho_{Al}}{S_{Al} d}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$\left[ \frac{\Delta B}{\Delta t} \right] = \left[ \frac{A \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}} = \frac{B}{\text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Тл}}{\text{с}} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{4I_i \rho_{Al}}{S_{Al} d} = \frac{4 \cdot 12 \cdot 2,7 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{-2}} = 1,66 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}.$$

**Відповідь.** Швидкість зміни магнітної індукції з часом дорівнює 1,66 Тл/с.

**Задача 5.** В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл із частотою 5 об/с рівномірно обертається котушка, утворена зі 100 витків. Вісь обертання перпендикулярна до осі котушки і напрямку вектора магнітної індукції поля. Визначити максимальне значення ЕРС індукції в котушці під час обертання, якщо площа її перерізу дорівнює 100 см<sup>2</sup>.

**Дано:**

$$B = 0,1 \text{ Тл};$$

$$N = 100;$$

$$n = 5 \text{ об/с};$$

$$S = 100 \text{ см}^2 = 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$\varepsilon_{i \max} - ?$$

**Розв'язання**

ЕРС електромагнітної індукції визначається за законом Фарадея:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}.$$

Магнітний потік визначається так:

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

Під час обертання котушки змінюватиметься кут  $\alpha$  між вектором магнітної індукції і нормаллю до площини котушки. Залежність кута  $\alpha$  від часу за таких умов визначимо так:

$$\alpha = \omega t.$$

Кутову швидкість обертання котушки знайдемо за формулою

$$\omega = 2\pi n.$$

Виконавши відповідні перетворення, знайдемо магнітний потік:

$$\Phi = BS \cos 2\pi n t.$$

Узявши похідну від магнітного потоку за часом, дістанемо ЕРС електромагнітної індукції:

$$\varepsilon_i = 2\pi n N B S \sin 2\pi n t.$$

Максимальне значення ЕРС електромагнітної індукції таке:

$$\varepsilon_{i \max} = 2\pi n N B S.$$

Виконуємо обчислення:

$$\varepsilon_{i \max} = 2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 100 \cdot 0,1 \cdot 100 \cdot 10^{-4} = 3,14 \text{ В}.$$

**Відповідь.** Максимальне значення ЕРС індукції в котушці під час обертання дорівнює 3,14 В.

**Задача 6.** Через соленоїд, індуктивність якого дорівнює 0,4 мГн і площа перерізу  $10 \text{ см}^2$ , проходить електричний струм 0,5 А. Визначити індукцію магнітного поля всередині соленоїда, якщо він складається із 100 витків.



*Дано:*

$$L = 0,4 \text{ мГн} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Гн};$$

$$I = 0,5 \text{ А};$$

$$S = 10 \text{ см}^2 = 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$N = 100$$

$$\varepsilon_{\text{max}} \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Електричний струм, який протікає через котушку, спричиняє появу магнітного поля в соленоїді, лінії індукції якого перпендикулярні до площини витка. Загальний магнітний потік через соленоїд визначається так:

$$\Phi = NBS.$$

Оскільки магнітний потік, що виникає в котушці індуктивності визначається так:

$$\Phi = LI,$$

можна записати таке рівняння:

$$NBS = LI.$$

Звідси визначимо магнітну індукцію

$$B = \frac{LI}{SN}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[B] = \left[ \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}}{\text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Тл}].$$

Виконуємо обчислення:

$$B = \frac{4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5}{10^{-3} \cdot 100} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}.$$

**Відповідь.** Індукція магнітного поля всередині соленоїда дорівнює 2 мТл.

**Задача 7.** Провідне кільце, яке охоплює в однорідному магнітному полі з індукцією 15 Тл площу  $25 \text{ см}^2$ , розміщено так, що вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини кільця. Визначити зміну магнітного потоку через поверхню, обмежену кільцем, якщо його повернути на  $180^\circ$ .

**Дано:**

$$B = 15 \text{ Тл};$$

$$S = 25 \text{ см}^2 = 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\alpha_1 = 0^\circ;$$

$$\alpha_2 = 180^\circ.$$

$\Delta\Phi - ?$

**Розв'язання**

Розміщення провідного кільця в магнітному полі показано на рис. 1. Спочатку кут між напрямом вектора магнітної індукції і нормаллю, побудованою до площини кільця, дорівнював  $0^\circ$ .

У цьому випадку магнітний потік такий:

$$\Phi_1 = BS \cos 0^\circ = BS.$$

Коли кільце повернуто на  $180^\circ$ , кут між напрямом вектора магнітної індукції і нормаллю, становитиме  $\pi$ .

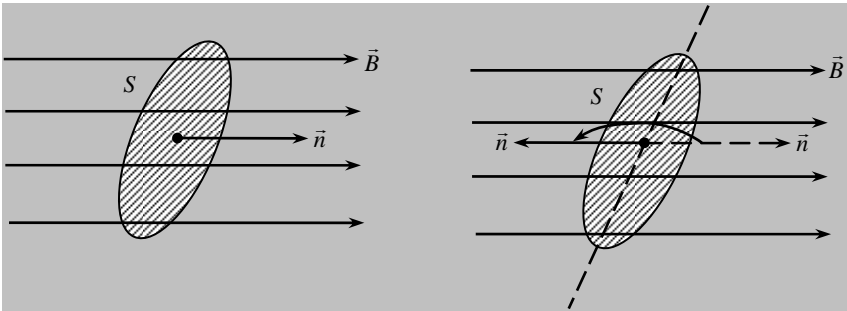


Рис. 1

У цьому випадку магнітний потік визначатиметься так:

$$\Phi_2 = BS \cos \pi = -BS.$$

Зміна магнітного потоку дорівнюватиме:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1.$$

або

$$\Delta\Phi = BS \cos \pi - BS \cos 0^\circ = -2BS.$$

Виконуємо обчислення:

$$\Delta\Phi = -2 \cdot 15 \cdot 25 \cdot 10^{-4} = -0,075 \text{ Вб}.$$

**Відповідь.** Зміна магнітного потоку дорівнює  $-0,075 \text{ Вб}$ .

**Задача 8.** Магнітний потік, що пронизує рамку з тонкого дроту, рівномірно зменшився за 0,5 с від 20 до 5 мВб. Визначити силу індукційного струму в рамці, якщо її опір 0,6 Ом, а кількість витків 20.

*Дано:*

$$\Phi_1 = 20 \text{ мВб} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$\Phi_2 = 5 \text{ мВб} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$t = 0,5 \text{ с};$$

$$R = 0,6 \text{ Ом};$$

$$N = 20$$

$$I_i - ?$$

*Розв'язання*

Сила індукційного струму підпорядкована закону Ома:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

ЕРС електромагнітної індукції визначимо за законом Фарадея.

У разі рівномірної зміни магнітного потоку, закон Фарадея набуває такого вигляду:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Зміну магнітного потоку визначимо так:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1.$$

Тоді закон Фарадея набуватиме вигляду:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t}.$$

Підставивши значення ЕРС електромагнітної індукції в закон Ома, матимемо:

$$I_i = -N \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{R\Delta t}.$$

Перевіримо одиниці величини:

$$[I_i] = \left[ \frac{\text{Вб}}{\text{Ом} \cdot \text{с}} \right] = \left[ \frac{\text{В}}{\text{Ом}} \right] = [\text{А}].$$

Виконуємо обчислення:

$$I_i = -20 \frac{5 \cdot 10^{-3} - 20 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 0,5} = 1 \text{ А.}$$

**Відповідь.** Сила індукційного струму в рамці дорівнює 1 А.

**Задача 9.** В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл розміщено плоский провідний виток, розташований так, що його площина перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Виток замкнений на гальванометр. Повний заряд, що проходить через гальванометр, при повороті витка дорівнює 0,75 мКл. Визначити кут, на який повернули виток, якщо його опір дорівнює 2 Ом. Провідний виток охоплює в магнітному полі площину  $10^{-2} \text{ м}^2$ .

**Дано:**

$$B = 0,1 \text{ Тл};$$

$$q = 0,75 \text{ мКл} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ Кл};$$

$$S = 10^{-2} \text{ м}^2;$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$\alpha - ?$

**Розв'язання**

Заряд, який проходить через виток визначається так:

$$q = I_i \Delta t.$$

Сила індукційного струму підпорядкована закону Ома:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

ЕРС електромагнітної індукції визначимо за законом Фарадея.

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Зміна магнітного потоку визначатиметься так:

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1,$$

або

$$\Delta \Phi = BS \cos \alpha - BS \cos 0^\circ = BS(\cos \alpha - 1).$$

Після підстановок та перетворень, формула для визначення заряду, який проходить через виток, набуває вигляду:

$$q = -\frac{\Delta \Phi}{R} = -\frac{BS(\cos \alpha - 1)}{R}.$$

Звідки визначимо кут, на який повернули виток в магнітному полі, так:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{qR}{BS}.$$

Перевіримо одиниці величини:

$$[\cos \alpha] = \left[ 1 - \frac{\text{Кл} \cdot \text{Ом}}{\text{Тл} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ 1 - \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}} \right] = [1].$$

Виконуємо обчислення:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{qR}{BS} = 1 - \frac{0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{0,1 \cdot 10^{-2}} = 1 - 1,5 = -0,5.$$

Тоді кут, на який повернули виток в магнітному полі, дорівнює:

$$\alpha = \arccos(-0,5) = 120^\circ.$$

**Відповідь.** Кут, на який повернули виток в магнітному полі, дорівнює  $120^\circ$ .

### ***Е-8.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**8-1.** В однорідне поле, індукція якого дорівнює 30 мкТл, помістили контур радіусом 20 см. Визначити кут між площиною контура і лінією магнітного поля. Потік, що проходить через контур, дорівнює  $1,8 \cdot 10^{-6}$  Вб. ( $30^\circ$ )

**8-2.** Плоский контур, площа якого дорівнює  $25 \text{ см}^2$ , перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією 0,04 Тл. Визначити магнітний потік, який пронизує контур, якщо його площа утворює з лініями індукції кут  $60^\circ$ . (50 мкВб)

**8-3.** Квадратна рамка зі стороною 10 см розміщена в однорідному магнітному полі. Нормаль до площини рамки утворює з лініями індукції магнітного поля кут  $60^\circ$ . Визначити магнітну індукцію поля, якщо в рамці при вимкненні поля впродовж 0,01 с виникає ЕРС індукції 50 мкВ. (0,1 Тл)

**8-4.** Визначити магнітний потік, який пронизує кожний виток котушки, яка містить 1000 витків. Магнітне поле, рівномірно зменшуючись впродовж 0,1 с, наводить у котушці ЕРС індукції 10 В. ( $10^{-3}$  Вб)

**8-5.** Замкнена накоротко котушка діаметром 10 см, яка має 200 витків, перебуває в магнітному полі, індукція якого збільшується від 2 до 6 Тл протягом 0,1 с. Визначити середнє значення ЕРС індукції в котушці, якщо площа витків перпендикулярна до силових ліній поля. (628 В)

**8-6.** Котушка має 75 витків, магнітний потік, який пронизує кожен виток, дорівнює  $4,8 \cdot 10^{-3}$  Вб. За який час має зникнути магнітний потік, щоб у котушці виникла ЕРС індукції 0,74 В? (0,49 с)

**8-7.** Визначити середнє значення ЕРС індукції, що виникає при розімкненні обмотки котушки, якщо площа її перерізу дорівнює  $30 \text{ см}^2$ , кількість витків — 1000, індукція магнітного поля — 1,6 Тл, час розмикання — 0,001 с. (4800 В)

**8-8.** Алюмінієве кільце розташовано в однорідному магнітному полі так, що його площа перпендикулярна до вектора магнітної індукції поля. Діаметр кільця — 25 см, товщина дроту кільця — 2 мм. Визначити швидкість зміни магнітної індукції з часом, якщо при цьому виникає індуктивний струм 12 А.  $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} = 1,6 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}\right)$

**8-9.** Плоский виток площею  $10 \text{ см}^2$  перебуває в однорідному магнітному полі перпендикулярно до лінії індукції. Опір витка — 1 Ом. Який струм потече по витку, якщо магнітна індукція поля буде зменшуватися зі швидкістю 0,1 Тл/с? ( $1 \cdot 10^{-4}$  А)

**8-10.** Коротко замкнена котушка опором 100 Ом і діаметром 5 см, що складається з 1000 витків, розташована в однорідному магнітному полі так, що площа витків розміщена під кутом  $60^\circ$  до ліній магнітної індукції. Індукція магнітного поля рівномірно зменшується від 0,8 до 0,3 Тл. Який заряд протече по котушці? (8,53 мКл)

### *Е-8.6. Задачі для самостійного розв'язування*

**8-11.** Кільцевий провідник з опором 10 Ом перебуває в магнітному полі, яке рівномірно змінюється. Визначити кількість теплоти, яка виділяється в провіднику за одиницю часу, якщо швидкість зміни магнітної індукції дорівнює  $2,5 \cdot 10^2$  Тл/с, радіус кільця — 2 см. ( $4,3 \cdot 10^{-2}$  Кл)

**8-12.** Плоский провідний контур опором 0,01 Ом, площа якого перпендикулярна до ліній однорідного магнітного поля з індукцією 0,05 Тл, рівномірно повертається на кут  $30^\circ$  навколо осі, що лежить у площині контура. Площа рамки —  $100 \text{ см}^2$ . Визначити, який заряд протече по контуру за час повороту контура. (7 мКл)

**8-13.** У магнітному полі з індукцією 0,4 Тл перебуває котушка, яка має 300 витків. Опір котушки — 40 Ом, площа котушки — 16 см<sup>2</sup>. Котушка розміщена під кутом 60° до напрямку ліній магнітного поля. Який заряд протече по котушці при зникненні магнітного поля? ( $24 \cdot 10^{-4}$  Кл)

**8-14.** Котушку радіусом 3,0 см із кількістю витків 1000 вміщують в однорідне магнітне поле. Площина котушки перпендикулярна до ліній поля. Індукція магнітного поля змінюється зі сталою швидкістю  $\Delta B/\Delta t = 10$  мТл/с. Який заряд буде на конденсаторі, підімкненому до кінця котушки? Ємність конденсатора 20 мкФ.  $\left( q = \pi n C r^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} = 0,57 \text{ мкКл} \right)$

**8-15.** Провідник завдовжки 1 м рухається зі швидкістю 5 м/с перпендикулярно до лінії індукції однорідного магнітного поля. Визначити магнітну індукцію, якщо на кінцях провідника виникає різниця потенціалів 0,02 В. (4 мТл)

**8-16.** З якою швидкістю рухатиметься перпендикулярно до магнітного поля з індукцією 1,2 Тл провідник завдовжки 1 м, якщо на його кінцях виникла напруга 12 В? (10 м/с).

**8-17.** Прямолінійний провідник довжиною 86 см рухається зі швидкістю 14 м/с в однорідному магнітному полі з індукцією 0,025 Тл. Визначити кут між векторами індукції поля і швидкістю, якщо в провіднику індукується ЕРС 0,12 В. ( $\alpha = 23,5^\circ \approx 23^\circ 30'$ ).

**8-18.** В однорідному магнітному полі з індукцією 2 Тл вміщено прямий провідник завдовжки 10 см. Кінці провідника замкнені провідником, що перебуває зовні. Опір електричного кола — 0,1 Ом. Визначити потужність необхідну для руху провідника перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля зі швидкістю 10 м/с. (40 Вт)

**8-19.** Рамка, яка має 50 витків і площу 150 см<sup>2</sup>, рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,8 Тл. Рамка здійснює 120 об/хв. Визначити максимальне значення ЕРС індукції. (7,5 В)

**8-20.** Рамка, яка має 250 витків, перебуває в однорідному магнітному полі, площина рамки перпендикулярна до вектора магнітної індукції. Визначити середнє значення ЕРС індукції, яка виникає в рамці при повороті її на кут 90° за час 0,16 с, якщо площа рамки — 4 см<sup>2</sup>, а значення магнітної індукції 0,96 Тл. (0,34 В).

**8-21.** Рамка рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією 4 мТл навколо горизонтальної осі з частотою 20 с<sup>-1</sup>.

Площа рамки  $20 \text{ см}^2$  і перпендикулярна до вектора індукції поля. Визначити максимальні магнітні потоки, що пронизують рамку, і ЕРС індукції, яка виникає в рамці при її обертанні. Записати рівняння  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ . ( $8 \text{ мкВб}$ ;  $1 \text{ кВ}$ ;  $\varepsilon = 10^{-3} \cdot \sin 40\pi t$ )

**8-22.** Визначити зміну магнітного потоку через котушку, якщо вона має  $2000$  витків і за  $10^{-2}$  с в ній виникає ЕРС індукції  $200 \text{ В}$ . ( $10^{-3} \text{ Вб}$ )

**8-23.** Магнітний потік, що пронизує контур провідника, рівномірно змінився на  $0,6 \text{ Вб}$  так, що ЕРС індукції дорівнює  $1,2 \text{ В}$ . Визначити час зміни магнітного потоку й силу індуктивного струму, якщо опір провідника дорівнює  $0,24 \text{ Ом}$ . ( $0,5 \text{ с}$ ;  $5 \text{ А}$ )

**8-24.** Котушку опором  $100 \text{ Ом}$ , що має  $10^3$  витків і площу  $5 \text{ см}^2$ , внесено в однорідне магнітне поле. Впродовж деякого часу індукція магнітного поля зменшилася від  $0,8$  до  $0,3 \text{ Тл}$ . Який заряд індуковано в котушці за цей час? ( $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$ )

**8-25.** Дротяне кільце радіусом  $5 \text{ см}$  розміщено в магнітному полі з індукцією  $1 \text{ Тл}$  так, що вектор індукції перпендикулярний до площини кільця. Визначити ЕРС індукції, що виникає в кільці, якщо його повернути на кут  $90^\circ$  за  $0,1 \text{ с}$ . ( $7,85 \cdot 10^{-2} \text{ В}$ )

**8-26.** Котушка з  $10^3$  витків замкнена накоротко і поміщена в магнітне поле, напрямлене вздовж її осі. Площа перерізу котушки —  $40 \text{ см}^2$ , її повний опір —  $160 \text{ Ом}$ . Скільки теплоти виділяється в котушці, якщо індукція магнітного поля змінюється зі швидкістю  $10^{-3} \text{ Тл/с}$ ? ( $10^{-7} \text{ Вт}$ )

**8-27.** Реактивний літак, що має розмах крила  $50 \text{ м}$ , летить горизонтально зі швидкістю  $800 \text{ км/год}$ . Визначити різницю потенціалів, що виникає на кінцях крила, якщо вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює  $5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ . ( $0,55 \text{ В}$ )

**8-28.** Під яким кутом до ліній індукції однорідного магнітного поля з індукцією  $0,5 \text{ Тл}$  потрібно рухати провідник завдовжки  $0,4 \text{ м}$  зі швидкістю  $15 \text{ м/с}$ , щоб у ньому виникла ЕРС індукції  $2,21 \text{ В}$ ? ( $45^\circ$ )

**8-29.** Рамка зі  $100$  витків дроту площею  $100 \text{ см}^2$  рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією  $0,8 \text{ Тл}$ , виконуючи  $120$  об/хв. Визначити амплітудне і діюче значення ЕРС індукції, яка виникає в рамці. ( $15 \text{ В}$ ;  $10,7 \text{ В}$ )

**8-30.** Рамка, яка містить  $200$  витків і має площу перерізу  $300 \text{ см}^2$ , обертається в магнітному полі з індукцією  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ . Визначити період обертання, якщо діюче значення ЕРС індукції, що виникає в рамці, дорівнює  $10 \text{ В}$ . ( $0,04 \text{ с}$ )



**8-31.** Під час обертання рамки, яка містить 200 витків у магнітному полі з індукцією  $1,5 \cdot 10^{-2}$  Тл у ній виникає змінний електричний струм. Визначити ЕРС індукції через  $10^{-2}$  с після початку обертання, якщо площа витка дорівнює  $300 \text{ см}^2$ . Амплітудне значення ЕРС індукції дорівнює 7,2 В. (5,04 В)

**8-32.** При зміні сили струму від 2,5 до 14,5 А у котушці, що містить 800 витків, магнітний потік збільшується на  $2,4 \cdot 10^{-3}$  Вб. Визначити середнє значення ЕРС самоіндукції в котушці, якщо зміна струму відбувалася за 0,15 с? Визначити індуктивність котушки й енергію магнітного поля в котушці при силі струму 5 А. (13 В; 0,16 Гн; 2 Дж)

**8-33.** У котушці за 0,01 с струм зростає від 1 до 2 А. При цьому в котушці виникає ЕРС самоіндукції 20 В. Визначити індуктивність і зміну енергії магнітного поля котушки. (0,2 Гн; 0,3 Дж)

**8-34.** Провідне кільце, яке охоплює в однорідному магнітному полі з індукцією 10 Тл площу  $0,18 \text{ м}^2$ , розташовано так, що вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини кільця. Визначити зміну магнітного потоку через поверхню обмежену кільцем, якщо його повернути на  $90^\circ$ . (–1,8 Вб)

**8-35.** Провідне кільце, яке охоплює в однорідному магнітному полі з індукцією 12 Тл площу  $0,12 \text{ м}^2$ , розташовано так, що вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини кільця. Визначити зміну магнітного потоку через поверхню обмежену кільцем, якщо його повернути на  $45^\circ$ . (–0,432 Вб)

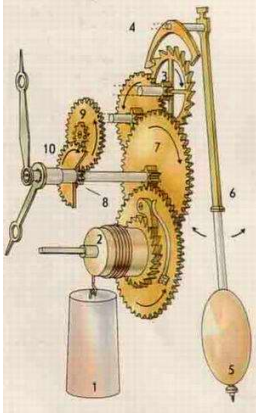
**8-36.** Рамка площею  $150 \text{ см}^2$ , яка містить 50 витків, рівномірно обертається з частотою 120 об/хв в однорідному магнітному полі з індукцією 0,8 Тл. Визначити максимальне значення ЕРС індукції. (7,5 В)

**8-37.** Провідне кільце в однорідному магнітному полі з індукцією 15 Тл, розміщено так, що вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини кільця. Коли кільце повернули на  $180^\circ$ , зміна магнітного потоку через поверхню, обмежену кільцем, дорівнює – 0,075 Вб. Визначити площину, яку охоплює кільце в магнітному полі. ( $25 \text{ см}^2$ )

**8-38.** Магнітний потік, що пронизує рамку з тонкого дроту, рівномірно зменшився від 20 до 5 мВб. При цьому в рамці протікає індукційний струм 1 А. Визначити час, за який зменшується магнітний потік, що пронизує рамку, якщо опір рамки 0,6 Ом, а кількість витків в рамці дорівнює 20. (0,5 с)

**8-39.** В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл розміщено плоский провідний виток, розташований так, що його площина перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Виток замкнений на гальванометр. Визначити повний заряд, що проходить через гальванометр, при повороті витка на  $120^\circ$ , якщо його опір дорівнює 2 Ом. Провідний виток охоплює в магнітному полі площину  $10^{-2} \text{ м}^2$ . (0,75 мКл)

# Розділ 4



## Коливання і хвилі

### Коливання і хвилі

Тема К-Х-1. Механічні коливання

Тема К-Х-2. Електромагнітні коливання

Тема К-Х-3. Механічні та електромагнітні хвилі

***K-X-1.1. Теоретичні відомості***

**Коливання** — це будь-які процеси, що повторюються в часі. Фізична природа коливань різноманітна. Так, механічними коливаннями є коливання маятників, струн, крил літаків тощо. До електромагнітних коливань належать коливання сили струму і напруги в електричних колах та коливальному контурі, коливання векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  — напруженості та індукції електричного і магнітного поля в електромагнітній хвилі тощо.

**Коливання різної фізичної природи мають схожі закономірності й описуються однаковими математичними рівняннями.**

Коливання бувають не загасаючими і загасаючими. Залежно від характеру дії на коливальну систему розрізняють *вільні* та *вимушені* коливання.

**Вільними** називаються коливання, які здійснює система, що виведена із положення рівноваги, за умови, що надалі вона діє самочинно.

**Вимушеними** називаються коливання, які здійснює система під впливом зовнішньої дії, що періодично змінюється. Для механічних коливань зовнішньою дією є сила  $F = F_m \cos \omega t$ , яка сама періодично змінюється в часі, для електромагнітних коливань у контурі — це джерело змінної напруги з електрорушійною силою  $\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t$ , яка також змінюється з часом. Коливання називаються **періодичними**, якщо значення фізичних величин, які характеризують процес коливань, повторюються через однакові проміжки часу. Цей проміжок часу називається **періодом коливань**  $T$ . За цей час здійснюється одне повне коливання. **Частотою коливань**  $\nu$  називається кількість повних коливань, які виконує коливальна система за одиницю часу:

$$\nu = \frac{1}{T}. \text{ Частота коливань вимірюється в герцах.}$$

1 герц (Гц) — це частота коливань, період яких дорівнює 1 с;

$$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

**Циклічною частотою** коливань  $\omega$  називається кількість повних коливань, які виконуються за  $2\pi$  с:

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T.$$

Найпростішими періодичними коливаннями є *гармонічні*. Такі коливання здійснюють математичний та пружинний маятники.

**Математичний маятник** — це матеріальна точка, підвішена на невагомій нерозтяжній нитці, яка виконує коливання під дією сили тяжіння (рис. К-Х-1.1). **Пружинний маятник** — це вантаж масою  $m$ , закріплений на пружині (рис. К-Х-1.2).

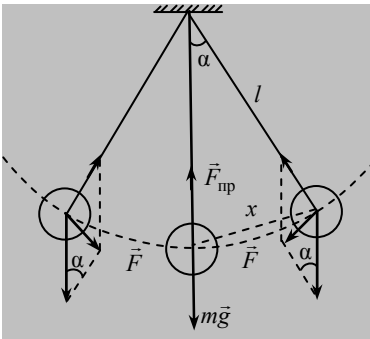


Рис. К-Х-1.1

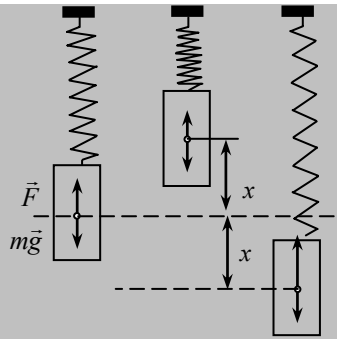


Рис. К-Х-1.2

Під час відхилення маятника від положення рівноваги виникає сила, що намагається повернути його в це положення. Для математичного маятника вона визначається за формулою

$$F = mg \frac{x}{l},$$

для пружинного

$$F = -kx,$$

де  $x$  — зміщення від положення рівноваги;  $l$  — довжина маятника;  $k$  — жорсткість пружини.

Під дією такої сили маятник здійснює вільні гармонічні коливання, рівняння яких має вигляд:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Це саме рівняння можна записати за законом синуса, але з іншою початковою фазою:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_1),$$

де  $A$  — амплітуда коливань, або найбільше зміщення від положення рівноваги;  $\omega_0 t + \varphi_0$  — фаза коливань;  $\varphi_0, \varphi_1$  — початкова фаза, тобто фаза в початковий момент часу  $t = 0$ ;  $\omega_0$  — власна циклічна частота, пов'язана з періодом коливань формулою  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ . Оскільки частота (і період також) залежить тільки від характеристик коливальної системи, то вона називається **власною**.

Для математичного маятника власна циклічна частота і період визначаються за формулами

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

а для пружинного маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

На рис. К-Х-1.3 наведено графік гармонічних коливань для  $\varphi_0 = 0$ . Якщо  $\varphi_0 \neq 0$ , то графік зміститься по осі  $t$  на  $\frac{\varphi_0}{\omega_0}$ .

**Швидкість** зміни зміщення маятника — це його швидкість, вона дорівнює першій похідній від зміщення за часом (рис. К-Х-1.4):

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d[A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)]}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

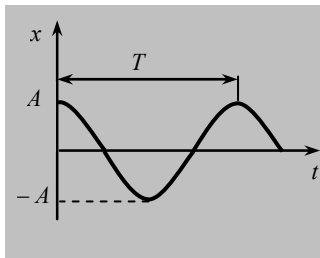


Рис. К-Х-1.3

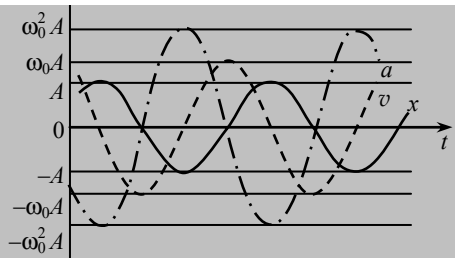


Рис. К-Х-1.4

Швидкість зміни швидкості — це **прискорення**, яке дорівнює похідній від швидкості (див. рис. К-Х-1.4):

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d[-A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)]}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

**Максимальні** значення швидкості та прискорення при гармонічних коливаннях відповідно дорівнюють  $v_{\max} = A\omega_0$ ;  $a_{\max} = A\omega_0^2$ .

При гармонічних коливаннях відбувається перетворення кінетичної енергії в потенціальну і навпаки згідно з законом збереження механічної енергії. Повна енергія коливань дорівнює сумі кінетичної енергії:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$$

та потенціальної енергії:

$$E_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}.$$

Як кінетична, так і потенціальна енергія здійснює, у свою чергу, гармонічні коливання, але з частотою  $2\omega_0$ . Потенціальна енергія до того ж здійснює коливання із зсувом за фазою щодо кінетичної енергії на  $\pi$ . Якщо відсутні сили тертя або опору, то **повна енергія** коливань залишається сталою і дорівнює максимальній потенціальній або кінетичній енергії (рис. К-Х-1.5):

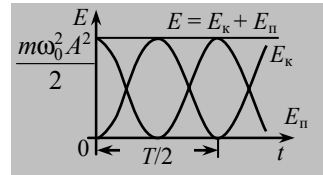


Рис. К-Х-1.5

$$E = E_{n \max} = E_{k \max}$$

або  $E_{n \max} = \frac{kA^2}{2}$ ;  $E_{k \max} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2}$ .

За наявності сил тертя та опору механічні коливання є загасаючими. Амплітуда коливань у цьому випадку зменшується за законом  $A(t) = A_0 e^{-\beta t}$  ( $\beta$  — коефіцієнт загасання коливань), бо енергія коливань витрачається на роботу проти сил тертя та опору.

Для того щоб коливання були незагасаючими, потрібно поповнювати втрату енергії за рахунок роботи зовнішньої сили, яка пері-

одично змінюється за гармонічним законом  $F(t) = F_0 \cos \omega t$  ( $F_0$  — амплітуда зовнішньої сили, а  $\omega$  — її циклічна частота). Такі коливання називаються **вимушеними**, вони є також гармонічними і відбуваються з циклічною частотою, яка дорівнює частоті зовнішньої сили. Вимушені коливання описуються рівнянням

$$x = A \cos(\omega t + \varphi),$$

де  $A$  — амплітуда вимушених коливань зміщення;  $\varphi$  — різниця фаз між вимушеними коливаннями  $x$  і силою  $F(t)$ .

Якщо умови підведення енергії до тіла, що коливається, за рахунок роботи зовнішньої сили найбільш сприятливі, то виникає явище резонансу.

**Резонанс** — це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань. При малих значеннях коефіцієнта загасання він виникає тоді, коли частота зовнішньої сили дорівнює власній частоті коливань системи. Явище резонансу використовується в акустиці для посилення звуку.

### К-Х-1.2. Завдання для поточного тестування

1. Дописати визначення коливального процесу: *Колівання — це будь-які процеси, що .....*

2. Дописати визначення вільних коливань: *Вільними називаються коливання, які здійснює ..... виведена із ..... за умови.....*

3. Дописати визначення вимушених коливань: *Вимушеними називаються коливання, які здійснює ..... під впливом ....., що .....*

4. Дописати визначення періодичних коливань: *Колівання називаються періодичними, якщо значення ....., котрі характеризують процес коливань ..... часу.*

5. Період коливань визначається за формулою:

1)  $2\pi v$ ; 2)  $\frac{1}{v}$ ; 3)  $\frac{2\pi}{\omega_0}$ ; 4)  $\omega_0 t + \varphi_0$ .

6. Власна циклічна частота коливань визначається за формулою:

1)  $2\pi v$ ; 2)  $\frac{1}{v}$ ; 3)  $\frac{2\pi}{\omega_0}$ ; 4)  $\omega_0 t + \varphi_0$ ; 5)  $\frac{x}{A}$ .



7. Підставити в рівняння механічних коливань позначення необхідних величин  $x = ? \cos(?t + ?)$ :

- 1)  $v$ ; 2)  $2\pi v$ ; 3)  $\varphi$ ; 4)  $\varphi_0$ ; 5)  $x_{\max}$ ; 6)  $A$ ; 7)  $\omega_0$ .

8. Початкова фаза коливань визначається так:

- 1)  $2\pi v$ ; 2)  $\frac{1}{v}$ ; 3)  $\frac{2\pi}{\omega_0}$ ; 4)  $\omega_0 t + \varphi_0$ ; 5)  $\frac{x}{A}$ .

9. Фаза коливань визначається так:

- 1)  $2\pi v$ ; 2)  $\frac{1}{v}$ ; 3)  $\frac{2\pi}{\omega_0}$ ; 4)  $\omega_0 t + \varphi_0$ ; 5)  $\frac{x}{A}$ .

10. Власна циклічна частота коливань математичного маятника визначається так:

- 1)  $\sqrt{\frac{g}{l}}$ ; 2)  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ ; 3)  $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ; 4)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

11. Період коливань математичного маятника визначається так:

- 1)  $\sqrt{\frac{g}{l}}$ ; 2)  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ ; 3)  $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ; 4)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

12. Власна циклічна частота коливань пружинного маятника визначається так:

- 1)  $\sqrt{\frac{g}{l}}$ ; 2)  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ ; 3)  $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ; 4)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

13. Період коливань пружинного маятника визначається так:

- 1)  $\sqrt{\frac{g}{l}}$ ; 2)  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ ; 3)  $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ; 4)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

14. Якщо зміщення змінюється з часом за законом косинуса, то швидкість при гармонічних коливаннях визначається за такою формулою:

- 1)  $A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 2)  $-A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $-A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

15. Якщо зміщення змінюється з часом за законом косинуса, то прискорення при гармонічних коливаннях визначається за такою формулою:

1)  $A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 2)  $-A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $-A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

16. Максимальна швидкість при гармонічних коливаннях визначається за формулою:

1)  $A$ ; 2)  $A\omega_0$ ; 3)  $A\omega_0^2$ .

17. Максимальне прискорення при гармонічних коливаннях визначається за формулою:

1)  $A$ ; 2)  $A\omega_0$ ; 3)  $A\omega_0^2$ .

18. Якщо зміщення змінюється з часом за законом косинуса, то кінетична енергія при гармонічних коливаннях визначається за такою формулою:

1)  $\frac{kA^2}{2}$ ; 2)  $\frac{m\omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$ ; 3)  $\frac{m\omega_0^2 A^2}{2}$ ; 4)  $\frac{m\omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$ .

19. Якщо зміщення змінюється з часом за законом косинуса, то потенціальна енергія при гармонічних коливаннях визначається за такою формулою:

1)  $\frac{kA^2}{2}$ ; 2)  $\frac{m\omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$ ; 3)  $\frac{m\omega_0^2 A^2}{2}$ ; 4)  $\frac{m\omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$ .

20. Повна енергія при гармонічних коливаннях визначається за такою формулою:

1)  $\frac{kA^2}{2}$ ; 2)  $\frac{m\omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$ ; 3)  $\frac{m\omega_0^2 A^2}{2}$ ; 4)  $\frac{m\omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$ .

21. Амплітуда незагасаючих коливань точки 2 мм, частота 500 Гц. За 1 с точка пройде шлях, м:

1) 2; 2) 4; 3) 8; 4) 10; 5) правильної відповіді тут немає.

22. У першого математичного маятника період 3 с, у другого – 4 с. Який період, с, коливань математичного маятника, довжина якого дорівнює сумі довжин цих двох маятників?

1) 5; 2) 6; 3) 7; 4) 10; 5) правильної відповіді тут немає.

**23.** У скільки разів довжина першого маятника більша за довжину другого, якщо за один і той самий час перший робить 10, а другий 30 коливань?

1) 3; 2) 9; 3) 18; 4) 27; 5) правильної відповіді тут немає.

**24.** Гармонічні коливання матеріальної точки відбуваються за законом синуса, період коливань 24 с, початкова фаза дорівнює нулю. Точка зміститься від положення рівноваги на половину амплітуди через час, с:

1) 2; 2) 4; 3) 6; 4) 12; 5) правильної відповіді тут немає.

**25.** Періоди коливань двох математичних маятників відносяться як 3 : 2. У скільки разів перший маятник довший за другий?

1) 1,5; 2) 2,25; 3) 2,5; 4) 2,75; 5) правильної відповіді тут немає.

**26.** За 4 с маятник виконує 8 коливань. Чому дорівнює період коливань?

1) 4 с; 2) 2 с; 3) 0,5 с; 4) інша відповідь.

**27.** За 4 с маятник виконує 8 коливань. Чому дорівнює частота коливань?

1) 4 Гц; 2) 2 Гц; 3) 0,5 Гц; 4) інша відповідь.

**28.** Довжина математичного маятника 40 м. Визначити його період ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).

1) 6,28 с; 2) 12,56 с; 3) 1/6,28 с; 4) 3 с; 5) інша відповідь.

**29.** Вантаж, підвішено на нитці та відхилено від положення рівноваги так, що його висота над Землею збільшилася на 20 см. З якою швидкістю вантаж буде проходити положення рівноваги при вільних коливаннях? ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).

1) 1 м/с; 2) 2 м/с; 3) 4 м/с; 4) 20 м/с; 5) інша відповідь.

**30.** Максимальне значення потенціальної енергії маятника, що вільно коливається, 10 Дж, максимальне значення його кінетичної енергії 10 Дж. В яких межах змінюється повна механічна енергія маятника?

1) Не змінюється і дорівнює 20 Дж; 2) не змінюється і дорівнює 10 Дж; 3) не змінюється і дорівнює 0 Дж; 4) змінюється від 0 до 20 Дж; 5) змінюється від 0 до 10 Дж; 6) інша відповідь.

**31.** Як зміниться період коливань вантажу на пружині, якщо масу вантажу збільшити у 4 рази?

1) Збільшиться у 4 рази; 2) збільшиться у 2 рази; 3) не зміниться.

**32.** Підвішені до стелі ліфта математичний і пружинний маятники виконують коливання. Ліфт почав вільно падати. Коливання якого маятника збережуться?

1) Математичного і пружинного; 2) тільки математичного; 3) тільки пружинного.

**33.** Під сталеву кулькою, яку підвішено до пружини, помістили магніт. Як зміниться її частота коливань?

1) Не зміниться; 2) збільшиться; 3) зменшиться.

### ***К-Х-1.3. Висновки з теми***

1. Вільні незгасаючі коливання виконує система, яка не витрачає свою енергію на подолання сил опору або тертя.

2. Під час вільних незгасаючих коливань повна енергія системи залишається сталою.

3. Під час механічних коливань весь час відбувається перетворення потенціальної енергії в кінетичну і навпаки.

4. Зовнішня сила, що діє періодично, змушує систему виконувати коливання з частотою, яка дорівнює частоті цієї зовнішньої сили.

5. Під час вимушених коливань в систему безперервно надходить енергія від зовнішнього джерела і витрачається на роботу проти сил опору або тертя.

6. При резонансній частоті створюються умови для нагромадження системою енергії, яка надходить від зовнішнього джерела.

7. При резонансі різко збільшується амплітуда коливань, особливо при малому коефіцієнті загасання.

### ***К-Х-1.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** У Санкт-Петербурзі є найбільший у світі маятник завдовжки 100 м. Визначити його максимальну швидкість і прискорення, якщо амплітуда коливань дорівнює 7 м.

**Дано:**

$$l = 100 \text{ м};$$

$$A = 7 \text{ м}$$

$$v_{\max} - ? \quad a_{\max} - ?$$

**Розв'язання**

Даний маятник можна вважати математичним, а його коливання гармонічними. Зміщення матеріальної точки, що коливається гармонічно, визначимо за формулою

$$x = A \sin \omega_0 t,$$

де  $\omega = 2\pi/T$ , а  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ .

Миттєва швидкість матеріальної точки

$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega_0 \cos \omega_0 t.$$

Прискорення визначається так:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -A\omega_0^2 \sin \omega_0 t.$$

Швидкість буде найбільшою тоді, коли  $\cos \omega_0 t = 1$ , а прискорення — коли  $\sin \omega_0 t = 1$ . Отже, дістанемо:

$$v_{\max} = A\omega_0 = A \frac{2\pi}{T} = A \frac{2\pi}{2\pi\sqrt{l/g}} = A\sqrt{\frac{g}{l}},$$

$$a_{\max} = A\omega_0^2 = A \frac{4\pi^2}{4\pi^2 l/g} = \frac{Ag}{l}.$$

Перевіримо одиниці величин:

$$[v_{\max}] = \left[ \frac{\text{м}}{\sqrt{\text{мс}^2/\text{м}}} \right] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right];$$

$$[a_{\max}] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$a_{\max} = 7 \cdot \frac{9,8}{100} = 0,686 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

$$v_{\max} = 7 \cdot \sqrt{\frac{9,8}{100}} = 2,19 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

**Відповідь.** Максимальна швидкість маятника дорівнює 2,19 м/с, прискорення – 0,686 м/с<sup>2</sup>.

**Задача 2.** До пружини підвішено вантаж, період коливань якого дорівнює 0,8 с. Після того як до пружини підвісили додатковий вантаж, період коливань став 0,9 с. Визначити відносне видовження пружини після підвішування додаткового вантажу.

*Дано:*

$$T_1 = 0,8 \text{ с};$$

$$T_2 = 0,9 \text{ с}$$

$$\frac{\Delta x}{x} \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Період коливань пружинного маятника визначається за формулою:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Коли до пружини підвісили додатковий вантаж масою  $\Delta m$ , період коливань став

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m + \Delta m}{k}}.$$

Поділимо  $T_2^2$  на  $T_1^2$ , і після перетворень дістанемо

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{T_2^2}{T_1^2} - 1. \quad (1)$$

На вантаж у стані рівноваги (рис. 1) діють дві сили:  $m\vec{g}$  — сила тяжіння і  $\vec{F}_n$  — сила пружності.

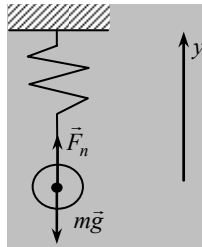


Рис. 1

У векторній формі маємо:

$$m\vec{g} + \vec{F}_n = 0.$$

У проекції на  $y$  дістанемо:

$$F_n - mg = 0.$$

Оскільки сила тяжіння вантажу врівноважується силою пружності пружини, то можна записати:

$$mg = kx \text{ і } (m + \Delta m)g = k(x + \Delta x).$$

Поділивши почленно ліві і праві частини цих рівнянь, дістанемо:

$$1 + \frac{\Delta m}{m} = 1 + \frac{\Delta x}{x},$$

або

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta m}{m}.$$

Тоді рівняння (1) набирає вигляду:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{T_2^2}{T_1^2} - 1,$$

або

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{T_2^2 - T_1^2}{T_1^2}.$$

Виконуємо обчислення:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{0,18 - 0,64}{0,64} = 0,266.$$

**Відповідь.** Відносне видовження пружини після підвішування додаткового вантажу дорівнює 0,266.

**Задача 3.** Годинник з маятником довжиною 1 м за добу відстає на 1 год. На скільки потрібно змінити довжину маятника, щоб годинник не відставав?

*Дано:*

$$l = 1 \text{ м};$$

$$\Delta t = 1 \text{ год} = 3600 \text{ с};$$

$$t = 24 \text{ год} = 24 \cdot 3600 \text{ с}$$

$$\Delta l - ?$$

*Розв'язання*

Позначимо  $T_1$  період коливань маятника завдовжки  $l$ , а  $T_2$  — період коливань маятника, що відповідає точному ходу годинника.

Цей маятник зробить за добу  $N = t / T_2$  коливань, маятник за-  
вдовжки  $l$  цю саму кількість коливань зробить за час  $t + \Delta t$ , тому  
для того щоб годинник ішов точно, маятник потрібно вкоротити.  
Отже,

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ а } T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l - \Delta l}{g}}.$$

Обидва маятника здійснюють однакову кількість коливань, а отже,

$$\frac{t}{T_2} = \frac{t + \Delta t}{T_1},$$

або

$$\frac{t}{2\pi\sqrt{\frac{l - \Delta l}{g}}} = \frac{t + \Delta t}{2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}, \Rightarrow t\sqrt{l} = (t + \Delta t)\sqrt{l - \Delta l}.$$

Поділимо це рівняння на  $(t + \Delta t)$  і піднесемо до квадрата:

$$\left(\frac{t}{t + \Delta t}\right)^2 l = l - \Delta l.$$

Звідси

$$\Delta l = l \left(1 - \left(\frac{t}{t + \Delta t}\right)^2\right).$$

Виконуємо обчислення:

$$\Delta l = 1 \left(1 - \left(\frac{24}{25}\right)^2\right) = 1(1 - 0,92) = 0,08 \text{ м.}$$

**Відповідь.** Маятник треба вкоротити на 0,08 м.

**Задача 4.** Тягарець масою 2 кг, підвішений на пружині, коливається гармонічно, роблячи 10 коливань за 4 с. Визначити повну енергію тягарця під час коливань, якщо перед початком коливань тягарець відхилили від положення рівноваги на відстань 8 см, після чого його відпустили і він почав коливатися.



**Дано:**

$$m = 2 \text{ кг};$$

$$N = 10;$$

$$t = 4 \text{ с};$$

$$A = 8 \text{ см} = 0,08 \text{ м}$$

$$E = ?$$

**Розв'язання**

При гармонічних коливаннях повна енергія коливальної системи

$$E = \frac{kA^2}{2}.$$

Циклічна частота визначається так:

$$\frac{k}{m} = \omega_o^2 \Rightarrow k = m\omega_o^2.$$

або

$$\omega_o = 2\pi\nu = 2\pi \frac{N}{t}.$$

Отже, коефіцієнт жорсткості дорівнює:

$$k = m\omega_o^2 = m \frac{4\pi^2 N^2}{t^2}.$$

Підставивши значення  $k$  у формулу для визначення повної енергії пружинного маятника, дістанемо:

$$E = \frac{2\pi^2 N^2 A^2 m}{t^2}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[E] = \left[ \frac{\text{м}^2 \text{кг}}{\text{с}^2} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}].$$

Виконуємо обчислення:

$$E = 2 \cdot 3,14^2 \cdot 10^2 \cdot 0,0064 \cdot \frac{2}{16} = 1,58 \text{ Дж}.$$

**Відповідь.** Повна енергія тягарця дорівнює 1,58 Дж.

**Задача 5.** Визначити коефіцієнт пружності пружини ресори вагона, вага якого з вантажем дорівнює  $5 \cdot 10^5$  Н, якщо за швидкості 12 м/с вагон сильно розгойдується внаслідок поштовхів на стиках рейок. Довжина рейки — 12,8 м. Вагон має 4 ресори.

*Дано:*

$$P = 5 \cdot 10^5 \text{ Н};$$
$$v = 12 \text{ м/с};$$
$$l = 12,8 \text{ м}$$

$$k_1 = ?$$

*Розв'язання*

Коливання вагона вимушені. Сильне розгойдування вагона виникає внаслідок того, що період власних коливань вагона з вантажем збігається з періодом коливань сили, яка викликає його вимушені коливання.

Період дії сили, що викликає коливання вагона, знайдемо, поділивши довжину рейки на швидкість вагона:

$$T = \frac{l}{v}.$$

Період власних коливань вагона з вантажем можна визначити за формулою

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

звідки коефіцієнт пружності всіх ресор визначається так:

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} = \frac{4\pi m v^2}{l^2}.$$

Оскільки на одну ресору припадає вага, що дорівнює  $\frac{P}{4}$ , дістанемо коефіцієнт пружності ресори так:

$$k_1 = \frac{4\pi^2 P v^2}{4l^2 g}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[k_1] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{м} / \text{с}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$k_1 = \frac{3,14^2 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 12^2}{12,8^2 \cdot 9,8} = 4,42 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

**Відповідь.** Коефіцієнт пружності ресори дорівнює  $4,42 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ .

**Задача 6.** Точка масою 10 г виконує гармонічні коливання за законом косинуса, причому найбільше зміщення точки від положення рівноваги становить 5 см, період коливань — 3 с, початкова фаза дорівнює нулю. Записати рівняння коливань та знайти зміщення, швидкість і кінетичну енергію точки через 7 с після початку коливань.

*Дано:*

$$m = 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг};$$

$$A = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м};$$

$$\varphi = 0;$$

$$T = 3 \text{ с};$$

$$t = 7 \text{ с}$$

$$x(t) \text{ — ? } v \text{ — ? } E_k \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Рівняння гармонічних коливань у загальному вигляді:

$$x = A \cos \omega_0 t.$$

Запишемо рівняння гармонічних коливань, враховуючи умови задачі, так:

$$x = 0,05 \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

Швидкість точки, що коливається, визначається так:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin \omega_0 t.$$

Кінетична енергія

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Виконуємо обчислення:

$$x = 0,05 \cos \frac{2\pi}{3} \cdot 7 = 0,05 \cos \left( 2\pi + \frac{\pi}{3} \right) = 0,05 \cos \frac{\pi}{3} = 0,025 \text{ м};$$

$$v = -0,05 \frac{2\pi}{3} \sin \frac{2\pi}{3} t = 0,096 \text{ м/с};$$

$$E_k = \frac{0,01(0,096)^2}{2} = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

**Відповідь.** Рівняння коливань має такий вигляд  $x = 0,05 \cos \frac{2\pi}{T} t$ ; зміщення через 7 с дорівнює 0,025 м; швидкість — 0,096 м/с; кінетична енергія  $-4,6 \cdot 10^{-5}$  Дж.

### **К-Х-1.5. Задачі для аудиторного розв'язування**

**1-1.** Матеріальна точка виконує гармонічні коливання, період яких дорівнює 1 с, амплітуда — 10 см. Якою буде швидкість точки у той момент часу, коли її зміщення дорівнює 5 см? ( $54,4 \cdot 10^{-2}$  м/с)

**1-2.** Визначити максимальне прискорення матеріальної точки, що здійснює гармонічне коливання з амплітудою 15 см, якщо найбільша швидкість точки 30 см/с. ( $0,6$  м/с<sup>2</sup>)

**1-3.** Визначити максимальну швидкість і максимальне прискорення точки, що коливається гармонічно, якщо її амплітуда дорівнює 6 см, а період — 5 с. ( $7,5 \cdot 10^{-2}$  м/с;  $9,47 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup>)

**1-4.** Прискорення матеріальної точки, що коливається гармонічно,  $a = -2 \sin t$  м/с<sup>2</sup>. Визначити зміщення точки від положення рівноваги через 1,57 с після початку коливань. (2 м)

**1-5.** Матеріальна точка здійснює коливання за законом косинуса. Початкова фаза коливань дорівнює нулю, амплітуда коливань — 10 см, період коливань — 2 с. Визначити зміщення точки відносно положення рівноваги в момент часу  $t_1 = T/4$  та  $t_2 = T/2$ . (0; -0,1 м)

**1-6.** Визначити повну енергію маятника, що являє собою кульку масою 10 г, підвішену на нитці завдовжки 30 см, якщо амплітуда коливань дорівнює 3 см. ( $1,47 \cdot 10^{-4}$  Дж)

**1-7.** Тіло масою 0,01 кг здійснює гармонічні коливання з амплітудою 0,05 м та частотою  $10$  с<sup>-1</sup>. Визначити повну енергію тіла. ( $1,25 \cdot 10^{-3}$  Дж)

**1-8.** Тіло масою 10 г коливається за таким законом  $x = 5 \sin(\pi t / 5 + \pi / 4)$  см. Визначити максимальну силу, що діє на тіло, та повну енергію тіла, що коливається. ( $1,97 \cdot 10^{-4}$  Н;  $4,93 \cdot 10^{-6}$  Дж)

**1-9.** У кабіні ліфта висить маятник. У нерухомому ліфті період коливань маятника 1 с. Якщо ліфт рухається з прискоренням, то період коливань дорівнює 1,2 с. Визначити прискорення, з яким рухається ліфт. ( $3$  м/с<sup>2</sup>)

**1-10.** Космічний корабель рухається з прискоренням. Період коливань математичного маятника, який підвішено в кабіні корабля, дорівнює 2,56 с. Визначити прискорення корабля, якщо довжина маятника 2 м. ( $12$  м/с<sup>2</sup>).

**1-11.** Два маятники одночасно починають коливатися. За час перших 15 коливань першого маятника другий здійснив 10 повних коливань. Визначити відношення довжин цих маятників. (2,25)

**1-12.** Підвішений вантаж розтягує легку пружину на 16 см. Визначити період коливань вантажу на цій пружині. (0,8 с)

**1-13.** Визначити вагу вантажу, який на пружині з жорсткістю 250 Н/м виконує 20 повних коливань за 16 с. ( $2,76 \cdot 10^{-2}$  Н)

**1-14.** З яким прискоренням і в якому напрямі має рухатися кабіна ліфта, щоб математичний маятник, який перебуває в ній, за 150 с зробив 100 повних коливань? Період коливань маятника в нерухомому стані дорівнює 1 с. ( $5,5 \text{ м/с}^2$ , до низу)

**1-15.** У скільки разів необхідно зменшити довжину математичного маятника, щоб період його коливань на висоті 100 км дорівнював періоду коливань початкової довжини на поверхні Землі? (1,13)

**1-16.** Математичний маятник з періодом 1 с являє собою кульку масою 16 г, яку підвішено на нитці з діелектрика. Кульку заряджають негативним зарядом і поміщають в електричне поле, напрямлене знизу вгору. Період коливань став 0,8 с. Визначити силу електричної дії поля на кульку. ( $8,82 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ )

**1-17.** За якої швидкості потяга математичний маятник завдовжки 44 см, підвішений у вагоні, матиме найбільшу амплітуду коливань, якщо довжина рейок — 25 м? (18,8 м/с)

**1-18.** Підвішене на пружині тіло масою 100 г здійснює гармонічні вертикальні коливання з амплітудою 4 см. Визначити період коливань тіла, якщо для розтягування пружини на 1 см необхідна сила 0,1 Н. Визначити повну енергію коливань маятника. Масою пружини знехтувати. ( $0,628 \text{ с}$ ;  $8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ )

### ***К-Х-1.6. Задачі для самостійного розв'язування***

**1-19.** Період гармонічних косинусоїдальних коливань матеріальної точки — 1,2 с, амплітуда — 4 см, початкова фаза дорівнює нулю. Визначити зміщення точки через 0,3 с після початку коливань. (0)

**1-20.** Рівняння руху тіла  $x = 3 \cos 4\pi t$  см, де  $t$  вимірюється в секундах. Визначити амплітуду, частоту й період коливань, а також зміщення для фази  $60^\circ$ . ( $3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ; 2 Гц; 0,5 с;  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ )

**1-21.** Визначити амплітуду гармонічних косинусоїдальних коливань, якщо для фази  $\pi/4$  рад зміщення дорівнює 7 см. (0,1 м)

**1-22.** Рівняння гармонічних коливань частинки  $x = 2 \cos (0,5\pi t + 0,2\pi)$  см. Визначити період коливань, максимальну швидкість та зміщення частинки в момент часу 1 с. (4 с;  $3,14 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ ;  $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ )

**1-23.** Кулька масою 100 г, яку підвішено до невагомої пружини жорсткістю 20 Н/м, гармонічно коливається. Визначити зміщення кульки від положення рівноваги в момент часу, коли її прискорення дорівнює  $6 \text{ м/с}^2$ . ( $3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ )

**1-24.** Матеріальна точка масою 10 г коливається за законом  $x = 0,05 \sin(0,6t + 0,8)$  м. Визначити максимальну силу, що діє на точку. ( $1,8 \cdot 10^{-4}$  Н)

**1-25.** Швидкість тіла, що виконує гармонічні коливання у момент проходження положення рівноваги дорівнює 0,4 м/с, повна енергія тіла —  $2 \cdot 10^{-2}$  Дж. Визначити масу тіла. (0,25 кг)

**1-26.** Матеріальна точка коливається за законом  $x = 0,08 \cos 2\pi t$  м. Визначити координату, швидкість і прискорення через  $1/6$  с після початку коливань. (0,04 м;  $-0,44$  м/с;  $-1,6$  м/с<sup>2</sup>)

**1-27.** Тягарець, прикріплений до пружини, коливається за законом  $x = 0,1 \cos 20t$  м. Маса тягарця — 0,2 кг. Яка сила діє на тягарець у крайньому положенні? (8 Н)

**1-28.** Коливальний рух математичного маятника описується рівнянням  $x = 0,08 \cos \pi t$  м. Визначити довжину цього маятника. (1 м)

**1-29.** Визначити період коливань полярної молекули в однорідному горизонтальному електричному полі, напруженість якого  $E$ . Молекулу вважати гантелькою, на кінцях якої розміщено матеріальні точки з масою  $m$  та зарядами  $-q$  і  $+q$ . Відстань між цими зарядами становить  $l$ .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{lm}{2qE}}$$

**1-30.** Тягарець, прикріплений до пружини, коливається з амплітудою 4 см. Визначити повну енергію коливань тягарця, якщо жорсткість пружини дорівнює 1 кН/м. (0,8 Дж)

**1-31.** Підвішений до пружини тягарець коливається вздовж вертикалі з амплітудою 6 см. Визначити повну енергію коливань тягарця, якщо жорсткість пружини дорівнює 0,5 кН/м. (0,18 Дж)

**1-32.** Тягарець масою 0,3 кг, підвішений до пружини, виконує гармонічні коливання й за 1 хв виконує 60 повних коливань. Визначити жорсткість пружини. (12 Н/м)

**1-33.** Визначити прискорення вільного падіння на Місяці, якщо маятниковий годинник на його поверхні йде в 2,46 рази повільніше, ніж на Землі. ( $1,62$  м/с<sup>2</sup>)

**1-34.** Два маятники починають коливатись одночасно. Один маятник виконує 40 коливань, другий — 60 за такий самий час. Визначити відношення довжин цих маятників. (9 : 4)

**1-35.** За однаковий час один математичний маятник робить 30 коливань, а другий — 36. Визначити довжини цих маятників, якщо один з них на 22 см коротший від другого. (0,72 м; 0,5 м)

**1-36.** Визначити частоту коливань пружинного маятника, якщо пружина у вертикальному положенні розтягується під дією підвішеного до неї тягарця на 1 см. (5 Гц)

**1-37.** Визначити масу тягарця, який на пружині, що має жорсткість 15 Н/м, виконує 20 повних коливань за 16 с. (0,24 кг)

**1-38.** Математичний маятник виконує коливання в рідині з густиною у  $n$  раз меншою за густину матеріалу маятника. Нехтуючи силою тертя, визначити, у скільки разів період коливань маятника в рідині відрізняється від періоду коливань у повітрі.  
( $\sqrt{n(n-1)}$ )

**1-39.** Як зміниться хід годинника з маятником, якщо його перемістити від полюса до екватора? (Уповільниться)

**1-40.** Кулька, підвішена на нитці, виконує коливання. Як зміниться частота коливань, якщо кульці надати позитивного заряду і помістити в однорідне електричне поле, силові лінії якого напрямлено вниз? (Збільшиться)

**1-41.** Математичний маятник обертається навколо вертикальної осі й описує при цьому конічну поверхню з кутом  $\alpha$  при вершині. Доведіть, що при малих  $\alpha$  період його обертання дорівнює періоду коливань.  
( $T = 2\pi\sqrt{\frac{l \cos \alpha}{g}}$ )

**1-42.** Два тіла однакової маси, підвішені на пружинах, виконують вертикальні коливання. Жорсткість однієї пружини в  $n$  раз більша за жорсткість другої. Максимальні швидкості тіл під час коливань однакові. У скільки разів відрізняються амплітуди коливань тіл? (У  $\sqrt{n}$  раз)

**1-43.** Як зміниться хід маятникового годинника за час  $t$ , якщо його підняти над поверхнею Землі на висоту  $h$ . Радіус Землі  $R$ . (Відстане на  $\Delta t = t\left(\frac{R+h}{R} - 1\right)$  с)

**1-44.** Вагон потяга, в якому підвішено математичний маятник, рухається горизонтально і рівномірно. Як зміниться період його коливань  $T$ , якщо потяг почне рухатися з прискоренням  $0,6 g$ ? (Зменшиться)

**1-45.** Математичний маятник завдовжки 1 м підвішено у вагоні потяга, який рухається горизонтально з прискоренням. Визначити період коливань маятника, якщо сила тяги потяга 1400 Н, маса вагона 400 кг, коефіцієнт тертя 0,25. (2 с)

**1-46.** На скільки відстане маятниковий годинник за добу, якщо його підняти над поверхнею Землі на 100 000 м? Радіус Землі 6400 км. (На 1350 с)

**1-47.** Математичний маятник завдовжки 1,5 м занурено в рідину. Визначити період його коливань, якщо густина матеріалу маятника дорівнює  $7800 \text{ кг/м}^3$ , а рідини —  $790 \text{ кг/м}^3$ . (2,6 с)



### *К-Х-2.1. Теоретичні відомості*

Прикладом електричного кола, в якому можуть відбуватися **вільні електромагнітні коливання**, є ідеальний коливальний контур. Він складається з конденсатора ємністю  $C$  та котушки з індуктивністю  $L$ , опір провідників контура дорівнює нулю  $R = 0$ . Електромагнітні коливання в такому контурі утворюються так.

Спочатку заряджається конденсатор до максимального значення енергії електричного поля  $W_{\text{маг}} = q_m^2 / 2C$  (рис. К-Х-2.1, а). Далі він замикається на котушку індуктивності й починає розряджатися (рис. К-Х-2.1, б). Завдяки явищу самоіндукції струм у коливальному контурі поступово збільшується, і його значення досягає максимуму

в момент часу  $t = \frac{T}{4}$  (рис. К-Х-2.1, в), коли заряд конденсатора і напруга дорівнюють нулю. Далі струм у колі, зберігаючи свій напрям, поступово зменшується (рис. К-Х-2.1, г) і дорівнює нулю при  $t = \frac{T}{2}$  (рис. К-Х-2.1, д).

У цей час конденсатор перезаряджається. Далі в проміжки часу від  $\frac{1}{2}T$  до  $\frac{3}{4}T$  (рис. К-Х-2.2, а—в) і від  $\frac{3}{4}T$  до  $T$  процеси повторюються у зворотному порядку (рис. К-Х-2.2, г, д). При замиканні на котушку попередньо зарядженого конденсатора в коливальному контурі відбуваються вільні коливання заряду  $q$  конденсатора, напруги  $U$  на його обкладках і сили струму  $I$  в котушці за гармонічним законом (рис. К-Х-2.1, е і 2.2, е):

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$U = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де  $q_m$  — максимальне значення заряду;  $I_m = q_m \omega_0$  — максимальне значення сили струму;  $U_m = q_m/C$  — максимальне значення напруги.

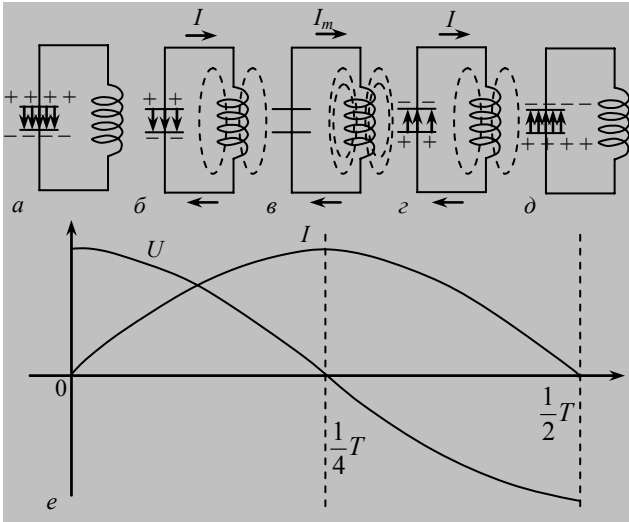


Рис. К-Х-2.1

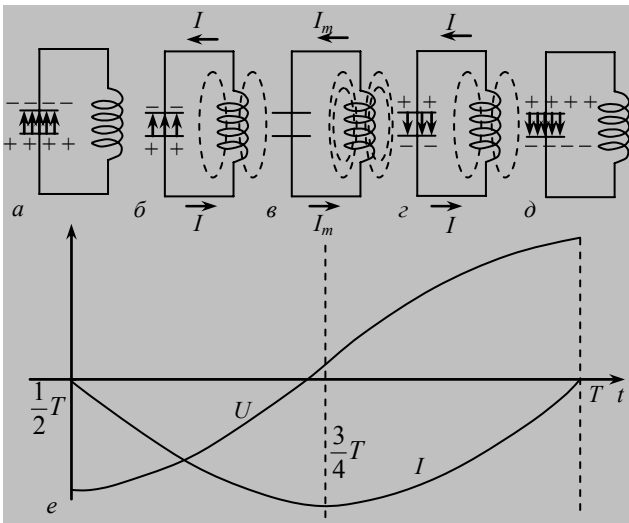


Рис. К-Х-2.2

**Власна циклічна** частота цих коливань визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

а **період** — за формулою Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Під час вільних гармонічних коливань у коливальному контурі відбувається

**періодичне перетворення енергії електричного поля конденсатора в енергію магнітного поля котушки і навпаки.**

У моменти часу  $t = 0, \frac{1}{2}T, T$  і т. д. енергія електричного поля максимальна, а енергія магнітного поля дорівнює нулю, оскільки струм у колі також дорівнює нулю. У моменти часу  $\frac{1}{4}T, \frac{3}{4}T$  тощо енергія магнітного поля максимальна, а енергія електричного поля дорівнює нулю, оскільки конденсатор повністю розряджено.

**Енергія електричного поля** конденсатора визначається за формулою

$$W_{\text{ел}} = \frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0),$$

а **магнітного поля** котушки —

$$W_{\text{маг}} = \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Для будь-якого моменту часу **повна енергія** коливального контура визначається як сума енергій електричного і магнітного полів і дорівнює максимальній енергії або електричного, або магнітного поля, тобто залишається **сталю**:

$$W = W_{\text{ел}} + W_{\text{маг}} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \text{const}.$$

Із порівняння електричних і механічних коливань випливає, що енергія електричного поля конденсатора аналогічна потенціальній енергії деформації пружини, а енергія магнітного поля котушки

аналогічна кінетичній енергії маятника. Індуктивність відіграє роль маси, величина  $1/C$  — жорсткості пружини, заряду відповідає зміщення з положення рівноваги, а сили струму — швидкість. Тому аналогія між електричними і механічними коливаннями поширюється і на математичні рівняння, які їх описують.

Якщо врахувати те, що котушка індуктивності та провідники мають опір  $R$ , то під час протікання струму в контурі енергія коливань перетворюватиметься на внутрішню енергію провідників згідно із законом Джоуля—Ленца і коливання загасатимуть.

Для того щоб коливання не загасали, у коливальний контур потрібно під'єднати джерело змінної напруги, електрорушійна сила якого змінюється з часом за гармонічним законом з частотою  $\omega$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Тоді в контурі збуджуються вимушені коливання заряду конденсатора, напруги і сили струму з такою самою частотою  $\omega$ .

**Амплітуду сили струму** можна визначити за формулою

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Будь-яке електричне коло містить ті самі елементи  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , що й коливальний контур. Тому формулу для визначення амплітуди сили струму називають **законом Ома для кола змінного струму**. Вираз

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

називається **повним опором** кола змінного струму.

У цій формулі  $R$  — *активний опір* кола,  $X_L = \omega L$  — *реактивний індуктивний опір*,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  — *реактивний ємнісний опір*. Закон

Ома в такому вигляді виконується і для миттєвих значень сили струму та напруги.

**Максимального** значення амплітуда сили струму досягає при тій частоті  $\omega$ , коли виконується умова

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

тобто

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

**Тоді частота коливань зовнішньої ЕРС дорівнює власній частоті коливань контура:**

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0.$$

У коливальному контурі настає *резонанс*.

*Змінний* струм в електричних колах є результатом збудження в них вимушених електромагнітних коливань, які створюються *генераторами* змінного струму, установлюваними на електростанціях. Моделлю генератора є дротяна рамка площею  $S$ , що рівномірно обертається з частотою  $n$  в однорідному магнітному полі з індукцією  $B$  (рис. К-Х-2.3). Магнітний потік, який проходить через рамку, періодично змінюється в часі за законом

$$\Phi = BS \cos 2\pi nt.$$

Множник  $2\pi n$  — це кількість коливань магнітного потоку за  $2\pi$  секунд, тобто циклічна частота  $\omega = 2\pi n$ . Згідно із законом електромагнітної індукції в рамці виникає змінна ЕРС:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BS \cos \omega t)}{dt} = BS\omega \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t.$$

Вона змінюється за гармонічним законом і в зовнішньому колі утворює вимушені гармонічні коливання сили струму. Максимальне значення ЕРС дорівнює  $\varepsilon_m = BS\omega$ .

Напруга та сила струму на будь-якій ланці зовнішнього кола з опором  $R$  змінюються за законом

$$U = U_m \sin \omega t; \quad I = I_m \sin \omega t.$$

*Діючим* значенням сили струму  $I_d$  називається сила сталого струму, який виділяє в провіднику за той самий час таку саму кількість теплоти, що й змінний струм:

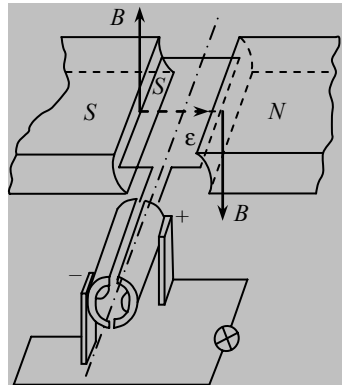


Рис. К-Х-2.3

$$I_{\text{д}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}};$$

**діюче** значення змінної напруги

$$U_{\text{д}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

**діюче** значення ЕРС

$$\varepsilon_{\text{д}} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}.$$

**Трансформатор** — це прилад для перетворення змінної напруги і струму. Він складається із залізного осердя, на яке намотано дві котушки (обмотки) з кількістю витків  $N_1$  та  $N_2$  (рис. К-Х-2.4). Якщо до первинної обмотки підвести змінну напругу  $U_1$ , то на вторинній розімкненій обмотці згідно з законом електромагнітної індукції виникає напруга (ЕРС). Значення ЕРС, що виникли в обмотках, пропорційні до кількості їхніх витків:

$$\varepsilon_1 \sim N_1 \text{ і } \varepsilon_2 \sim N_2.$$

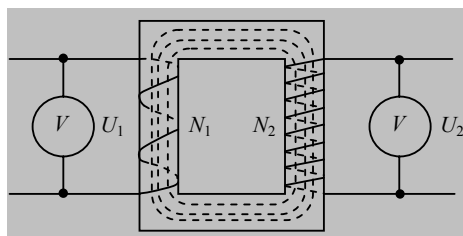


Рис. К-Х-2.4

Відношення

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = K$$

називають **коефіцієнтом трансформації**. Якщо  $K > 1$  — трансформатор знижувальний, а якщо  $K < 1$  — трансформатор підвищувальний.

При замиканні вторинної обмотки трансформатора на споживача відбувається передавання енергії струму з первинного кола у вторинне. Якщо знехтувати втратами, то згідно із законом збереження енергії потужності струмів у первинному і вторинному колах дістанемо:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Оскільки під час роботи трансформатора є втрати енергії, то  $U_2 I_2$  трохи менше, ніж  $U_1 I_1$ . Відношення

$$\frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} = \eta$$

визначає коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора.

### ***К-Х-2.2. Завдання для поточного тестування***

**1.** Під час електромагнітних коливань аналогом зміщенню в механічних коливаннях виступає:

1) сила струму в котушці; 2) заряд конденсатора; 3) напруга на обкладках конденсатора.

**2.** Підставити в рівняння електромагнітних коливань необхідні позначення величин  $q = \dots \cos(\dots t + \dots)$ :

1)  $v$ ; 2)  $2\pi v$ ; 3)  $\varphi$ ; 4)  $\varphi_0$ ; 5)  $q_m$ ; 6)  $A$ ; 7)  $\omega_0$ .

**3.** Якщо заряд змінюється з часом за законом косинуса, то сила струму в котушці при гармонічних коливаннях визначається за такою формулою:

1)  $q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 2)  $-q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $\frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

**4.** Якщо заряд змінюється з часом за законом косинуса, то напруга на обкладках конденсатора при гармонічних коливаннях визначається за такою формулою:

1)  $q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 2)  $-q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $\frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

**5.** Максимальне значення сили струму в котушці при гармонічних коливаннях визначається за формулою:

1)  $q_m$ ; 2)  $q_m \omega_0$ ; 3)  $\frac{q_m}{C}$ .

**6.** Максимальне значення напруги на обкладках конденсатора при гармонічних коливаннях визначається за формулою:

- 1)  $q_m$ ; 2)  $q_m \omega_0$ ; 3)  $\frac{q_m}{C}$ ; 4)  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ ; 5)  $2\pi\sqrt{LC}$ .

7. Власна циклічна частота при електромагнітних коливаннях визначається так:

- 1)  $q_m \omega_0$ ; 2)  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ ; 3)  $\frac{q_m}{C}$ ; 4)  $2\pi\sqrt{LC}$ .

8. Період коливань при електромагнітних коливаннях визначається так:

- 1)  $q_m \omega_0$ ; 2)  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ ; 3)  $\frac{q_m}{C}$ ; 4)  $2\pi\sqrt{LC}$ .

9. Якщо заряд змінюється з часом за законом косинуса, то енергія електричного поля конденсатора визначається за такою формулою:

- 1)  $\frac{q_m^2}{2C}$ ; 2)  $\frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $\frac{LI_m^2}{2}$ ; 4)  $\frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

10. Якщо заряд змінюється з часом за законом косинуса, то енергія магнітного поля котушки визначається за такою формулою:

- 1)  $\frac{q_m^2}{2C}$ ; 2)  $\frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $\frac{LI_m^2}{2}$ ; 4)  $\frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

11. Максимальна енергія електричного поля конденсатора визначається за такою формулою:

- 1)  $\frac{q_m^2}{2C}$ ; 2)  $\frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $\frac{LI_m^2}{2}$ ; 4)  $\frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

12. Максимальна енергія магнітного поля конденсатора визначається за такою формулою:

- 1)  $\frac{q_m^2}{2C}$ ; 2)  $\frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $\frac{LI_m^2}{2}$ ; 4)  $\frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

13. Повна енергія коливального контуру визначається за такою формулою:

- 1)  $\frac{q_m^2}{2C}$ ; 2)  $\frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ ; 3)  $\frac{LI_m^2}{2}$ ; 4)  $\frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ .



14. Через конденсатор ємністю 250 мкФ протікає змінний струм. Опір конденсатора при частоті 50 Гц становить, Ом:

1) 10,7; 2) 11,7; 3) 12,7; 4) 13,7; 5) правильної відповіді тут немає.

15. Котушку індуктивністю 35 мГн увімкнуто в мережу змінного струму. Індуктивний опір котушки при частоті 60 Гц становить, Ом:

1) 12,2; 2) 12,7; 3) 13,2; 4) 13,7; 5) правильної відповіді тут немає.

16. При максимальному (амплітудному) значенні змінного струму в колі 30 А амперметр покаже значення сили струму, А:

1) 15; 2) 18; 3) 21; 4) 24; 5) правильної відповіді тут немає.

17. Діюче значення напруги в колі змінного струму  $5 \cdot 10^5$  В. На яку напругу, МВ, необхідно розрахувати ізолятори лінії електропередачі?

1) 0,4; 2) 0,7; 3) 1; 4) 1,3; 5) правильної відповіді тут немає.

18. Миттєве значення ЕРС синусоїдного струму 120 В для фази  $\pi/3$  рад. Амплітудне значення ЕРС становить, В:

1) 135; 2) 138,5; 3) 142; 4) 145,5; 5) правильної відповіді тут немає.

19. Миттєве значення ЕРС синусоїдного струму 120 В для фази  $\pi/3$  рад. Діюче значення ЕРС становить, В:

1) 90; 2) 99; 3) 108; 4) 111; 5) правильної відповіді тут немає.

20. Увімкнений у коливальний контур конденсатор заповнили діелектриком із діелектричною проникністю 4. У скільки разів змінилася частота власних коливань контура?

1) 1/4; 2) 1/2; 3) 2; 4) 4; 5) правильної відповіді тут немає.

21. Діюче значення напруги на конденсаторі коливального контура дорівнює 100 В. Ємність конденсатора дорівнює 10 пФ. Максимальне значення електричної та магнітної енергії в контурі становить, Дж:

1)  $10^{-6}$ ; 2)  $10^{-7}$ ; 3)  $10^{-8}$ ; 4)  $10^{-9}$ ; 5) правильної відповіді тут немає.

22. Сила струму в колі змінюється з часом за законом  $I = 3 \sin 20 t$ . Визначити частоту електричних коливань:

1) 3 Гц; 2) 20 Гц; 3)  $20 t$  Гц; 4)  $\frac{10}{\pi}$  Гц; 5)  $\frac{\pi}{10}$  Гц; 6) інша відповідь.

23. Заряд конденсатора в коливальному контурі змінюється за законом  $q = 10^2 \cos 20 t$ . Визначити циклічну частоту коливань заряду.

- 1)  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; 2)  $20t \text{ с}^{-1}$ ; 3)  $20 \text{ с}^{-1}$ ; 4)  $\frac{10}{\pi} \text{ с}^{-1}$ ; 5) інша відповідь.

24. Як зміниться період вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо ємність конденсатора збільшити у 4 рази?

- 1) Зменшиться у 4 рази; 2) зменшиться у 2 рази; 3) збільшиться у 4 рази; 4) збільшиться у 2 рази; 5) інша відповідь.

25. У коливальному контурі максимальне значення енергії електричного поля конденсатора дорівнює 50 Дж, максимальне значення енергії магнітного поля котушки 50 Дж. Як змінюється з часом повна енергія електромагнітного контура?

- 1) Не змінюється і дорівнює 100 Дж; 2) не змінюється і дорівнює 50 Дж; 3) не змінюється і дорівнює 0 Дж; 4) змінюється від 0 до 100 Дж; 5) змінюється від 0 до 50 Дж; 6) інша відповідь.

26. Як зміниться амплітуда коливань ЕРС індукції у дротяній рамці, що обертається в однорідному магнітному полі, при збільшенні індукції магнітного поля у 2 рази та збільшенні частоти обертання у 2 рази?

- 1) Зменшиться в 4 рази; 2) зменшиться у 2 рази; 3) збільшиться в 4 рази; 4) збільшиться у 2 рази; 5) інша відповідь.

27. Діюче значення напруги на ділянці кола змінного струму дорівнює 220 В. Визначити амплітуду коливання напруги на цій ділянці кола.

- 1) 220 В; 2) 440 В; 3)  $220\sqrt{2}$  В; 4)  $\frac{220}{\sqrt{2}}$  В; 5) інша відповідь.

28. Як зміниться ємнісний опір конденсатора при збільшенні частоти змінного струму у 2 рази?

- 1) Зменшиться в 4 рази; 2) зменшиться у 2 рази; 3) збільшиться в 4 рази; 4) збільшиться у 2 рази; 5) інша відповідь.

29. Діюче значення напруги на ділянці кола змінного струму дорівнює 127 В. Визначити амплітуду коливання напруги на цій ділянці кола.

- 1) 127 В; 2) 254 В; 3)  $127\sqrt{2}$  В; 4)  $\frac{127}{\sqrt{2}}$  В; 5) інша відповідь.

**30.** По спіралях електролампи, яку ввімкнено в електричне коло, протікає спочатку постійний, а потім протягом такого самого часу змінний струм також максимальної сили. Яка кількість теплоти виділиться спіраллю в обох випадках?

1) Однакова; 2) у першому випадку більше; 3) в другому випадку більше.

**31.** Як зміниться кількість теплоти, що виділяється в коливальному контурі за період, якщо максимальне значення сили струму  $I$  збільшити вдвічі, а відстань між пластинами  $d$  зменшити в чотири рази.

1) Зменшиться у 8 раз; 2) не зміниться; 3) збільшиться у 8 раз; 4) інша відповідь.

**32.** Як зміниться індуктивний опір котушки при збільшенні частоти змінного струму у 2 рази?

1) Зменшиться в 4 рази; 2) зменшиться у 2 рази; 3) збільшиться в 4 рази; 4) збільшиться у 2 рази; 5) інша відповідь.

### ***К-Х-2.3. Висновки з теми***

1. Вільні незгасаючі коливання виконує система, яка не витрачає своєї енергії на подолання сил опору або тертя.

2. Під час вільних незгасаючих коливань повна енергія системи залишається сталою.

3. Під час електромагнітних коливань енергія електричного поля весь час перетворюється в енергію магнітного поля і навпаки.

4. Аналогом сил тертя або опору в електромагнітному контурі виступає активний опір  $R$ .

5. Під час протікання струму в контурі згідно із законом Джоуля—Ленца у провідниках виділяється теплота. Енергія коливань перетворюється у внутрішню енергію провідників, повна енергія зменшується, коливання загасають.

6. В електромагнітних вимушених коливаннях аналогом сили є періодично змінювана ЕРС.

7. При резонансній частоті створюються умови для нагромадження системою енергії, яка надходить від зовнішнього джерела.

8. Амплітуда сили змінного струму пропорційна до амплітуди ЕРС.

9. Активний опір визначається питомим електричним опором і геометрією провідника, а реактивний опір залежить від частоти струму.

### К-Х-2.4. Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Заряд на пластинах конденсатора коливального контуру змінюється з часом за законом  $q = 50 \cos 100\pi t$ , Кл. Визначити період і частоту коливань у контурі, циклічну частоту, амплітуду коливань сили струму. Записати рівняння  $I = f(t)$ , залежності сили струму від часу.

*Дано:*

$$q = 50 \cos 100\pi t, \text{ Кл}$$

$$T \text{ — ? } \nu \text{ — ?}$$

$$\omega_0 \text{ — ? } q_m \text{ — ?}$$

$$I_m \text{ — ? } I = f(t) \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Заряд з часом змінюється за законом:

$$q = q_m \cos \omega t.$$

В умовах задачі закон зміни з часом заряду має такий вигляд:  $q = 50 \cos 100\pi t$ .

Із рівнянь випливає, що амплітудне значення заряду дорівнює 50 Кл; власна циклічна частота коливань становить  $100 \pi \text{ с}^{-1}$ .

Період коливань заряду

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0};$$

частота коливань

$$\nu = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{2\pi}{T \cdot 2\pi} = \frac{1}{T}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[T] = \left[ \frac{1}{\text{с}^{-1}} \right] = [\text{с}]; \quad [\nu] = \left[ \frac{1}{\text{с}} \right] = [\text{Гц}].$$

Виконуємо обчислення:

$$T = \frac{2\pi}{100\pi} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с},$$

$$\nu = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ Гц}.$$

Залежність сили струму від часу визначається так:

$$I = -\frac{dq}{dt} = q_m \omega \sin \omega_0 t, \text{ або } I = 50 \cdot 100 \pi \sin 100 \pi t = 500 \pi \sin 100 \pi t.$$

Тоді амплітудне значення сили струму  $I_m = 5000 \pi = 5 \cdot 10^3 \pi$ , А.

**Відповідь.**  $q_m = 50$  Кл;  $T = 0,02$  с;  $\nu = 50$  Гц;  $\omega_0 = 100 \pi \text{ с}^{-1}$ ;  $I_m = 5 \cdot 10^3 \pi$ , А;  $I = 5000 \pi \sin 100 \pi t$ , А.

**Задача 2.** Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 10 мкФ і котушки індуктивністю 100 мГн. Визначити амплітуду коливань напруги, якщо амплітуда коливань сили струму дорівнює 0,1 А.

**Дано:**

$$C = 10 \text{ мкФ} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 10^{-5} \text{ Ф};$$
$$L = 100 \text{ мГн} = 100 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 0,1 \text{ Гн};$$
$$I_m = 0,1 \text{ А}$$

$$U_m \text{ — ?}$$

**Розв'язання**

Згідно із законом збереження енергії максимальне значення енергії електричного поля конденсатора дорівнює максимальній енергії магнітного поля котушки індуктивності:

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2},$$

звідки

$$U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[U_m] = \left[ \text{А} \sqrt{\frac{\text{Гн}}{\text{Ф}}} \right] = \left[ \text{А} \sqrt{\frac{\text{Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}} \right] = [\text{В}].$$

Виконуємо обчислення:

$$U_m = 0,1 \sqrt{\frac{0,1}{10^{-5}}} = 0,1 \sqrt{10^4} = 0,1 \cdot 10^2 = 10 \text{ В}.$$

**Відповідь.** Амплітуда коливань напруги дорівнює 10 В.

**Задача 3.** Визначити індуктивний опір провідника з індуктивністю 0,05 Гн у колі змінного струму частотою 50 Гц?

**Дано:**

$$L = 0,05 \text{ Гн};$$
$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$X_L \text{ — ?}$$

**Розв'язання**

Індуктивний опір визначається так:

$$X_L = \omega_0 L,$$

або

$$X_L = 2\pi\nu L.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[X_L] = [\text{Гц} \cdot \text{Гн}] = \left[ \frac{\text{Ом} \cdot \text{с}}{\text{с}} \right] = [\text{Ом}].$$

Виконуємо обчислення:

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,05 = 15,7 \text{ Ом}.$$

*Відповідь.* Індуктивний опір дорівнює 15,7 Ом.

**Задача 4.** Конденсатор увімкнено в мережу змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Сила струму в колі конденсатора дорівнює 2,5 А. Визначити ємність конденсатора?

*Дано:*

$$U = 220 \text{ В};$$

$$I = 2,5 \text{ А};$$

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

---

$$C = ?$$

*Розв'язання*

За законом Ома для змінного струму маємо:

$$X_c = \frac{U}{I}.$$

Ємнісний опір конденсатора

$$X_c = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

Звідси визначимо ємність конденсатора

$$C = \frac{1}{2\pi\nu X_c}.$$

або

$$C = \frac{I}{2\pi\nu U}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[C] = \left[ \frac{\text{А}}{\text{Гц} \cdot \text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \right] = [\text{Ф}].$$

Виконуємо обчислення:

$$C = \frac{2,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 220} = 36 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 36 \text{ мкФ}.$$

**Відповідь.** Ємність конденсатора дорівнює 36 мкФ.

**Задача 5.** Напряга на обкладках конденсатора ємністю  $9 \cdot 10^{-7}$  Ф в коливальному контурі змінюється з часом за законом  $U = 50 \cos 10^4 \pi t$ , В. Визначити індуктивність контура та закон зміни з часом сили струму в колі.

*Дано:*

$$U = 50 \cos 10^4 \pi t \text{ В};$$

$$C = 9 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

$$L \text{ — ? } I(t) \text{ — ?}$$

Звідси

*Розв'язання*

Власна частота коливань заряду в коливальному контурі визначається так:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C}.$$

Власну циклічну частоту знайдемо з рівняння коливань напруги на обкладках конденсатора:  $\omega_0 = 10^4 \pi$ .

Оскільки сила струму в контурі (у котушці) випереджає напругу на конденсаторі на  $\pi/2$ , то для сили струму  $I(t)$  можна записати таке рівняння:

$$I = I_m \cos(10^4 \pi t + \pi/2) = -I_m \sin 10^4 \pi t.$$

Амплітуду сили струму визначимо за формулою

$$I_m = \frac{U_m}{X_L},$$

або

$$I_m = \frac{U_m}{\omega_0 L}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[L] = \left[ \frac{1}{\text{с}^{-2} \cdot \text{Ф}} \right] = [\text{Гн}];$$

$$[I] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{с}^{-1}} \right] = [\text{А}].$$

Виконуємо обчислення:

$$L = \frac{1}{9 \cdot 10^{-7} \cdot 10^8 \cdot 3,14^2} = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,12 \text{ мГн}.$$

$$I_m = \frac{50}{10^4 \cdot 3,14 \cdot 1,12 \cdot 10^{-3}} = 1,42 \text{ А}.$$

Закон зміни сили струму з часом у колі має вигляд:

$$I = 1,42 \cdot \sin 10^4 \pi t, \text{ А}.$$

**Відповідь.** Індуктивність дорівнює 1,12 мГн; закон зміни сили струму з часом такий:  $I = 1,42 \sin 10^4 \pi t, \text{ А}$ .

**Задача 6.** Конденсатор ємністю 2,4 нФ з'єднали з котушкою індуктивністю 32 мкГн, яка має опір 2 Ом. Визначити резонансну частоту коливального контура.

*Дано:*

$$C = 2,4 \text{ нФ} = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Ф};$$

$$L = 32 \text{ мкГн} = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ Гн};$$

$$X_L = 2 \text{ Ом}$$

$$\omega_{\text{рез}} \text{ — ? } \nu_{\text{рез}} \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Резонансна частота визначається за формулою:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ або } \nu_{\text{рез}} = \frac{\omega_{\text{рез}}}{2\pi},$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\omega_{\text{рез}}] = \left[ \frac{1}{\sqrt{\text{Гн} \cdot \text{Ф}}} \right] = \left[ \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{Кл}}{\text{А} \cdot \text{В}}}} \right] = \left[ \frac{1}{\sqrt{\text{с}^2 \cdot \text{Кл} \cdot \text{Кл}^{-1}}} \right] = \left[ \frac{1}{\text{с}} \right] = [\text{с}^{-1}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{3,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,4 \cdot 10^{-9}}} = \frac{1}{\sqrt{3,2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-14}}} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}.$$

**Відповідь.** Резонансна частота така  $\omega_{\text{рез}} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ,  $\nu_{\text{рез}} = 0,57 \text{ МГц}$ .



**Задача 7.** Конденсатор і котушка з'єднані послідовно. Ємнісний опір становить  $5 \cdot 10^3$  Ом. Якою має бути індуктивність котушки, щоб резонанс напруги настав за частоти струму 20 кГц.

*Дано:*

$$X_C = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$\nu_{\text{рез}} = 20 \text{ кГц} = 2 \cdot 10^4 \text{ Гц}$$


---


$$L = ?$$

*Розв'язання*

Резонансна частота визначається за формулою

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ або } \omega_{\text{рез}}^2 = \frac{1}{LC}.$$

Ємнісний опір визначається так:

$$X_C = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C},$$

звідки

$$C = \frac{1}{X_C \omega_{\text{рез}}}.$$

Підставимо ємність конденсатора у формулу для визначення резонансної частоти:

$$\omega_{\text{рез}}^2 = \frac{X_C \omega_{\text{рез}}}{L},$$

звідки

$$L = \frac{X_C}{\omega_{\text{рез}}} = \frac{X_C}{2\pi\nu_{\text{рез}}}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[L] = \left[ \frac{\text{Ом}}{\text{Гц}} \right] = [\text{Ом} \cdot \text{с}] = [\text{Гн}].$$

Виконуємо обчислення:

$$L = \frac{5 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,4 \cdot 10^{-1} = 0,04 \text{ Гн}.$$

**Відповідь.** Індуктивність котушки дорівнюватиме 0,04 Гн.

**Задача 8.** Напруга на первинній обмотці трансформатора для живлення ламп дорівнює 220 В, сила струму в ній становить 8 А. Визначити ККД трансформатора, якщо напруга на вторинній обмотці дорівнює 3200 В, а сила струму в ній — 0,5 А.

*Дано:*

$$\begin{aligned}U_1 &= 220 \text{ В}; \\I_1 &= 8 \text{ А}; \\U_2 &= 3200 \text{ В}; \\I_2 &= 0,5 \text{ А}\end{aligned}$$

$\eta$  — ?

*Розв'язання*

ККД трансформатора визначається за формулою

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100 \%$$

Виконуємо обчислення:

$$\eta = \frac{3200 \cdot 0,5}{220 \cdot 8} \cdot 100 \% = 90,9 \%$$

**Відповідь.** ККД трансформатора дорівнює 91 %.

**Задача 9.** Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації 5 увімкнено в мережу з напругою 220 В. Визначити ККД трансформатора, якщо напруга на вторинній обмотці дорівнює 42 В.

*Дано:*

$$\begin{aligned}U_1 &= 220 \text{ В}; \\U_2 &= 42 \text{ В}; \\K &= 5\end{aligned}$$

$\eta$  — ?

*Розв'язання*

ККД трансформатора визначається так:

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100 \%$$

Нехтуючи втратами енергії, маємо  
 $U_1 I_1 = U_2 I_2$ .

Тоді можна записати таке рівняння:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Напруга на обмотках трансформатора прямо пропорційна до кількості витків у обмотках:

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

Оскільки

$$\frac{N_1}{N_2} = K,$$

то

$$\eta = \frac{KU_2}{U_1} \cdot 100 \%$$

Виконуємо обчислення:

$$\eta = \frac{5 \cdot 42}{220} \cdot 100 \% = 95 \%$$

**Відповідь.** ККД трансформатора становить 95 %.

### ***К-Х-2.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**2-1.** Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 4,8 мкФ і котушки індуктивністю 24 мГн. Визначити частоту коливань у контурі? (474 Гц)

**2-2.** Індуктивність і ємність коливального контура відповідно дорівнюють 70 Гн і 70 мкФ. Визначити період і частоту коливань у контурі. (0,44 с; 2,3 Гц)

**2-3.** Коливальний контур складається з котушки індуктивності і двох конденсаторів, з'єднаних паралельно. Період власних коливань контура — 20 мкс. Визначити період коливань, якщо конденсатори ввімкнуті послідовно. (10 мкс)

**2-4.** Заряд конденсатора коливального контура генератора незгаючих коливань залежить від часу за законом  $q = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 100\pi t$ . Записати залежність сили струму в контурі від часу, визначити значення сили струму в контурі в момент часу 0,01 с. Яку індуктивність має котушка контура, якщо значення ємності конденсатора становить 1 мкФ? ( $I = 0,4\pi \cos 100\pi t$ , А; -1,26 А; 10 Гн)

**2-5.** Заряд на пластинах конденсатора коливального контура змінюється з часом за законом  $q = 50 \cos 100\pi t$ . Визначити період і частоту коливань у контурі, циклічну частоту, амплітуду коливань заряду, амплітуду коливань сили струму. Записати залежність сили струму в контурі від часу. (50 Кл; 0,02 с; 50 Гц;  $100\pi \text{ с}^{-1}$ ;  $5 \cdot 10^3 \pi$  А;  $I = -5000\pi \cdot \sin 100\pi t$ , А)

**2-6.** Обчислити повну енергію коливального контура, якщо максимальний струм у котушці індуктивності дорівнює 1,2 А, максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора становить 1200 В, а частота коливань контура —  $10^5 \text{ с}^{-1}$ . ( $1,15 \cdot 10^{-3}$  Дж)

**2-7.** Частота власних коливань контура дорівнює 1600 Гц, індуктивність контура — 1 мГн. Максимальна напруга на конденсаторі становить 200 В. Визначити максимальний заряд конденсатора й максимальну силу струму в контурі. ( $1,98 \cdot 10^{-3}$  Кл; 19,9 А)

**2-8.** Максимальна енергія магнітного поля коливального контура дорівнює 10 Дж за сили струму 0,8 А. Чому дорівнює частота коливань контура, якщо максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора становить 1200 В? (7,64 Гц)

**2-9.** Індуктивність коливального контура дорівнює 1,6 мГн, ємність конденсатора — 0,04 мкФ, а максимальна напруга, прикладена до конденсатора — 200 В. Визначити максимальну силу струму в контурі. Опором контура знехтувати. (1 А)

**2-10.** У коло змінного струму ввімкнено послідовно резистор з опором 1 кОм, конденсатор ємністю 0,5 Гн. Визначити ємнісний опір, індуктивний опір і повний опір кола за частоти 50 Гц і 10 кГц. (3,2 кОм; 57 Ом; 3,2 кОм; 16 Ом; 31,4 кОм; 31,4 кОм)

**2-11.** Визначити період коливань змінного струму, якщо конденсатор ємністю 2 мкФ має ємнісний опір 8 Ом. ( $10^{-4}$  с)

**2-12.** Сила струму в первинній обмотці знижувального трансформатора дорівнює 0,6 А за напруги на її кінцях 120 В. Сила струму у вторинній обмотці 4,8 А, а напруга — 12 В. Визначити ККД та коефіцієнт трансформації. (80 %; 10)

**2-13.** Напруга на первинній обмотці трансформатора для живлення ламп освітлення дорівнює 220 В, сила струму в ній — 8 А. Визначити ККД трансформатора, якщо напруга на вторинній обмотці трансформатора становить 3200 В, а сила струму в ній — 0,45 А. (91 %)

**2-14.** Коливальний контур складається з конденсатора та котушки індуктивності. Заряд на обкладках конденсатора змінюється з часом за законом синуса, початкова фаза дорівнює 0. Через який час енергія електричного поля конденсатора дорівнюватиме енергії магнітного поля котушки?

$\left(\frac{T}{4} \text{ с}\right)$

**2-15.** Коливальний контур складається з конденсатора та котушки індуктивності. Заряд на обкладках конденсатора змінюється з часом за законом синуса, період коливань заряду дорівнює 0,1 с. Через який час енергія електричного поля конденсатора дорівнюватиме половині енергії магнітного поля котушки? (10 мс)

**2-16.** Коливальний контур складається з конденсатора та котушки індуктивності. Сила струму в контурі змінюється з часом за законом  $I = 6,2 \cos 10\pi t$  А. Яким буде відношення енергії електричного поля конденсатора до енергії магнітного поля котушки через 10 с? (0,03)

**2-17.** Значення ЕРС змінюється за законом  $\varepsilon = 100 \sin 800\pi t$  В. Визначити амплітуду, період та фазу коливань, якщо миттєве значення ЕРС дорівнює 50 В. (100 В; 0,0025 с;  $\pi/6$ )

**2-18.** На конденсаторі коливального контура ефективна напруга 100 В, ємність конденсатора 10 пФ. Визначити максимальне значення електричної і магнітної енергії в контурі. ( $10^{-9}$  Дж)

### ***К-Х-2.6. Задачі для аудиторного розв'язування***

**2-19.** Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 1 мГн і повітряного конденсатора, що має дві дискові пластини діаметром 20 см кожна, розміщені на відстані 1 см одна від одної. Визначити період вільних коливань у контурі. ( $10^{-6}$  с)

**2-20.** Яку ємність потрібно ввести в коливальний контур, щоб за індуктивності 50 мкГн дістати вільні коливання частотою 10 МГц? (5 пФ)

**2-21.** Котушку якої індуктивності потрібно ввімкнути в коливальний контур, щоб за ємності конденсатора 50 пФ частота вільних коливань контура дорівнювала 10 МГц? ( $5 \cdot 10^{-6}$  Гн)

**2-22.** Частота вільних коливань у контурі становить 1,55 кГц, індуктивність котушки — 12 мГн. Визначити електроємність конденсатора контура. (0,88 мкФ)

**2-23.** Напруга на конденсаторі коливального контура змінюється за рівнянням  $U = 70 \cos 10^4 \pi t$  В. Ємність конденсатора — 0,02 мкФ. Обчислити максимальний заряд конденсатора й частоту електричних коливань у контурі. ( $1,4 \cdot 10^{-6}$  Кл;  $5 \cdot 10^3$  Гц)

**2-24.** У коливальному контурі ємність конденсатора дорівнює 4 мкФ, індуктивність котушки — 1,6 Гн. Конденсатор зарядили до напруги 100 В. Обчислити електричну енергію, якої надано конденсатору, і максимальну силу струму в контурі. Активним опором контуру знехтувати. ( $2 \cdot 10^{-2}$  Дж; 0,16 А)

**2-25.** Визначити ємність конденсатора в контурі, якщо індуктивність становить 0,2 Гн, максимальна напруга на конденсаторі — 200 В, максимальне значення сили струму — 0,1 А? (0,05 мкФ)

**2-26.** Визначити індуктивність котушки, якщо амплітуда змінної напруги на її кінцях 160 В, амплітуда сили струму в ній 10 А, частота струму 50 Гц. Активним опором котушки знехтувати. ( $5,1 \cdot 10^{-2}$  Гн).

**2-27.** Соленоїд із залізним осердям, що має індуктивність 1 Гн і активний опір обмотки 10 Ом, увімкнено спочатку в мережу постійного струму з напругою 100 В, а потім у мережу змінного струму з діючою напругою 100 В і частотою 50 Гц. Визначити силу струму, що проходить через соленоїд у першому і другому випадках. (10 А; 0,31 А)

**2-28.** До затискачів генератора приєднано конденсатор ємністю 0,1 мкФ. Визначити амплітуду напруги на затискачах, якщо амплітуда струму дорівнює 2,2 А, період коливань струму —  $2 \cdot 10^{-4}$  с. (0,7 кВ)

**2-29.** За якої частоти струму котушка індуктивністю 1 Гн має опір 2,5 кОм? (400 Гц)

**2-30.** Сила струму в котушці індуктивністю 0,5 Гн змінюється за законом  $I = 0,1 \cdot \cos 628t$  А. Визначити залежність напруги на котушці від часу та індуктивний опір ( $U = 31,4 \cdot \sin(628t + \pi/2)$  В; 314 Ом)

**2-31.** Напруга на конденсаторі змінюється за законом  $U = 308 \cdot \cos(100\pi t - \pi/2)$  В. Записати рівняння для миттєвого значення сили струму, що проходить через конденсатор, якщо його ємність дорівнює 20 мкФ. ( $I = 1,92 \cdot \cos 100\pi t$  А)

**2-32.** У коло змінного струму напругою 125 В увімкнено котушку з активним опором 15 Ом та індуктивністю 64 мГн. Визначити частоту струму, якщо амплітудне значення сили струму становить 7 А. (50 Гц)

**2-33.** Сила струму в колі з активним опором 10 Ом змінюється за законом  $I = I_m \sin(\omega t + \pi/6)$  А. У момент часу  $t = T/12$  миттєве значення сили струму дорівнює 1 А. Визначити амплітуду сили струму і кількість теплоти, що виділяється за 1 хв. (1,15 А; 400 Дж)

**2-34.** У коло змінного струму частотою 50 Гц і напругою 220 В увімкнули послідовно конденсатор ємністю 40 мкФ, котушку індуктивністю 0,5 Гн і резистор з опором 5 Ом. Визначити діюче значення сили струму в колі. (2,85 А)

**2-35.** У колі змінного струму промислової частоти конденсатор має опір 1000 Ом. Визначити опір цього конденсатора при вмиканні його в коло змінного струму частотою 5 кГц. Яка ємність конденсатора? (10 Ом; 3 мкФ)

**2-36.** Лампочку від кишенькового ліхтарика, розраховану на напругу 3,5 В і силу струму 0,28 А, з'єднали послідовно з конденсатором і ввімкнули в мережу з напругою 220 В і частотою 50 Гц. Якою

має бути ємність конденсатора, щоб лампочка мала нормальне розжарення? (4 мкФ)

**2-37.** Дійсне значення напруги на конденсаторі в контурі дорівнює 100 В. Визначити максимальне значення енергії конденсатора і котушки в контурі, якщо електроємність конденсатора дорівнює 10 пФ. ( $10^{-7}$  Дж)

**2-38.** У коливальному контурі до замикання кола конденсатора ємністю 50 нФ заряджено до напруги 100 В. Після замикання кола максимальне значення сили струму становило 0,2 А. Визначити частоту коливань контура. Активним опором кола і випромінюванням електромагнітних хвиль можна знехтувати. ( $6,37 \cdot 10^3$  Гц)

**2-39.** Котушку індуктивності, що має дуже малий активний опір, увімкнули в коло змінного струму частотою 50 Гц. За напруги 157 В сила струму дорівнює 5 А. Яка індуктивність котушки? (0,1 Гн)

**2-40.** Трансформатор потужністю 60 Вт у первинній обмотці має 1200 витків, у вторинній — 40 витків. Яку напругу потрібно подати на первинну обмотку трансформатора, щоб у вторинній обмотці при активному навантаженні проходив струм 10 А? Втратами енергії знехтувати. (180 В)

**2-41.** Трансформатор, що підвищує напругу з 100 В до 3300 В, має замкнене осердя у вигляді кільця. Через кільце пропущено провідник круглої форми, кінці якого приєднано до вольтметра. Вольтметр показує 0,5 В. Скільки витків мають обмотки трансформатора? (первинна — 200; вторинна — 6 600 витків)

**2-42.** Підвищувальний трансформатор увімкнено в коло з напругою 220 В. Яка сила струму в первинній обмотці, якщо напруга на клеммах вторинної обмотки дорівнює 2 200 В і по ній проходить струм 0,5 А? Втратами енергії в трансформаторі знехтувати.

**2-43.** Визначити опір вторинної обмотки трансформатора з коефіцієнтом трансформації 10, якщо при ввімкненні первинної обмотки в коло з напругою 120 В у вторинній обмотці проходить струм силою 5 А, а напруга на ній становить 6 В. Втратами енергії в первинній обмотці знехтувати. (1,2 Ом)

**2-44.** Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації 20 увімкнено в коло з напругою 220 В. Вторинну котушку трансформатора приєднали до споживача, в якому проходить струм 0,5 А. Визначити опір споживача, якщо опір вторинної котушки трансформатора дорівнює 2 Ом. (20 Ом)

**2-45.** Змінний струм  $I = 14 \cos 314t$  А протікає через опір 10 Ом. Визначити кількість теплоти, що виділяється на цьому опорі протягом одного періоду. (19,6 Дж)

**2-46.** Енергія магнітного поля котушки індуктивності коливального контура в деякий момент часу дорівнює 0,6 мДж. Визначити енергію електричного поля конденсатора в цей час, якщо повна енергія кондуктора дорівнює 2 мДж. Заряд на обкладках конденсатора змінюється за законом синуса. (1,4 мДж)

**2-47.** Сила струму в коливальному контурі змінюється за законом синуса. Скільки теплоти виділяється в цьому контурі за чверть періоду, якщо він складається з індуктивності 0,2 Гн і плоского конденсатора з площею пластин  $20 \text{ см}^2$  і відстанню між ними 0,5 см. Омичний опір дорівнює 5 Ом, максимальне значення сили струму 10 А. (0,33 мДж)





### *К-Х-3.1. Теоретичні відомості*

Процес поширення коливань будь-якої природи в просторі або середовищі називають *хвилею*.

Якщо викликати коливання будь-якої точки пружного середовища, то внаслідок сил взаємодії (пружності) між частинками почнуть коливатись і інші точки середовища.

**Процес поширення механічних коливань у пружному середовищі називається механічною хвилею.**

Частинки середовища не переносяться хвилею, а лише коливаються навколо своїх положень рівноваги.

**Хвиля переносить тільки енергію коливання.**

Розрізняють хвилі поперечні та поздовжні. У поперечній хвилі частинки коливаються в напрямках, перпендикулярних до напрямку поширення хвилі, а в поздовжній — уздовж напрямку поширення хвилі. Поперечні хвилі виникають тільки у твердих тілах, а в рідинах та газах вони не утворюються, оскільки під час зсуву шарів рідини або газу один відносно одного пружні сили не виникають.

Основними характеристиками хвилі є фазова швидкість  $v$ , період  $T$  і циклічна частота  $\omega$ , довжина хвилі  $\lambda$  і хвильове число  $k$ . **Фазова швидкість**, або **швидкість поширення хвилі**, — це швидкість, з якою переміщується у просторі фаза коливань. Фазова швидкість залежить від густини середовища і його пружних властивостей. **Період хвилі** — це час, за який будь-яка частинка середовища виконує одне повне коливання. **Довжина хвилі** — це відстань, на яку поширюється хвиля за один період:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\omega} = \frac{2\pi v}{\omega}.$$

Частота коливань залежить тільки від властивостей джерела хвилі. Від властивостей середовища залежать швидкість поширення хвилі та її довжина. Геометричне місце точок, які коливаються в одній фазі, називається *хвильовою поверхнею*. Залежно від форми хвильової поверхні хвилі бувають *плоскі* і *сферичні*. **Фронтом хвилі** називається поверхня, котра поділяє частинки, які вже коливаються від частинок, ще не втягнених у коливальний рух. Фронт хвилі має форму хвильової поверхні і переміщується в середовищі зі швидкістю поширення хвилі.

**Рівняння плоскої гармонічної хвилі**, яка поширюється вздовж осі  $x$ , має вигляд

$$s_x = A \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right] = A \cos \left( \omega t - \frac{\omega x}{v} \right) = A \cos (\omega t - kx).$$

Величина  $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{2\pi}{\lambda}$  називається *хвильовим числом*.

Механічні коливання, які поширюються з частотою від 16 до 20 000 Гц і сприймаються органами слуху, називаються *звуковими хвилями*. Гучність звуку визначається кількістю енергії, яка переноситься хвилею, висота звуку відповідає частоті коливань. Чим більша частота, тим вищий тон. За теорією Максвелла змінне електричне поле завжди породжує змінне магнітне поле і навпаки. Отже, електричні та магнітні поля — це прояв єдиного цілого — електромагнітного поля. Електромагнітне поле, яке поширюється в просторі, називається *електромагнітною хвилею*. В електромагнітній хвилі виконують коливання вектори напруженості електричного  $\vec{E}$  і магнітного  $\vec{H}$  полів, причому їхні коливання виконуються в одній фазі, а площини коливань взаємно перпендикулярні. Площини коливань векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  взаємно перпендикулярні і перпендикулярні до напрямку поширення хвилі, тому електромагнітні хвилі *поперечні* (рис. К-Х-3.1). Швидкість їх поширення у вакуумі стала і дорівнює  $3 \cdot 10^8$  м/с. Довжина хвилі електромагнітної хвилі у вакуумі:

$$\lambda_0 = cT,$$

а довжина хвилі в середовищі

$$\lambda = vT.$$

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у середовищі менша, ніж у вакуумі. Відповідно, і довжина хвилі також менша,

**а частота електромагнітної хвилі не змінюється при переході хвилі із вакууму в середовище.**

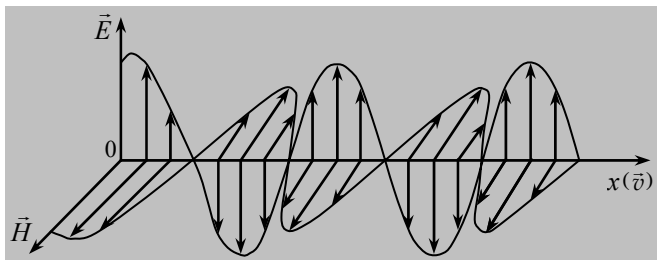


Рис. К-Х-3.1

**Рівняння плоскої електромагнітної хвилі**, яка поширюється вздовж додатного напрямку осі  $x$ , має вигляд

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos(\omega t - kx);$$

$$\vec{H} = \vec{H}_m \cos(\omega t - kx).$$

Електромагнітні хвилі в порядку зменшення їхньої довжини умовно поділяють на діапазони: радіовипромінювання, інфрачервоні промені, видиме світло, ультрафіолетові промені, рентгенівські промені та гамма-випромінювання. Такий поділ електромагнітних хвиль називається **шкалою електромагнітних хвиль**.

$\gamma$ -промені	$< 0,01 \dots 800 \text{ \AA}$	$<$	Ультрафіолетові промені	$< 3900 \dots 7500 \text{ \AA}$	$<$	$1 \dots 2 \text{ мм}$	$<$	Радіохвилі
	Рентгенівські промені			Видимі промені, або світло				Інфрачервоні промені

Електромагнітні хвилі виникають під час прискореного руху зарядів, практично їх можна збудити за допомогою відкритого коливального контура (передавальної антени). Змінний електричний струм високої частоти, створений у передавальній антені, збуджує в навколишньому середовищі електромагнітне поле, яке, поширюючись, досягає приймальної антени і викликає в ній змінний струм тієї самої частоти. Це і є принцип радіозв'язку. Для практичного здійснення радіозв'язку застосовують передавач, за допомогою якого випромінюються високочастотні мо-

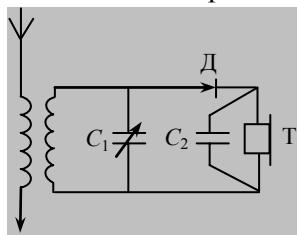


Рис. К-Х-3.2

дульовані коливання, та приймач, в якому відбувається прийом, підсилення та детектування електромагнітних коливань.

Простий радіоприймач містить коливальний контур, який складається з котушки індуктивності та конденсатора змінної ємності  $C_1$  (див. рис. К-Х-3.2). Контур приєднано до кола, що складається з детектора Д (елемента з односторонньою провідністю), конденсатора  $C_2$  та телефону Т. Радіохвиля збуджує в коливальному контурі модульовані коливання, які перетворюються детектором у коливання звукової частоти, а ці коливання телефоном перетворюються на звук.

Властивості електромагнітних хвиль багато в чому аналогічні властивостям механічних хвиль.

### **К-Х-3.2. Завдання для поточного тестування**

1. Дописати формулювання: *Механічною хвилею називається процес .....* будь-якої .....

2. Поперечні хвилі виникають у таких речовинах:

1) газах; 2) твердих тілах; 3) рідинах.

3. Поздовжні хвилі виникають у таких речовинах:

1) газах; 2) твердих тілах; 3) рідинах.

4. Дописати формулювання: *Фазова швидкість — це .....*, з якою переміщується у просторі .....

5. Дописати формулювання: *Довжина хвилі — це .....*, на яку поширюється .....

6. Довжина хвилі визначається за формулами:

1)  $\frac{\omega}{v}$ ; 2)  $vT$ ; 3)  $\frac{2\pi}{vT}$ ; 4)  $\frac{v}{\lambda}$ ; 5)  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ; 6)  $\frac{2\pi v}{\omega}$ .

7. Хвильове число визначається за формулами:

1)  $\frac{\omega}{v}$ ; 2)  $vT$ ; 3)  $\frac{2\pi}{vT}$ ; 4)  $\frac{v}{\lambda}$ ; 5)  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ; 6)  $\frac{2\pi v}{\omega}$ .

8. Рівняння механічної хвилі має такий вигляд:

1)  $A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ ; 2)  $A \cos(\omega t - kx)$ ; 3)  $E_m \cos(\omega t - kx)$ .

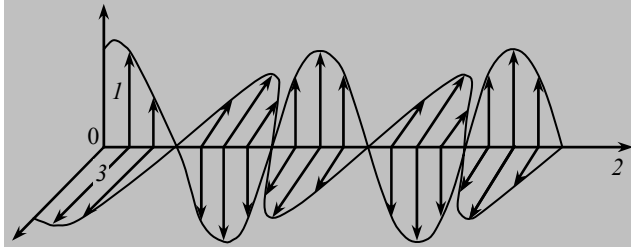
9. Дописати формулювання: *Електромагнітною хвилею називається поширення .....* поля в .....

10. Електромагнітні хвилі бувають такі:

1) поперечні і поздовжні; 2) поперечні; 3) поздовжні.

11. Показати на рисунку:

1) напрям коливань вектора напруженості електричного поля — 1, 2, 3; 2) напрям коливань вектора напруженості магнітного поля — 1, 2, 3; 3) напрям вектора швидкості поширення хвилі — 1, 2, 3.



12. Сталеві деталі перевіряють ультразвуковим дефектоскопом. Після випромінювання ультразвукового сигналу відбитий сигнал було прийнято через  $10^{-4}$  с. Якщо швидкість поширення ультразвуку в сталі дорівнює 5200 м, дефект в деталі виявлено на глибині, см:

1) 13; 2) 26; 3) 39; 4) 52; 5) правильної відповіді тут немає.

13. Відстань від корабля до айсберга вимірюється ультразвуковим локатором. Гідролокатором відбитий сигнал було прийнято через 2,6 с. Якщо швидкість поширення ультразвуку у воді дорівнює 1500 м/с, відстань від корабля до айсберга становить, м:

1) 1800; 2) 1950; 3) 2100; 4) 2250; 5) правильної відповіді тут немає.

14. Коливальний контур ємністю 2,6 нФ та індуктивністю 0,26 мкГн випромінює електромагнітні хвилі у вакуумі довжиною, м:

1) 29; 2) 39; 3) 49; 4) 59; 5) правильної відповіді тут немає.

15. Контур приймача з конденсатором ємністю 20 пФ налаштовано на довжину хвилі 5 м. Індуктивність котушки контура дорівнює, мкГн (вважати  $\pi^2 = 10$ ):

1) 0,15; 2) 0,25; 3) 0,35; 4) 0,45; 5) правильної відповіді тут немає.

16. Контур приймача з індуктивністю 50 мкГн налаштовано в резонанс з довжиною хвилі 300 м. Ємність конденсатора коливального контура дорівнює, нФ (вважати  $\pi^2 = 10$ ):

1) 0,05; 2) 0,5; 3) 5; 4) 50; 5) правильної відповіді тут немає.

17. Звуковий генератор випромінює хвилі частотою 170 Гц. Якщо швидкість поширення звуку в повітрі дорівнює 340 м/с, довжина звукової хвилі така:

- 1) 0,5 м ; 2) 1 м ; 3) 2 м ; 4) 57800 м; 5) інша відповідь.

18. Відкритий коливальний контур містить ємність  $C$  та індуктивність  $L$ . Довжина електромагнітної хвилі у повітрі, що випромінюється контуром, така:

- 1)  $2\pi c\sqrt{LC}$ ; 2)  $2\pi\sqrt{LC}$ ; 3)  $\frac{c}{2\pi\sqrt{LC}}$ ; 4)  $\frac{c}{\sqrt{LC}}$ ; 5) інша відповідь.

19. Контур радіоприймача налаштований на довжину хвилі 50 м. Як потрібно змінити індуктивність котушки коливального контура приймача, щоб налаштувати його на довжину хвилі 25 м?

- 1) Зменшити в 4 рази; 2) зменшити у 2 рази; 3) збільшити в 4 рази; 4) збільшити у 2 рази; 5) інша відповідь.

20. Літак перебуває на відстані  $6 \cdot 10^4$  м від радіолокатора. Відбитий від літака сигнал буде прийнято приблизно:

- 1) через  $2 \cdot 10^4$  с ; 2)  $4 \cdot 10^4$  с; 3)  $10^4$  с; 4) інша відповідь.

### К-Х-3.3. Висновки з теми

1. Механічна хвиля — це процес поширення механічних коливань у пружному середовищі.

2. Хвиля не переносить частинки середовища, хвиля переносить енергію коливального руху.

3. Процес поширення коливань у пружному середовищі відбувається завдяки передаванню коливального руху від однієї частинки до іншої за рахунок сил взаємодії між частинками.

4. Частинки середовища мають масу і внаслідок цього інертні. Тому навіть найближчі частинки коливаються з певною різницею фаз.

5. Поширення коливань відповідає переміщенню у просторі фази коливань.

6. Механічні хвилі не поширюються у вакуумі.

7. Звук — це хвилі в пружному середовищі з частотою 16...20000 Гц, які сприймає людське вухо.

8. Електромагнітна хвиля — це процес поширення у просторі змінного в часі електромагнітного поля.

9. Електромагнітні хвилі поширюються як у вакуумі, так і в середовищі.

10. В електромагнітній хвилі вектори напруженості електричного і магнітного полів здійснюють коливання у взаємно перпендикулярних площинах. Електромагнітні хвилі — поперечні.

11. Змінні електричне і магнітне поля поширюються в просторі з однією і тією самою швидкістю. У вакуумі ця швидкість така:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

12. Світло — це електромагнітні хвилі, довжиною хвилі від 0,400 до 0,750 мкм, які сприймає людське око.

13. Механічні та електромагнітні хвилі мають схожі властивості.

### ***К-Х-3.4. Приклади розв'язування задач***

**Задача 1.** Звукові хвилі поширюються у воді зі швидкістю 1480 м/с, а в повітрі — зі швидкістю 340 м/с. У скільки разів зміниться довжина звукової хвилі при переході звуку у воду?

***Дано:***

$$v_1 = 1480 \text{ м/с;}$$

$$v_2 = 340 \text{ м/с}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = ?$$

звідки

***Розв'язання***

При переході хвилі з одного середовища в інше частота хвилі не змінюється, тому

$$\lambda_1 = v_1 T = \frac{v_1}{\nu}, \text{ а } \lambda_2 = \frac{v_2}{\nu},$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Виконуємо обчислення:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{1480}{340} = 4,35.$$

***Відповідь.*** Довжина звукової хвилі при переході звуку у воду збільшиться в 4,35 раза.

**Задача 2.** Визначити швидкість поширення поздовжньої звукової хвилі в мідному стрижні.

*Дано:*

$$E = 1176 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2;$$

$$\rho = 8900 \text{ кг/м}^3$$

$v$  — ?

*Розв'язання*

Швидкість поширення поздовжніх хвиль у пружному середовищі визначається за формулою

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де  $E$  — модуль Юнга, який визначається за таблицею,  $\rho$  — густина міді.

Перевіримо одиницю вимірювання:

$$[v] = \left[ \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}}} \right] = \left[ \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} \right] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$v = \sqrt{\frac{11,76 \cdot 10^8}{8,9 \cdot 10^3}} = 3630 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Відповідь.** Швидкість поширення поздовжньої звукової хвилі в мідному стрижні дорівнює 3630 м/с.

**Задача 3.** Визначити частоту і довжину хвилі електромагнітних хвиль, які випромінює радіопередавач, якщо період дорівнює  $10^{-6}$  с.

*Дано:*

$$T = 10^{-6} \text{ с};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$\nu$  — ?  $\lambda$  — ?

Довжина хвилі

*Розв'язання*

Частота коливань визначається так:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \text{ або } \lambda = cT.$$

Перевіримо одиницю величини



$$[\lambda] = \left[ \frac{\text{мс}}{\text{с}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\nu = \frac{1}{10^{-6}} = 10^6 \text{ Гц} = 1 \text{ МГц};$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{10^6} = 3 \cdot 10^2 = 300 \text{ м}.$$

**Відповідь.** Частота хвилі дорівнює 1 МГц; довжина хвилі — 300 м.

**Задача 4.** Визначити довжину хвилі електромагнітних хвиль, що випромінює контур передавача, якщо індуктивність контура становить 0,2 мГн, а максимальна напруга на конденсаторі дорівнює 0,1 А. Активним опором контуру знехтувати.

*Дано:*

$$L = 0,2 \text{ мГн} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн};$$

$$U_m = 200 \text{ В};$$

$$I_m = 0,1 \text{ А};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$\lambda$  — ?

*Розв'язання*

Довжина хвилі визначається так:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = cT.$$

Оскільки період дорівнює

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

то

$$\lambda = 2\pi c\sqrt{LC}.$$

За законом збереження енергії

$$\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}.$$

Звідси дістанемо таку формулу для визначення ємності конденсатора:

$$C = \frac{LI_m^2}{U_m^2}.$$

Тоді довжину хвилі визначимо так:

$$\lambda = \frac{2\pi c L I_m}{U_m}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\lambda] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{Гн}}{\text{с} \cdot \text{В}} \right] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot \text{В} \cdot \text{А}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\lambda = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1}{200} = 188,4 \text{ м}.$$

**Відповідь.** Довжина хвилі дорівнює 188,4 м.

**Задача 5.** Індуктивність коливального контуру приймача дорівнює 5 мГн. На яку довжину хвилі резонує контур приймача, якщо відношення максимальної сили струму в котушці індуктивності до максимальної напруги на обкладках конденсатора при резонансі дорівнює  $2 \frac{A}{B}$ ?

**Дано:**

$$L = 5 \text{ мГн}; = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$I_m / U_m = 2 \frac{A}{B};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\lambda = ?$$

**Розв'язання**

Довжина хвилі, на яку резонує контур, визначається так:

$$\lambda = cT = 2\pi c \sqrt{LC},$$

За законом збереження енергії виконується рівність:

$$\frac{L I_m^2}{2} = \frac{C U_m^2}{2},$$

звідки

$$C = \frac{L I_m^2}{U_m^2} = L n^2,$$

де  $n = \frac{I_m}{U_m}$ .

Тоді довжина хвилі

$$\lambda = 2\pi c \sqrt{L L n^2} = c 2\pi L n.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\lambda] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{В}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\lambda = 3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 188,4 \cdot 10^5 \text{ м.}$$

**Відповідь.** Контур резонує на довжину хвилі  $188,4 \cdot 10^4$  м.

**Задача 6.** Котушку індуктивністю  $3 \cdot 10^{-5}$  Гн приєднано до плоского конденсатора з площею пластини  $0,01 \text{ м}^2$  і відстанню між ними  $0,1$  мм. Визначити діелектричну проникність середовища, яке заповнює простір між пластинами, якщо контур настроєно на довжину хвилі  $750$  м.

*Дано:*

$$L = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Гн};$$

$$S = 0,01 \text{ м}^2;$$

$$d = 10^{-4} \text{ м};$$

$$\lambda = 750 \text{ м}$$

---


$$\epsilon \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Контур настроєно на прийом електромагнітної хвилі, тому період вільних електромагнітних коливань у контурі дорівнює періоду коливань вектора напруженості електричного поля в електромагнітній хвилі і визначається за формулою Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Період коливань електромагнітної хвилі визначається так:

$$T = \frac{\lambda}{c}.$$

Ємність плоского конденсатора розраховується за формулою

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

тоді

$$\frac{\lambda}{c} = 2\pi \sqrt{\frac{L\epsilon \epsilon_0 S}{d}},$$

звідки

$$\epsilon = \frac{\lambda^2 d}{c^2 4\pi^2 L S \epsilon_0}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\epsilon] = \left[ \frac{\text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гн} \cdot \text{Ф} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{с}^2}{\text{Гн} \cdot \text{Ф}} \right] = \left[ \frac{\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{В}}{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{Кл}} \right] = \left[ \frac{\text{с} \cdot \text{А}}{\text{Кл}} \right] = [1].$$

Виконуємо обчислення:

$$\epsilon = \frac{750^2 \cdot 10^{-4}}{9 \cdot 10^{16} \cdot 4 \cdot 3,14^2 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01} = 6.$$

**Відповідь.** Діелектрична проникність середовища, яке заповнює простір між пластинами конденсатора дорівнює 6.

**Задача 7.** На якій відстані від радіолокатора перебуває літак, якщо відбитий від нього сигнал прийнято через 0,2 мс після його випромінювання?

*Дано:*

$$t = 0,2 \text{ мс} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$s = ?$$

*Розв'язання*

На радіолокаторі передавач і приймач перебувають в одному й тому самому місці. Для випромінювання хвиль і прийому відбитих у радіолокаторах використовується одна й та сама антена. А тому час, витрачений хвилею на рух до літака й назад, можна визначити за формулою

$$t = \frac{l}{v},$$

але  $l = 2s$ , тоді

$$t = \frac{2s}{c},$$

де  $s$  — відстань до літака.

Отже, відстань до літака визначатиметься так:

$$s = \frac{tc}{2}.$$

Виконуємо обчислення:

$$s = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^8}{2} = 3 \cdot 10^4 \text{ м.}$$

**Відповідь.** Літак перебуває на відстані 30 км від радіолокатора.

**Задача 8.** Сила струму у відкритому коливальному контурі змінюється з часом за законом  $I = 0,1 \cos 6 \cdot 10^5 \pi t$  А. Визначити довжину хвилі електромагнітних хвиль, що ним випромінюються.

*Дано:*

$$I = 0,1 \cos 6 \cdot 10^5 \pi t \text{ А};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\lambda \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Довжина хвилі визначається за формулою

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}.$$

Із закону зміни з часом сили струму дістанемо циклічну частоту:

$$\omega = 6 \cdot 10^5 \pi \text{ рад/с.}$$

Частота коливань

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi},$$

тоді

$$\lambda = \frac{c2\pi}{\omega}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\lambda] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 3,14}{6 \cdot 10^5 \cdot 3,14} = 10^3 \text{ м.}$$

**Відповідь.** Довжина хвилі випромінюваних коливальним контуром хвиль дорівнює 1 км.

### ***К-Х-3.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**3-1.** Звукові коливання, які мають частоту 0,5 кГц і амплітуду 0,25 мм, поширюються в пружному середовищі. Визначити швидкість поширення хвиль, якщо довжина хвилі дорівнює 70 см (350 м/с)

**3-2.** Людина сприймає звук із частотою від 16 до  $20 \cdot 10^3$  Гц. Визначити інтервал довжин хвиль, який сприймає людина. Швидкість поширення звуку в повітрі — 340 м/с. (0,017—21,5 м)

**3-3.** З одного корабля на інший одночасно надсилаються два звукові сигнали в повітрі та у воді. Один сигнал після другого було прийнято через 1 с. Швидкість поширення звуку в повітрі — 340 м/с, а у воді — 1480 м/с. Визначити відстань між кораблями. (441 м)

**3-4.** На поверхні води поширюється хвиля зі швидкістю 2,4 м/с, частота якої — 2 Гц. Визначити фази коливань частинок води, розташованих на одній прямій та віддалених на 80 і на 120 см одна від одної. ( 4,19 рад; 6,28 рад)

**3-5.** Звукові коливання з періодом 0,01 с поширюються в повітрі. Визначити довжину хвилі й різницю фаз між двома точками, які містяться на одній прямій із джерелом коливань на відстані 1,7 м одна від одної. Швидкість поширення звуку в повітрі дорівнює 340 м/с. (3,4 м; 180°)

**3-6.** Період коливань точок дорівнює 0,01 с, а швидкість поширення хвилі — 340 м/с. Визначити різницю фаз між двома точками, які перебувають на одній прямій, якщо відстань між ними дорівнює 3,4 м. (360°)

**3-7.** Визначити швидкість поширення хвилі в пружному середовищі, якщо різниця фаз коливань двох точок середовища, які міс-

тяться на відстані 10 см одна від одної, дорівнює  $\pi/3$ . Частота коливань 25 Гц. (15 м/с)

**3-8.** Хвиля поширюється у пружному середовищі зі швидкістю 100 м/с. Найменша відстань між двома точками середовища, фази коливань яких протилежні, дорівнює 1 м. Визначити частоту коливань. (50 Гц)

**3-9.** На яку довжину хвилі налаштований коливальний контур радіоприймача індуктивністю 0,2 мГн, якщо максимальна сила струму в контурі дорівнює 0,1 А, а максимальна напруга на конденсаторі — 200 В? (188,5 м)

**3-10.** При швидкості зміни струму в котушці індуктивності 1 А за 0,6 с, в ній індукується ЕРС 0,2 В. Визначити довжину хвилі електромагнітних хвиль, що випромінюються цим коливальним контуром, якщо він складається з такої котушки та конденсатора ємністю 14 нФ. ( $7,5 \cdot 10^4$  м)

**3-11.** У відкритому коливальному контурі напруга на обкладках конденсатора змінюється з часом за законом  $U = 800 \cos 104\pi t$  В. Ємність конденсатора — 10 пФ. Визначити індуктивність контура та довжину хвилі, що ним випромінюється. ( $1,01 \cdot 10^5$  Гн; 6 м)

**3-12.** Передавач випромінює електромагнітну хвилю, довжина хвилі якої дорівнює 300 м. Скільки електромагнітних коливань відбувається впродовж одного періоду звукових коливань частотою 500 Гц? (2000 коливань)

**3-13.** Коливальний контур радіопередавача налаштований на частоту 6 МГц. У скільки разів треба змінити ємність конденсатора контура, щоб налаштувати його на довжину хвилі 150 м? (Збільшити в 9 разів)

**3-14.** Радіолокаторна станція випромінює 10-сантиметрові хвилі. Визначити період їхніх коливань? ( $1/3 \cdot 10^{-9}$  с)

**3-15.** Визначити електроємність конденсатора коливального контура, який містить індуктивність 25 мкГн і настроєний в резонанс на довжину хвилі 100 м? (110 пФ)

**3-16.** У коливальному контурі міститься котушка, індуктивність якої може змінюватися від 50 до 1000 мГн, та конденсатор змінної ємності від 10 до 5000 пФ. Який діапазон частоти та довжин хвиль можна приймати цим конденсатором? ( $(2,25—225) \cdot 10^{-3}$  Гц;  $(13,3—1,33) \cdot 10^3$  м)

**3-17.** Коливальний контур складається з плоского повітряного конденсатора, площа пластин якого дорівнює 200 см<sup>2</sup> кожна, і котушки індуктивністю 10 Гн. Контур резонує на довжину хвилі 40 м. Визначити відстань між пластинами конденсатора. (0,039 м)

**3-18.** Коливальний контур складається з плоского повітряного конденсатора, площа пластин якого дорівнює  $100 \text{ см}^2$ , а відстань між ними —  $3 \text{ мм}$ , і котушки індуктивністю  $\frac{1}{9} \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$ . Визначити, на яку довжину хвилі резонує контур. ( $0,34 \text{ м}$ )

### ***К-Х-3.6. Задачі для самостійного розв'язування***

**3-19.** Визначити швидкість поширення хвилі, якщо частота коливань —  $500 \text{ Гц}$ , а відстань між точками, що лежать на одній прямій,  $5 \text{ см}$ . Різниця фаз коливань між цими точками дорівнює  $\pi/6 \text{ рад}$ . ( $300 \text{ м/с}$ )

**3-20.** Визначити частоту звукових коливань у сталі, якщо відстань між найближчими точками звукової хвилі, що відрізняються за фазою на  $90^\circ$ , дорівнює  $1,54 \text{ м}$ . Швидкість поширення звукових хвиль у сталі  $5000 \text{ м/с}$ . ( $812 \text{ Гц}$ )

**3-21.** Звукові хвилі, що мають частоту  $500 \text{ Гц}$  і амплітуду  $0,25 \text{ мм}$ , поширюються в повітрі. Довжина хвилі —  $70 \text{ см}$ . Визначити швидкість поширення хвиль і максимальну швидкість коливання частинок повітря. ( $350 \text{ м/с}$ ;  $0,785 \text{ м/с}$ )

**3-22.** Хвиля поширюється від джерела коливань уздовж прямої. Зміщення точки в момент часу  $0,5T$  становить  $5 \text{ см}$ . Точка віддалена від джерела коливань на відстань  $\lambda/3$ . Визначити амплітуду коливань. ( $5,8 \text{ см}$ )

**3-23.** Спостерігач, що перебуває на відстані  $4 \cdot 10^3 \text{ м}$  від гармати, почув звук пострілу через  $12 \text{ с}$  після спалаху. Визначити швидкість поширення звуку в повітрі. ( $333 \text{ м/с}$ )

**3-24.** Спостерігач, який перебуває на відстані  $800 \text{ м}$  від джерела звуку, сприймає спочатку звуковий сигнал, що дійшов через воду, а через  $1,85 \text{ с}$  — сигнал, який дійшов через повітря. Визначити швидкість поширення звуку у воді. Швидкість поширення звуку в повітрі —  $332 \text{ м/с}$ . ( $1430 \text{ м/с}$ )

**3-25.** Визначити глибину, на якій перебуває косяк риби, якщо час між прийнятими ультразвуковим ехолотом сигналами, відбитими від косяка і дна моря, дорівнює  $2,5 \text{ с}$ , а глибина моря становить  $2 \text{ км}$ . Швидкість поширення ультразвуку у воді —  $1500 \text{ м/с}$ . ( $125 \text{ м}$ )

**3-26.** З першого корабля на другий посилають одночасно два звукові сигнали в повітрі і воді. Один сигнал було прийнято після



другого через 2 с. Визначити відстань між кораблями, якщо швидкість поширення звуку в повітрі дорівнює 341,5 м/с, а у воді — 1480 м/с. (883 м)

**3-27.** На яку довжину радіохвиль розрахований контур приймача, що складається з котушки індуктивністю  $2 \cdot 10^{-4}$  Гн і конденсатора ємністю 450 пФ? (565 м)

**3-28.** Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 100 пФ і котушки індуктивністю 100 мГн. На яку довжину хвилі настроєний контур і яка частота коливань струму в контурі? (1884 м; 159,2 кГц)

**3-29.** Ємність конденсатора в детекторному приймачі змінюється в 4 рази. Визначити діапазон довжин хвиль контуру приймача, якщо найменшій ємності конденсатора відповідає хвиля довжиною 800 м. Індуктивність контура не змінюється. (800—1600 м)

**3-30.** Контур радіоприймача настроєний на хвилю довжиною хвилі 200 м. Як потрібно змінити індуктивність котушки коливального контуру, щоб настроїти приймач на радіостанцію, що працює на частоті 600 кГц? Електроємність контура залишається сталою. (Збільшується в 6,25 раз)

**3-31.** Коливальний контур приймача настроєний на хвилю довжиною хвилі 200 м. Яка частота коливань струму в котушці та її індуктивність, якщо ємність у контурі складається з двох паралельно з'єднаних конденсаторів ємністю 200 і 50 пФ? (1,5 МГц;  $4,5 \cdot 10^{-5}$  Гн)

**3-32.** На яку довжину хвилі резонує коливальний контур, що складається з котушки індуктивністю 10 мГн і плоского конденсатора з площею обкладок  $5 \text{ см}^2$ , відокремлених парафіновим папером ( $\epsilon = 2,2$ ) завтовшки 0,1 мм? (1884 м)

**3-33.** Визначити індуктивність коливального контуру, якщо він настроєний на хвилю довжиною хвилі 1400 м. У контур увімкнено плоский конденсатор з площею пластин  $100 \text{ см}^2$ . Відстань між пластинами дорівнює 1 мм, простір між ними заповнений слюдою ( $\epsilon = 6$ ). ( $10^{-3}$  Гн)

**3-34.** Через який час повернеться до радіолокатора відбитий від об'єкта сигнал, якщо об'єкт перебуває на відстані 100 км від локатора ( $6,6 \cdot 10^{-4}$  с)

**3-35.** Радіолокатор посиляє 1000 імпульсів за секунду. Визначити дальність дії цього радіолокатора. (150 км)

**3-36.** Радіолокатор працює на частоті 1500 Гц. Визначити глибину розвідки локатора? ( $10^5$  м)

**3-37.** Сила струму в коливальному контурі змінюється з часом за законом  $I = 0,2 \cos 157 \cdot 10^5 t$  А. Визначити довжину електромагнітної хвилі, яку випромінює контур. Усі величини вимірюють в одиницях СІ. ( $1,2 \cdot 10^3$  м)

**3-38.** На якій хвилі працює радіопередавач, якщо в його антені струм змінюється з часом за законом  $I = 0,5 \cos 6,28 \cdot 10^8 t$  А? Усі величини вимірюють в одиницях СІ. (3 м)

**3-39.** Різниця фаз між двома точками хвилі, що містяться на відстані 20 см одна від одної, дорівнює  $\pi/4$ . Визначити довжину хвилі. (1,6 м)

# Розділ 5



## Оптика

- Тема О-1. Відбиття і заломлення світла  
Тема О-2. Побудова зображень в лінзі

**0-1.1. Теоретичні відомості**

**Світло** — це електромагнітні хвилі, частота яких змінюється від  $4 \cdot 10^{-14}$  до  $7,5 \cdot 10^{-14}$  Гц. Світло поширюється у вакуумі зі сталою швидкістю, яка дорівнює  $3 \cdot 10^8$  м/с. У середовищі швидкість світла менша, ніж у вакуумі. Спостереження доводять, що в однорідному ізотропному середовищі світло поширюється прямолінійно. Розглянемо, наприклад, такий дослід. Якщо предмет П освітлюється точковим джерелом  $S$ , на екрані  $E$  спостерігається різка тінь (рис. 0-1.1), форма якої подібна до форми цього предмета.

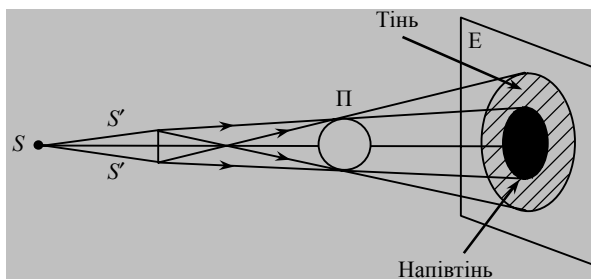


Рис. 0-1.1

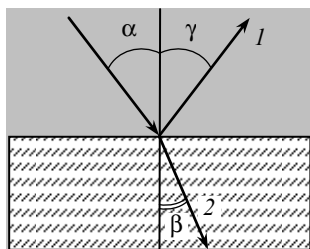


Рис. 0-1.2

Розміри цієї тіні визначаються взаємним розміщенням джерела  $S$ , предмета  $P$  та екрана  $E$  цілком відповідно до проєціювання за допомогою прямих ліній. Якщо предмет  $P$  освітлюється неточковим джерелом  $S' - S'$ , на екрані  $E$  утворюються тінь і напівтінь. **Промінь** — це лінія, яка визначає напрям поширення світлової хвилі та перенесення енергії. На межі поділу двох середовищ пучок світла завжди частково відбивається і заломлюється. Промінь  $I$ , який повертається в перше середовище, називають **відбитим** (рис. 0-1.2), а промінь  $2$ ,

який проходить у друге середовище, — *заломленим*. Розрізняють *дзеркальне* відбиття, коли паралельний пучок зберігає паралельність і після відбиття, і *дифузне*, коли внаслідок великої кількості дрібних і хаотично розміщених горбочків і западин, розміри яких більші за довжину світлової хвилі, поверхня речовини розсіює промені, які падають паралельно, більш-менш рівномірно в усіх напрямках.

**Закони дзеркального відбиття:**

- падаючий і відбитий промені разом із перпендикуляром до поверхні лежать в одній площині;

- кут падіння  $\alpha$  дорівнює куту відбиття  $\gamma$ . Якщо повернути напрямки поширення світлових променів, то відбитий промінь стане падаючим, а падаючий — відбитим. Це **закон оборотності світлових променів**.

**Закони заломлення:**

- падаючий і заломлений промені разом з перпендикуляром до поверхні лежать в одній площині;

- відношення синусів кутів падіння  $\alpha$  і заломлення  $\beta$  дорівнює відносному показнику  $n_{21}$  заломлення двох середовищ (рис. О-1.3):

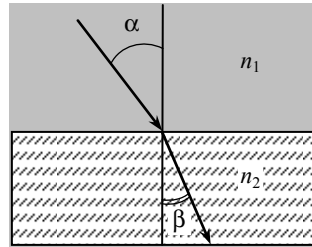


Рис. О-1.3

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

У цій формулі абсолютний показник заломлення першого середовища

$$n_1 = \frac{c}{v_1},$$

а другого —

$$n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

Тоді

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Абсолютні показники заломлення показують, у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша від швидкості світла в цьому се-

редовищі. Оскільки довжина хвилі світла в вакуумі або повітрі визначається так:

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu},$$

довжина хвилі світла тієї самої частоти в середовищі дорівнює:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n}.$$

**Частота світла залишається незмінною при переході світла з одного середовища в інше.**

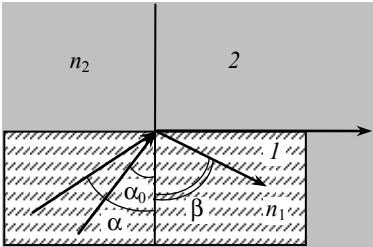


Рис. О-1.4

До речі, відчуття кольору викликає саме частота світла. Тому, наприклад, зелене світло залишається зеленим і у воді, і у склі.

**Повне внутрішнє відбиття** спостерігається при русі світла з оптично більш густого середовища 1 в менш густе 2 (рис. О-1.4). Тоді кут

$\beta = \frac{\pi}{2}$  і заломлений промінь іде

вдвож поверхні густішого середовища.

Якщо кут падіння  $\alpha$  перевищує  $\alpha_0$ , то заломлений промінь відбивається назад у густіше середовище.

**Граничний кут падіння  $\alpha_0$**  визначається за формулою:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}.$$

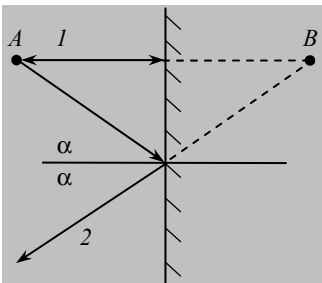


Рис. О-1.5

Зображення у **плоскому дзеркалі** будується за законами відбиття. Для побудови зображення точкового джерела світла  $A$  у плоскому дзеркалі (рис. О-1.5) зручно використати два промені: перший падає на поверхню дзеркала перпендикулярно і після відбиття повторює свій шлях у зворотному напрямі. Другий (довільний за напрямом поширення) промінь відбивається під тим самим кутом  $\alpha$ , під яким він упав на дзеркало. Зобра-

ження утворюється як точка перетину продовження променів  $I$  і  $2$ . Воно розміщене в точці  $B$  і вважається уявним, оскільки для його спостереження ми за допомогою ока зводимо промені  $I$  і  $2$ , які розходяться так, неначе вони вийшли з точки  $B$ , де й бачимо зображення. Зображення у плоскому дзеркалі завжди міститься на тій самій відстані, що й предмет, і дорівнює йому за розмірами.

### ***0-1.2. Завдання для поточного тестування***

**1.** Під час переходу світла із одного середовища в друге змінюються такі його характеристики:

1) частота; 2) швидкість; 3) довжина хвилі.

**2.** Утворення предметами тіні підтверджує таке:

1) закон заломлення світла; 2) закон прямолінійного поширення світла; 3) закон відбиття світла.

**3.** Дописати формулювання законів відбиття світла:

1) *падаючий і ..... промені разом із ..... до поверхні лежать в .....*; 2) *кут ..... дорівнює .....*

**4.** Дописати формулювання законів заломлення світла:

1) *падаючий і ..... промені разом із ..... до поверхні лежать в .....*; 2) *відношення синусів ..... кутів ..... і ..... дорівнює відносному ..... двох .....*

**5.** Закон заломлення світла записується так:

1)  $n = \frac{c}{v}$ ; 2)  $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$ ; 3)  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$ ; 4)  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$ .

**6.** Повне внутрішнє відбиття світла описується таким рівнянням:

1)  $n = \frac{c}{v}$ ; 2)  $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$ ; 3)  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$ ; 4)  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$ .

**7.** Швидкість поширення світла в першому прозорому середовищі  $2,5 \cdot 10^8$  м/с, а в другому  $-2 \cdot 10^8$  м/с. Промінь світла падає на межу поділу цих середовищ під кутом  $30^\circ$  і переходить у друге середовище. При цьому синус кута заломлення променя становить:

1) 0,2; 2) 0,4; 3) 0,6; 4) 0,8; 5) правильної відповіді тут немає.

**8.** Алмазна пластинка освітлюється фіолетовим світлом частотою  $0,75 \cdot 10^{15}$  Гц. Показник заломлення алмазу для цієї довжини хвилі 2,465, при цьому довжина хвилі фіолетового світла в алмазі становить (нм):

1) 152; 2) 162; 3) 172; 4) 182; 5) правильної відповіді тут немає.

**9.** У скипидарі куту падіння  $45^\circ$  відповідає кут заломлення  $30^\circ$ . Тоді показник заломлення скипидару становить:

1) 1,3; 2) 1,4; 3) 1,5; 4) 1,6; 5) правильної відповіді тут немає

**10.** У скипидарі куту падіння  $45^\circ$  відповідає кут заломлення  $30^\circ$ . Тоді швидкість поширення світла в скипидарі становить ( $10^6$  м/с):

1) 200; 2) 214; 3) 228; 4) 242; 5) правильної відповіді тут немає.

**11.** Вода з показником заломлення 1,3 освітлюється червоним світлом, для якого довжина хвилі в повітрі 0,7 мкм. При цьому довжина світла у воді становить, мкм:

1) 0,48; 2) 0,54; 3) 0,6; 4) 0,64; 5) правильної відповіді тут немає.

**12.** Як зміниться кут між падаючим та відбитим променями світла при зменшенні кута падіння на  $10^\circ$ ?

1) Зменшиться на  $5^\circ$ ; 2) зменшиться на  $10^\circ$ ; 3) зменшиться на  $20^\circ$ ; 4) не зміниться; 5) інша відповідь.

**13.** При переході променя світла з одного середовища в інше кут падіння дорівнює  $30^\circ$ , а кут заломлення  $60^\circ$ . Який відносний показник заломлення другого середовища відносно першого?

1) 0,5; 2)  $\frac{\sqrt{3}}{3}$ ; 3)  $\sqrt{3}$ ; 4) 2; 5) інша відповідь.

**14.** Показники заломлення відносно повітря для води, скла та алмазу відповідно дорівнюють 1,33; 1,5; 2,42. В якому з цих середовищ граничний кут повного відбиття при виході у повітря має максимальне значення?

1) У воді; 2) у склі; 3) у алмазі; 4) у всіх трьох речовинах.

**15.** Граничний кут повного відбивання для скла відносно повітря дорівнює  $\alpha_0$ . Чому дорівнює швидкість світла в склі?

1) c; 2)  $c \cdot \sin \alpha_0$ ; 3)  $\frac{c}{\sin \alpha_0}$ ; 4) інша відповідь.



**16.** Як змінюється частота світла при переході з вакууму у прозоре середовище з абсолютним показником заломлення  $n = 2$ ?

1) Збільшується у 2 рази; 2) залишається незмінною; 3) зменшується у 2 рази.

**17.** Для побудови зображення в плоскому дзеркалі треба скористатися такими променями:

- 1) промінь проходить через центр без заломлення;
- 2) промінь падає на поверхню перпендикулярно і повторює свій шлях у зворотному напрямі;
- 3) промінь спочатку рухається паралельно оптичній осі, а далі проходить через фокус;
- 4) промінь відбивається під тим самим кутом, під яким він упав;
- 5) промінь проходить через фокус і потім продовжує свій шлях паралельно головній осі.

**18.** Плоске дзеркало повертають на кут  $10^\circ$ . При цьому кут, на який відхилиться відбитий від дзеркала промінь, становить, ... $^\circ$ :

1) 5; 2) 10; 3) 15; 4) 20; 5) правильної відповіді тут немає.

**19.** Два невеликих дзеркала перебувають на однаковій відстані одне від одного та від джерела світла. Промінь світла відбивається від першого, а потім від другого дзеркала і спрямований прямо на джерело світла. Кут між дзеркалами становить, ... $^\circ$ :

1) 15; 2) 30; 3) 45; 4) 60; 5) правильної відповіді тут немає.

### ***0-1.3. Висновки з теми***

1. Світло — це електромагнітні хвилі.
2. Швидкість світла в середовищі залежить від оптичних властивостей середовища, що їх визначає показник заломлення.
3. Усі предмети, якщо на них падає світло, утворюють тінь, оскільки світло в однорідному ізотропному середовищі поширюється рівномірно і прямолінійно.
4. Під час переходу світла з одного середовища в інше змінюється швидкість поширення світла і довжина хвилі. Частота світла залишається сталою.
5. Відчуття кольору світла викликає саме частота світла.
6. Повне внутрішнє відбиття спостерігається, коли світло переходить з оптично густішого середовища в менш густе.

7. Коли показник заломлення речовини визначено відносно вакууму, то його називають абсолютним показником заломлення.

8. Коли показник заломлення однієї речовини визначено відносно другої, то його називають відносним показником заломлення.

### 0-1.4. Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** На скляну пластинку з показником заломлення 1,5 падає промінь. Кут між відбитим і заломленим променями дорівнює  $90^\circ$ . Знайдіть кут падіння променя.

*Дано:*

$$\begin{aligned} n &= 1,5; \\ \varphi &= 90^\circ; \\ \beta &= 90^\circ - \alpha \end{aligned}$$

$$\alpha = ?$$

*Розв'язання*

На рис. 1 зображено хід променів.

Сума кутів  $\gamma + \varphi + \beta = 180^\circ$ , тоді за законом заломлення світла  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ ,

$$\text{звідки } \sin \beta = \sin (90^\circ - \alpha) = \cos \alpha = \frac{\sin \alpha}{n}.$$

Поділивши ліву і праву частини рівняння на  $\cos \alpha$ , знайдемо кут  $\alpha$ :

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{n}, \text{ тоді } \alpha = \operatorname{arctg} n.$$

Виконуємо обчислення:

$$\alpha = \operatorname{arctg} 1,5 = 59^\circ.$$

**Відповідь.** Кут падіння променя дорівнює  $59^\circ$ .

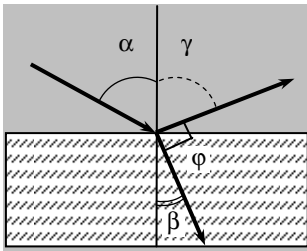


Рис. 1

**Задача 2.** Граничний кут повного внутрішнього відбиття в алмазі на межі з повітрям дорівнює  $38^\circ$ . Визначте швидкість поширення світла в алмазі.

*Дано:*

$$\alpha_0 = 38^\circ$$

$$v = ?$$

*Розв'язання*

За законом повного внутрішнього відбиття

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1},$$

де  $n_2 = 1$  — повітря;  $n_1 = \frac{c}{v}$ .

Тоді

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1} = \frac{v}{c} \text{ і } v = c \sin \alpha.$$

Обчислюємо:

$$v = 3 \cdot 10^8 \cdot \sin 38 = 1,86 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

**Відповідь.** Швидкість поширення світла в алмазі дорівнює  $1,86 \cdot 10^8$  м/с.

**Задача 3.** Визначити зміщення променя на виході з плоско-паралельної скляної пластинки завтовшки 3 см, якщо його кут падіння дорівнює  $60^\circ$ . Показник заломлення скла дорівнює 1,5.

*Дано:*

$$\alpha = 60^\circ;$$

$$d = 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$n = 1,51$$

$x$  — ?

*Розв'язання*

Зміщення променя  $x$  на виході з плоско-паралельної пластинки — це перпендикуляр, проведений з кінця заломленого променя на продовження падаючого променя (рис. 2).

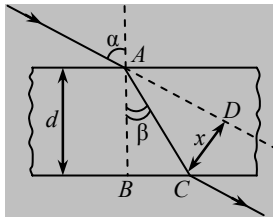


Рис. 2

Із прямокутного трикутника  $ACD$  визначимо зміщення променя так:

$$x = AC \sin(\alpha - \beta).$$

Оскільки

$$AC = \frac{AB}{\cos \beta}.$$

то

$$x = \frac{AB \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}.$$

Кут  $\beta$  визначимо за законом заломлення світла:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}.$$

Виконуємо обчислення:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n_c} = \frac{\sin 60^\circ}{1,51} = \frac{0,866}{1,51} = 0,574, \text{ а } \beta = 35^\circ.$$

$$x = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot \sin 25^\circ}{\cos 35^\circ} = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,423}{0,819} = 1,55 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

**Відповідь.** Зміщення променя на виході із плоско-паралельної пластинки дорівнює  $1,55 \cdot 10^{-2}$  м.

**Задача 4.** Водолаз занурився на дно озера на глибину 15 м. На якій відстані від нього містяться ті частини дна, які водолаз може бачити внаслідок відбиття променів світла на межі вода—повітря?

*Дано:*

$$h = 15 \text{ м};$$

$$n_1 = 1,00;$$

$$n_2 = 1,33$$

$AC$  — ?

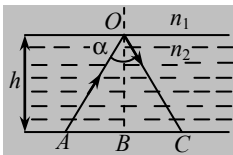


Рис. 3

рішнього відбиття:

*Розв'язання*

Нехай водолаз перебуває в точці  $A$  (рис. 3). Завдяки явищу повного внутрішнього відбиття світла водолаз бачитиме ту частину дна, яка віддалена від нього на відстань  $AC$  і більше. Оскільки  $AC = 2 \cdot AB$ , то з прямокутного трикутника  $AOB$  визначимо  $AB$  так:

$$\frac{AB}{BO} = \operatorname{tg} \alpha,$$

тоді

$$AB = BO \operatorname{tg} \alpha.$$

Кут  $\alpha$  визначимо за законом повного внут-

$$\sin \alpha = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n_2}.$$

Відомо, що

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \frac{\sqrt{n_2^2 - 1}}{n_2}.$$

Тоді

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\sqrt{n_2^2 - 1}}.$$

Остаточна формула набуває вигляду

$$AC = \frac{2h}{\sqrt{n_2^2 - 1}}.$$

Виконуємо обчислення:

$$AC = \frac{2 \cdot 15}{\sqrt{1,33^2 - 1}} = 34,1 \text{ м.}$$

**Відповідь.** Водолаз бачитиме ту частину дна, яка віддалена від нього на відстань 34,1 м і більше.

**Задача 5.** На горизонтальну поверхню речовини падає промінь світла з води під кутом  $20^\circ$  до поверхні. Заломлюючись, він поширюється під кутом  $46^\circ$  до поверхні. Визначте абсолютний показник заломлення речовини, якщо абсолютний показник заломлення води 1,33.

**Дано:**

$$\begin{aligned} \gamma &= 20^\circ; \\ \delta &= 46^\circ; \\ n_1 &= 1,33 \end{aligned}$$

$$n_2 = ?$$

**Розв'язання**

Хід променів показано на рис. 4. Кут падіння  $\alpha$  з води на поверхню речовини такий:

$$\alpha = 90^\circ - \gamma = 90^\circ - 20^\circ = 70^\circ.$$

Кут заломлення променя в речовині дорівнює

$$\beta = 90^\circ - \delta = 90^\circ - 46^\circ = 44^\circ.$$

За законом заломлення світла:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$

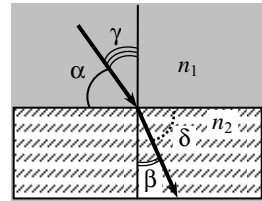


Рис. 4

тоді

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Виконуємо обчислення:

$$n_2 = \frac{1,33 \cdot \sin 70^\circ}{\sin 44^\circ} = 1,82.$$

**Відповідь.** Абсолютний показник заломлення речовини дорівнює 1,82.

**Задача 6.** Монохроматичне світло з довжиною хвилі  $4,4 \cdot 10^{-7}$  м переходить зі скла в вакуум. Визначити, на скільки збільшиться довжина хвилі, якщо абсолютний показник заломлення скла 1,5. Яка швидкість поширення світла у склі?

*Дано:*

$$\lambda_1 = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$n_1 = 1,5;$$

$$n_2 = 1$$

$$\Delta\lambda \text{ — ? } v \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Абсолютний показник заломлення речовини показує, на скільки швидкість світла в вакуумі  $c$  більша за швидкість світла в речовині  $v$ :

$$n_1 = \frac{c}{v},$$

тоді

$$v = \frac{c}{n_1}.$$

Довжини хвиль у вакуумі  $\lambda_2$  і в речовині  $\lambda_1$  такі:

$$\lambda_2 = \frac{c}{v} \text{ і } \lambda_1 = \frac{v}{v}.$$

Знаходимо  $\lambda_1$ :

$$\lambda_1 = \frac{c}{vn_1}, \text{ тоді } v = \frac{c}{\lambda_1 n_1}.$$

Довжина хвилі

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot n_1.$$

Збільшення довжини хвилі:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_1 n_1 - \lambda_1 = \lambda_1(n_1 - 1).$$

Виконуємо обчислення:

$$\Delta\lambda = 4,4 \cdot 10^{-7} (1,5 - 1) = 2,2 \cdot 10^7 \text{ м};$$

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5} = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

**Відповідь.** Довжина хвилі збільшиться на  $2,2 \cdot 10^7$  м; швидкість поширення світла у склі дорівнює  $2 \cdot 10^8$  м/с.

### ***О-1.5. Задачі для аудиторного розв'язування***

**1-1.** На плоске дзеркало падає промінь світла під кутом  $20^\circ$ . На скільки зміниться кут між падаючим і відбитим променями, якщо промінь падатиме на дзеркало під кутом  $35^\circ$ ? (Збільшиться на  $30^\circ$ )

**1-2.** За якого співвідношення між кутом падіння світла на поверхню речовини та її показником заломлення відбитий промінь буде перпендикулярним до заломленого? Яким у цьому разі буде кут падіння, якщо показник заломлення  $1,732$ ? ( $\text{tg } \alpha = n$ ;  $60^\circ$ )

**1-3.** На скляну пластинку, показник заломлення якої  $1,5$ , падає промінь світла. Визначити кут падіння променя, якщо відбитий промінь буде перпендикулярним до заломленого. ( $56,3^\circ$ )

**1-4.** За якого кута падіння світла з повітря у воду відбитий та заломлений промені взаємно перпендикулярні? Показник заломлення води дорівнює  $1,33$ . ( $53^\circ$ )

**1-5.** Промінь світла падає на плоско-паралельну скляну пластинку під кутом  $60^\circ$ . Визначити товщину пластинки  $d$ , якщо на виході з неї промінь змістився на  $20$  мм? Показник заломлення скла дорівнює  $1,5$  ( $3,9 \cdot 10^{-2}$  м)

**1-6.** Кут падіння світла на скляну плоско-паралельну пластинку  $60^\circ$ . На виході із пластинки, промінь змістився на  $15$  мм. Визначити товщину пластинки. ( $28$  мм)

**1-7.** Скляна плоско-паралельна пластинка товщиною  $4$  см має показник заломлення  $1,6$ . На її поверхню падає промінь під кутом  $55^\circ$ . Визначити зміщення променя відносно початкового напрямку при виході з пластинки в повітря. ( $9,1$  см)

**1-8.** На столі лежить аркуш паперу. Вузький пучок світла, що падає на папір під кутом  $45^\circ$ , створює на ньому світлову пляму. На

скільки зміститься ця пляма, якщо на папір покласти скляну пластинку завтовшки 5 см? (0,025 м)

**1-9.** На горизонтальному дні водоймища глибиною 1,2 м лежить плоске дзеркало. Промінь світла падає на поверхню води під кутом  $45^\circ$ . На якій відстані від місця падіння промінь знову вийде на поверхню після відбиття від дзеркала? (0,79 м)

**1-10.** Граничний кут повного відбивання для спирту дорівнює  $47^\circ$ . Визначити абсолютний показник заломлення спирту. (1,36)

**1-11.** Промінь світла виходить зі скипидару в повітря. Граничний кут повного внутрішнього відбиття для цього випадку дорівнює  $42^\circ 53'$ . Визначити швидкість світла в скипидарі. ( $1,9 \cdot 10^8$  м/с)

### *0-1.6. Задачі для самостійного розв'язування*

**1-12.** На дні посудини, заповненої до висоти 50 см водою, міститься точкове джерело світла. На поверхні води плаває круглий диск так, що його центр розташований над джерелом. За якого мінімального діаметра диска промені від джерела не виходитимуть із води? Показник заломлення води дорівнює 1,33.

$$\left( d = \frac{2h}{\sqrt{n^2 - 1}} = 1,14 \text{ м} \right)$$

**1-13.** Промінь світла, виходячи зі скляної пластинки, падає на межу поділу з повітрям під кутом, що дорівнює граничному куту внутрішнього відбиття  $47^\circ$ . Визначити швидкість світла у склі та намалювати хід променів. ( $2,19 \cdot 10^8$  м/с)

**1-14.** Визначити граничний кут повного внутрішнього відбиття на межі поділу алмазу й повітря. ( $24^\circ 20'$ )

**1-15.** Визначити граничний кут повного внутрішнього відбиття променя на межі поділу скла і води. ( $62,5^\circ$ )

**1-16.** Сонячні промені падають на поверхню води при кутовій висоті Сонця над горизонтом  $30^\circ$ . Під яким кутом ці промені поширюватимуться у воді після заломлення? ( $41^\circ$ )

**1-17.** Промінь світла переходить із води в скло з показником заломлення 1,7. Визначити кут падіння променя, якщо кут заломлення дорівнює  $28^\circ$ . ( $37^\circ$ )

**1-18.** Визначити, на який кут відхиляється промінь світла від свого початкового напрямку при переході зі скла в повітря, якщо кут падіння дорівнює  $30^\circ$ , а показник заломлення скла 1,5. (на  $19^\circ$ )

**1-19.** Промінь світла падає на межу двох середовищ під кутом  $40^\circ$ . Показник заломлення першого середовища дорівнює 1,7. Визначити показник заломлення другого середовища, коли відомо, що відбитий і заломлений промені утворюють кут  $90^\circ$ . (1,4)



**1-20.** Визначити зміщення напряму зору льотчика, якщо він бачить ціль через плоско-паралельне скло під кутом  $45^\circ$ ? Товщина скла дорівнює  $3 \cdot 10^{-2}$  м, показник заломлення — 1,75. (1,1 см)

**1-21.** Під яким кутом падатиме промінь на скло з показником заломлення 1,5, щоб заломлений промінь був перпендикулярним до відбитого? ( $56^\circ$ )

**1-22.** Промінь світла падає на поверхню води під кутом  $40^\circ$ . Під яким кутом падатиме промінь на поверхню скла з показником заломлення 1,5, щоб кут заломлення був такий самий, як і в першому випадку? ( $46^\circ$ )

**1-23.** На дні річки лежить камінець. Хлопчик хоче влучити в нього паличкою. Націлившись, він тримає паличку під кутом  $40^\circ$  до вертикалі. На якій відстані від камінця торкнеться паличка дна річки, якщо її глибина 0,5 м? (14,4 см)

**1-24.** На дно акваріуму, наповненого водою до висоти 20 см, помістили маленьку лампочку. Визначити найменший радіус непрозорої пластинки, яку потрібно покласти на воду, щоб жодний промінь не вийшов із води? (22,8 см)

### О-2.1. Теоретичні відомості

**Лінзою** називають прозоре тіло, обидві поверхні якого утворено сферами. Лінію, що проходить через центри сферичних поверхонь, називають **головною оптичною віссю**. Якщо товщина лінзи набагато менша за радіуси сферичних поверхонь, лінза називається **тонкою**. Для тонкої лінзи точку перетину сферичних поверхонь з головною оптичною віссю називають **оптичним центром тонкої лінзи**. Зображення в лінзах будуються за законами заломлення. Промені, що падають на лінзу паралельно головній оптичній осі, після заломлення збираються в точці, яку називають **головним фокусом лінзи**. Відстань від оптичного центра до головного фокуса називають **фокусною відстанню  $F$** .

Лінзи бувають опуклі (збиральні) (рис. О-2.1, а) і вгнуті (розсіювальні) (рис. О-2.1, б). Фокус збиральної лінзи називається **дійсним**, розсіювальної — **уявним**. Для побудови зображення можна використати хід будь-яких двох променів із трьох зображених: перший проходить через центр тонкої лінзи без заломлення; другий рухається паралельно головній оптичній осі і після заломлення проходить через фокус; третій проходить через фокус і після заломлення лінзою продовжує свій шлях паралельно головній осі. Зображення будь-якої точки предмета знайдемо як точку перетину двох із зазначених променів (або їхніх продовжень), що вийшли з цієї точки і пройшли через лінзу.

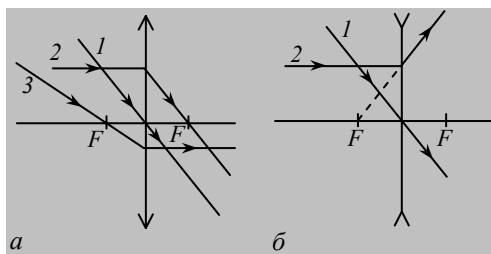


Рис. О-2.1

Домовилися предмет розміщувати завжди ліворуч від лінзи. А от зображення залежно від виду лінзи і положення предмета відносно неї може міститися як праворуч, так і ліворуч від лінзи. Якщо зображення лежить праворуч від лінзи, то воно утворюється променями, що після заломлення в лінзі сходяться. Таке зображення називають **дійсним**.

Якщо зображення лежить ліворуч від лінзи, тобто з того самого боку, що й предмет, воно утворюється продовженими променями, які після заломлення в лінзі розходяться (рис. О-2.1, б, промінь 2). Таке зображення називають **уявним**. Розсіювальна лінза утворює завжди уявне зображення.

У формулу **тонкої лінзи** входять фокусна відстань  $F$ , відстань від предмета до лінзи  $d$  і відстань від зображення предмета до лінзи  $f$ :

$$\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}.$$

Знак «мінус» показує, що фокус лінзи і зображення предмета уявні. Оптична сила лінзи визначається за формулою

$$D = \frac{1}{F} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

де  $n_1$  і  $n_2$  — показник заломлення відповідно середовища та матеріалу лінзи;  $R_1, R_2$  — радіуси сферичних поверхонь лінзи.

**Тоді збиральна лінза може стати розсіювальною, якщо її помістити в середовище з показником заломлення більшим, ніж показник заломлення матеріалу лінзи.**

**Лінійне збільшення** лінзи:

$$K = \frac{h}{H} = \frac{f}{d},$$

де  $H$  і  $h$  — висота відповідно предмета і зображення.

### **О-2.2. Завдання для поточного тестування**

1. Для побудови зображення в тонкій лінзі треба скористатися такими променями:

- 1) промінь проходить через центр без заломлення;
- 2) промінь падає на поверхню перпендикулярно і повторює свій шлях у зворотному напрямі;
- 3) промінь спочатку рухається паралельно оптичній осі і після проходить через фокус;
- 4) промінь відбивається під тим самим кутом, під яким він упав;
- 5) промінь проходить через фокус і потім продовжує свій шлях паралельно головній осі.

**2.** Збиральна лінза дає таке зображення предмета:

- 1) дійсне; 2) уявне; 3) таке, що перебуває у нескінченності.

**3.** Розсіювальна лінза дає таке зображення предмета:

- 1) дійсне; 2) уявне; 3) таке, що перебуває у нескінченності.

**4.** Формула збиральної тонкої лінзи для дійсного зображення предмета записується так:

- 1)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 2)  $-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 3)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ ; 4) немає правильної відповіді.

**5.** Формула збиральної тонкої лінзи для уявного зображення предмета записується так:

- 1)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 2)  $-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 3)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ ; 4) немає правильної відповіді.

**6.** Формула розсіювальної тонкої лінзи для уявного зображення предмета записується так:

- 1)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 2)  $-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 3)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ ; 4) немає правильної відповіді.

**7.** Формула розсіювальної тонкої лінзи для дійсного зображення предмета записується так:

- 1)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 2)  $-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ ; 3)  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ ; 4) немає правильної відповіді.

**8.** Предмет помістили на відстані  $4F$  від лінзи. У скільки разів дійсне зображення на екрані менше за самий предмет?

1) 2; 2) 2,5; 3) 3; 4) 3,5; 5) правильної відповіді тут немає.

**9.** Відстань від предмета до збиральної лінзи в 5 раз більша за фокусну відстань лінзи. У скільки разів зображення менше за предмет?

1) 2; 2) 3; 3) 4; 4) 5; 5) правильної відповіді тут немає.

**10.** На відстані 15 см від двоопуклої лінзи, оптична сила якої 10 дптр, знаходиться предмет. Відстань від лінзи до зображення предмета становить, м:

1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) правильної відповіді тут немає.

**11.** Розжарена нитка лампи та її зображення, отримане за допомогою лінзи, оптична сила якої 8 дптр, однакові за величиною. Відстань від лампи до лінзи становить, м:

1) 0,125; 2) 0,25; 3) 0,375; 4) 0,5; 5) правильної відповіді тут немає.

**12.** Збиральна лінза дає дійсне збільшене в 2 рази зображення предмета. Якщо відстань між лінзою і зображенням предмета 24 см, фокусна відстань лінзи становить, см:

1) 8; 2) 16; 3) 24; 4) 32; 5) правильної відповіді тут немає.

**13.** Зображення міліметрової поділки шкали, розташованої перед лінзою на відстані 12,5 см, має на екрані довжину 8 см. Відстань від лінзи до екрана становить, м:

1) 1; 2) 5; 3) 10; 4) 15; 5) правильної відповіді тут немає.

**14.** Розглядаючи предмет у збиральну лінзу і розташовуючи його на відстані 4 см від лінзи, отримують його уявне зображення, у 5 раз більше за предмет. Оптична сила лінзи становить, дптр:

1) 5; 2) 10; 3) 15; 4) 20; 5) правильної відповіді тут немає.

**15.** Зображення нитки лампи розжарювання на екрані, отримане за допомогою лінзи, оптична сила якої 8 дптр, у 3 рази менше за нитку. Відстань від лампи до лінзи становить, м:

1) 0,33; 2) 0,5; 3) 0,66; 4) 1; 5) правильної відповіді тут немає.

**16.** Освітлена щілина висотою 5 см проектується за допомогою збиральної лінзи з фокусною відстанню 10 см на екран, розташований на відстані 12 см від лінзи. Висота зображення щілини на екрані становить, см:

1) 1; 2) 10; 3) 20; 4) 50; 5) правильної відповіді тут немає.

17. Предмет перебуває на відстані 1,8 м від збиральної лінзи. Якщо зображення менше за предмет у 5 разів, то фокусна відстань лінзи становить, м:

1) 0,15; 2) 0,3; 3) 0,45; 4) 0,6; 5) правильної відповіді тут немає.

18. Фокусна відстань двоопуклої лінзи 0,25 м. Щоб отримати уявне зображення предмета на відстані 1 м від лінзи, потрібно помістити предмет від лінзи на відстані, м:

1) 0,05; 2) 0,1; 3) 0,15; 4) 0,2; 5) правильної відповіді тут немає.

### 0-2.3. Висновки з теми

1. Збиральна лінза може утворювати дійсне або уявне зображення.
2. Коли предмет розташовано між збиральною лінзою та її фокусом, зображення буде уявним.
3. Коли предмет розташовано у фокусі збиральної лінзи, зображення перебуватиме у нескінченності.
4. Коли предмет розташовано між фокусом і двома фокусними відстанями, збиральної лінзи зображення буде дійсним.
5. Коли предмет розташовано за двома фокусними відстанями збиральної лінзи, зображення також буде уявним.
6. Зображення предмета, утворене збиральною лінзою, може бути пряме, перевернуте, збільшене або зменшене.
7. Розсіювальна лінза утворює завжди уявне зображення незалежно від того, на якій відстані від неї перебуває предмет.
8. Збиральна лінза може стати розсіювальною, коли її помістити в середовище з показником заломлення більшим, ніж показник заломлення матеріалу лінзи.

### 0-2.4. Приклади розв'язання задач

**Задача 1.** Зі скла, що має показник заломлення 1,56, потрібно виготовити лінзу, оптична сила якої в повітрі дорівнюватиме 8 дптр. Визначити радіуси кривини поверхонь лінз, якщо вони однакові?

*Дано:*

$n_1 = 1;$   
 $n_2 = 1,56;$   
 $D = 8 \text{ дптр}$

$R = ?$

*Розв'язання*

Оптична сила лінзи визначається за формулою:

$$D = \frac{1}{F} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

У випадку, коли радіуси кривини поверхонь лінз однакові, маємо:

$$D = (n_2 - 1) \frac{2}{R}.$$

Звідси дістанемо

$$R = \frac{(n_2 - 1) \cdot 2}{D}.$$

Виконуємо обчислення:

$$R = (1,56 - 1) \cdot 2 \cdot \frac{1}{8} = \frac{0,56 \cdot 2}{8} = 0,14 \text{ м.}$$

**Відповідь.** Радіус кривини поверхонь лінзи дорівнює 0,14 м.

**Задача 2.** На якій відстані від двоопуклої лінзи потрібно розмістити предмет висотою 3 см, щоб одержати його зображення висотою 12 см? Фокусна відстань лінзи 20 см. Предмет розміщено перпендикулярно до головної осі лінзи.

*Дано:*

$$\begin{aligned} H &= 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ h &= 12 \text{ см} = 12 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ F &= 20 \text{ см} = 20 \cdot 10^{-2} \text{ м} \end{aligned}$$

$d$  — ?

*Розв'язання*

Оскільки в умові задачі не задано дійсне зображення чи уявне, розглянемо два випадки.

### 1. Зображення дійсне.

Лінійне збільшення дорівнює:

$$K = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}.$$

Звідки визначимо відстань зображення до лінзи:

$$f = 4d.$$

Підставивши  $f$  у формулу тонкої лінзи

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

дістанемо

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{4d} = \frac{5}{4d}.$$

Звідси відстань від предмета до лінзи визначатиметься так:

$$d = \frac{5F}{4}.$$

Виконуємо обчислення:

$$d = \frac{5 \cdot 20 \cdot 10^{-2}}{4} = 25 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

**Відповідь.** Предмет потрібно розмістити на відстані 25 см від лінзи.

## 2. Зображення уявне.

Формула тонкої лінзи в цьому разі має вигляд

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}.$$

Підставивши  $f = 4d$ ,  
дістанемо

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{4d} = \frac{3}{4d},$$

звідки відстань від предмета до лінзи визначатиметься так:

$$d = \frac{3F}{4}.$$

Виконуємо обчислення:

$$d = \frac{3 \cdot 20 \cdot 10^{-2}}{4} = 15 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

**Відповідь.** Предмет потрібно розмістити на відстані 15 см від лінзи.



**Задача 3.** За допомогою тонкої збиральної лінзи отримують збільшене в 4 рази дійсне зображення предмета. Потім лінзу переміщують у бік предмета на 15 см і дістають уявне зображення такого самого розміру. Визначити фокусну відстань і оптичну силу лінзи.

*Дано:*

$$K = 4;$$

$$l = 15 \text{ см} = 15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$


---


$$F = ? \quad D = ?$$

*Розв'язання*

У першому випадку (рис. 1), коли предмет перебуває на відстані  $d_1$  від лінзи, а зображення — на відстані  $f_1$  від неї, збільшення лінзи дорівнюватиме:

$$K = \frac{f_1}{d_1}.$$

Звідси

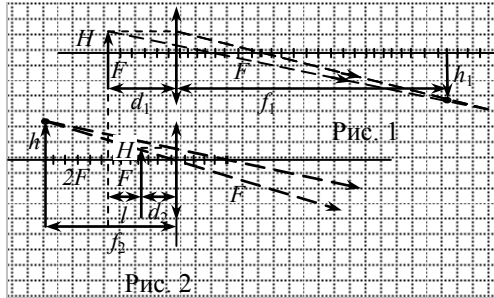
$$f_1 = K \cdot d_1.$$

У другому випадку (рис. 2)

$$d_2 = d_1 - l.$$

Тоді

$$f_2 = K \cdot (d_1 - l).$$



Запишемо формулу тонкої лінзи для першого і другого випадків:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d_1 - l} - \frac{1}{f_2}.$$

Підставивши значення  $f_1$  і  $f_2$  у формули лінзи, дістанемо систему двох рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{Kd_1}; \\ \frac{1}{F} = \frac{1}{d_1 - l} - \frac{1}{K(d_1 - l)}. \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{F} = \frac{1}{d_1 - l} - \frac{1}{K(d_1 - l)}. \end{array} \right. \quad (2)$$

З рівняння (1) знаходимо

$$d_1 = F \left( 1 + \frac{1}{K} \right).$$

Підставивши  $d_1$  в рівняння (2), дістанемо

$$\frac{1}{F} = \frac{1 - \frac{1}{K}}{F \left( 1 + \frac{1}{K} \right) - l}$$

або

$$\frac{2F}{K} = l,$$

звідки дістанемо формулу для визначення фокусної відстані лінзи:

$$F = \frac{l \cdot K}{2}.$$

Оптична сила лінзи визначатиметься так:

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{3 \cdot 10^{-1}} = 3,3 \text{ дптр.}$$

Виконуємо обчислення:

$$F = \frac{15 \cdot 10^{-2} \cdot 4}{2} = 3 \cdot 10^{-1} \text{ м.}$$

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{3 \cdot 10^{-1}} = 3,3 \text{ дптр.}$$

**Відповідь.** Фокусна відстань дорівнює 0,3 м, оптична сила лінзи — 3,3 дптр.

**Задача 4.** На відстані 25 см від збиральної лінзи з фокусною відстанню 20 см розташовано предмет висотою 2 см. Друга збиральна лінза з фокусною відстанню 40 см перебуває на відстані 1,5 м від першої. Їхні головні оптичні осі збігаються. На якій відстані від другої лінзи міститься зображення предмета після проходження променів через обидві лінзи? Визначити висоту отриманого зображення?

**Дано:**

$$\begin{aligned}d_1 &= 25 \text{ см}; = 25 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\F_1 &= 20 \text{ см}; = 20 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\H = h &= 2 \text{ см}; = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\F_2 &= 40 \text{ см}; = 40 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\l &= 1,5 \text{ м}\end{aligned}$$

---


$$f_2 \text{ — ? } h_2 \text{ — ?}$$

**Розв'язання**

Зображення предмета, яке дає перша лінза, міститься від неї на відстані  $f_1$  і має таку висоту:

$$h_1 = K_1 H = \frac{f_1}{d_1} H.$$

Від другої лінзи воно перебуває на відстані  $d_2 = l - f_1$  і є для неї предметом.

Зображення предмета, яке дає друга лінза, міститься від неї на відстані  $f_2$  і має таку висоту:

$$h_2 = K_2 h_1 = \frac{f_2}{d_2} h_1,$$

де  $K_2$  — збільшення другої лінзи.

Скориставшись формулою тонкої лінзи, запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} \\ \frac{1}{F_2} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}. \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему, дістанемо такі формули:

$$f_2 = \frac{F_2(l(d_1 - F_1) - d_1 F_1)}{(l - F_2)(d_1 - F_1) - d_1 F_1};$$

$$h_2 = H_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot h = \frac{F_1 \cdot F_2 \cdot h}{(l - F_2)(d_1 - F_1) - d_1 F_1}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[f_2] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{м}} \right] = [\text{м}], \quad [H_2] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{м}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$f_2 = \frac{40 \cdot 10^{-2} [1,5 \cdot (25 \cdot 10^{-2} - 20 \cdot 10^{-2}) - 25 \cdot 10^{-2} \cdot 20 \cdot 10^{-2}]}{(1,5 - 40 \cdot 10^{-2}) (25 \cdot 10^{-2} - 20 \cdot 10^{-2}) - 25 \cdot 10^{-2} \cdot 20 \cdot 10^{-2}} = 2 \text{ м},$$

$$H_2 = \frac{20 \cdot 10^{-2} \cdot 40 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{(1,5 - 40 \cdot 10^{-2}) (25 \cdot 10^{-2} - 20 \cdot 10^{-2}) - 25 \cdot 10^{-2} \cdot 20 \cdot 10^{-2}} = 0,32 \text{ м}.$$

**Відповідь.** Зображення міститься на відстані 2 м від другої лінзи, висота зображення становить 0,32 м.

### 0-2.5. Задачі для аудиторного розв'язування

**2-1.** Радіуси кривини поверхонь лінзи однакові, показник заломлення скла дорівнює 1,52. Визначити радіус кривини кожної поверхні, якщо оптична сила лінзи дорівнює 10 дптр? ( $10,4 \cdot 10^{-2}$  м)

**2-2.** Оптична сила лінзи дорівнює 10 дптр. Радіуси кривини її поверхонь 12 та 18 см. Визначити показник заломлення матеріалу лінзи. (1,72)

**2-3.** Відстань від предмета до екрана 90 см. Де потрібно розмістити між ними лінзу з фокусною відстанню 20 см, щоб одержати на екрані чітке зображення предмета? (30 см; 60 см)

**2-4.** Збиральна лінза дає на екрані зображення збільшене вдвічі. Відстань від предмета до лінзи перевищує її фокусну відстань на 6 см. Визначити відстань від лінзи до екрана. (36 см)

**2-5.** На відстані 15 см від двоопуклої лінзи, оптична сила якої дорівнює 10 дптр, розташовано предмет висотою 2 м перпендикулярно до оптичної осі. Визначити положення та висоту зображення. Побудувати зображення. (0,29 м;  $3,86 \cdot 10^{-2}$  м)

**2-6.** За допомогою збиральної лінзи, оптична сила якої дорівнює 4 дптр, необхідно дістати зображення предмета, збільшене в 5 раз. На якій відстані перед лінзою треба розташувати цей предмет? Побудувати зображення. (0,3 м)

**2-7.** Предмет міститься на відстані 8 см від переднього фокуса лінзи, а його зображення — на відстані 18 см від заднього фокуса лінзи. Визначити фокусну відстань лінзи. (0,12 м)

**2-8.** Предмет розташовано на відстані 50 см від лінзи. Радіуси кривини поверхонь лінзи дорівнюють відповідно 12,5 і 20 см, а показник заломлення лінзи — 1,52. Де міститься зображення предмета? (21 см)

**2-9.** Предмет висотою 0,03 м розташовано на відстані 0,15 м від розсіювальної лінзи з фокусною відстанню 0,3 м. На якій відстані від лінзи міститься зображення та яка його висота? Побудувати зображення предмета. (–0,1 м; 0,02 м)

**2-10.** Розсіювальна лінза з фокусною відстанню 10 см дає уявне зображення предмета, зменшене вдвічі. На якій відстані від лінзи знаходиться предмет? Побудувати зображення предмета. (10 см)

**2-11.** Розсіювальна лінза має фокусну відстань 15 см. На якій відстані міститься зображення, якщо предмет розташовано на відстані 25 см від лінзи? Побудувати зображення предмета. (37,5 см)

**2-12.** Визначити оптичну силу розсіювальної лінзи, яка утворює зображення предмета на відстані 6 см від самого предмета. Висота предмета — 8 см, висота зображення — 4 см.  $\left( D = \frac{(h-H)^2}{Hhl} = -8,3 \text{ дптр} \right)$

### ***О-2.6. Задачі для самостійного розв'язування***

**2-13.** З якої відстані сфотографовано будинок висотою 6 м, якщо на знімку він має висоту 12 мм. Головна фокусна відстань об'єктива 20 см? (100 м)

**2-14.** Предмет розглядають через лупу, причому зображення найбільш чітке, коли предмет лежить на відстані 12,5 см від неї. Визначити оптичну силу лупи і збільшення предмета. (4 дптр; 2)

**2-15.** На якій відстані від лінзи з фокусною відстанню 40 см треба розмістити предмет, щоб дістати дійсне зображення на відстані 2 м від лінзи? Визначити збільшення і побудувати зображення предмета. (0,5 м; 4)

**2-16.** Відстань між свічкою і стіною дорівнює 2 м. Коли між ними розмістили збиральну лінзу на відстані 40 см від свічки, то на стіні утворилося чітке її зображення. Визначити фокусну відстань лінзи. (32 см)

**2-17.** Відстань від предмета висотою 20 см до розсіювальної лінзи дорівнює 15 см. Фокусна відстань лінзи 10 см. Визначити відстань від лінзи до зображення та висоту зображення (6 см; 8 см)

**2-18.** На якій відстані від лінзи з оптичною силою – 4,5 дптр потрібно розмістити предмет, щоб його зображення було зменшеним у 6 разів? (1,1 м)

**2-19.** Відстань між екраном і предметом дорівнює 1,2 м. Якою має бути оптична сила лінзи, щоб на екрані утворилося зображення предмета, збільшене в 5 разів? (6 дптр)

**2-20.** Лінза утворює дійсне зображення предмета, збільшене в 4 рази. Коли лінзу відсунули на 50 см, дійсне зображення предмета зменшилося в 4 рази. Визначити оптичну силу лінзи. (7,5 дптр)

**2-21.** Дві лінзи з оптичною силою 4 і 5 дптр містяться на відстані 0,9 м одна від одної. Перед першою лінзою на відстані 0,5 м стоїть предмет. Головні оптичні осі обох лінз збігаються. Де утвориться зображення предмета? Накреслити хід променів. (На відстані 0,4 м від другої лінзи.)

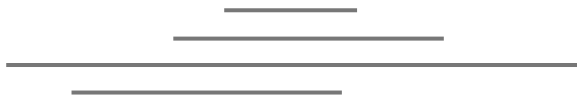
**2-22.** Предмет розмістили на відстані 0,1 м від переднього фокуса збиральної лінзи, а екран, на якому утворено чітке зображення предмета, — на відстані 40 см від заднього фокуса. Визначити фокусну відстань лінзи та лінійне збільшення лінзи? (0,2 м; 2)



## Розділ 6



# Елементи теорії відносності. Квантова, атомна, ядерна фізика



Тема Я-1. Елементи теорії відносності

Тема Я-2. Квантова фізика

Тема Я-3. Елементи атомної і ядерної фізики



### ***Я-1.1. Теоретичні відомості***

В основі спеціальної теорії відносності Ейнштейна покладено **два постулати**:

1. Перебіг фізичних явищ однаковий за одних і тих самих умов в усіх інерціальних системах відліку (принцип відносності).

2. Швидкість світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних системах відліку. Це дослідний факт. Швидкість світла найбільша з-поміж усіх можливих швидкостей передавання будь-яких сигналів у природі.

**Маса** тіла, що рухається зі швидкістю, близькою до швидкості світла  $c$ , залежить від швидкості  $v$ :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}},$$

де  $m_0$  — маса спокою цього тіла.

Теорія відносності доводить, що довжини **відрізків** і **інтервали часу** різні в різних системах відліку:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{і} \quad \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

де  $l_0$  і  $\tau_0$  — довжина відрізка та інтервал часу в нерухомій системі;  $l$  і  $\tau$  — довжина відрізка та інтервал часу в системі, яка рухається зі швидкістю  $v$ , близькою до  $c$ , відносно нерухомої системи.

Маса тіла є не тільки мірою його інертності та гравітаційної взаємодії, а й мірою енергії.

**Повна** енергія тіла

$$E = mc^2.$$



Енергія *спокою*

$$E_0 = m_0 c^2.$$

Будь-якій *зміні енергії* відповідає *зміна маси*:

$$\Delta E = \Delta m c^2,$$

де  $\Delta m$  — дефект маси.

За цією формулою визначається енергія, що виділяється під час ядерних реакцій.

### **Я-1.2. Завдання для поточного тестування**

1. Дописати постулати Ейнштейна:

1) *перебіг фізичних явищ* ..... за одних і тих самих умов у ..... системах .....

2) *швидкість* ..... *однакова в усіх* ..... системах .....

2. Підставити в рівняння  $m = \frac{?}{\sqrt{1 - \frac{?}{?}}}$  необхідні величини:

1)  $\tau_0$ ; 2)  $c^2$ ; 3)  $v$ ; 4)  $v^2$ ; 5)  $m_0$ ; 6)  $l_0$ .

3. Підставити в рівняння  $\tau = \frac{?}{\sqrt{1 - \frac{?}{?}}}$  необхідні величини:

1)  $\tau_0$ ; 2)  $c^2$ ; 3)  $v$ ; 4)  $v^2$ ; 5)  $m_0$ ; 6)  $l_0$ .

4. Підставити в рівняння  $l = ? \sqrt{1 - \frac{?}{?}}$  необхідні величини:

1)  $\tau_0$ ; 2)  $c^2$ ; 3)  $v$ ; 4)  $v^2$ ; 5)  $m_0$ ; 6)  $l_0$ .

5. Повна енергія тіла визначається так:

1)  $m_0 c^2$ ; 2)  $m c^2$ ; 3)  $\Delta m c^2$ ; 4)  $h\nu$ .

6. Енергія спокою тіла визначається так:

1)  $m_0 c^2$ ; 2)  $m c^2$ ; 3)  $\Delta m c^2$ ; 4)  $h\nu$ .

7. Кінетична енергія тіла визначається так:

1)  $m_0c^2$ ; 2)  $mc^2$ ; 3)  $\Delta mc^2$ ; 4)  $h\nu$ .

8. Маса електрона збільшилася вдвічі. Швидкість електрона така (як частка від швидкості світла у вакуумі  $c$ , м/с):

1)  $c$ ; 2)  $0,6c$ ; 3)  $0,87c$ ; 4)  $0,866c$ .

9. Протон рухається зі швидкістю  $0,8c$  (м/с). Маса протона змінилася (раз):

1)  $0,5$ ; 2)  $1,5$ ; 3)  $1,67$ ; 4)  $1$ .

10. Речовина масою  $1$  г повністю перетворюється в матерію у вигляді поля. При цьому виділяється така кількість енергії, Дж:

1)  $1,6 \cdot 10^{-19}$ ; 2)  $3,6 \cdot 10^{-19}$ ; 3)  $9,0 \cdot 10^{-13}$ ; 4)  $2,6 \cdot 10^{-13}$ .

11. Кінетична енергія частинки дорівнює її енергії спокою. Швидкість руху частинки така, м/с:

1)  $c$ ; 2)  $0,6c$ ; 3)  $0,87c$ ; 4)  $0,866c$ .

### **Я-1.3. Висновки з теми**

1. Граничною швидкістю руху матеріальних частинок є швидкість світла у вакуумі.

2. Релятивістська маса залежить від швидкості руху і вже не пропорційна до кількості речовини.

3. Згідно зі спеціальною теорією відносності поняття «простір» і «час» відносні, а розміри просторово-часових відрізків залежать від швидкості руху системи відліку.

4. Граничною швидкістю поширення взаємодії є швидкість світла у вакуумі.

5. Маса — це міра енергії тіла. Під час руху тіла зміна його маси характеризує його кінетичну енергію.

6. Різниця між масою системи і сумою мас усіх тіл, які утворюють систему, характеризує енергію взаємодії частин системи. Вона називається дефектом маси.

7. Маса спокою характеризує внутрішню енергію системи.

8. Співвідношення  $E = mc^2$  — це фундаментальне підтвердження такого положення: немає матерії без руху і немає руху без матерії.

### Я-1.4. Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Космічний корабель рухається зі швидкістю  $0,9 c$  у напрямі до центра Землі. Яку відстань пройде корабель у системі відліку, яка зв'язана з Землею ( $K$ -система), за  $1 c$  за годинником, який міститься в космічному кораблі ( $K'$ -система)? Обертальним рухом Землі навколо Сонця знехтувати.

*Дано:*

$$v = 0,9 c;$$

$$\Delta t_0 = 1 c$$

$$l = ?$$

*Розв'язання*

Відстань  $l$ , яку пройде космічний корабель у системі відліку, що зв'язана з Землею ( $K$ -система), визначається за формулою

$$l = v \Delta t,$$

де  $\Delta t$  — інтервал часу за годинником у  $K$ -системі відліку. Цей інтервал часу визначається через час за годинником, який міститься в космічному кораблі у  $K'$ -системі, так:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Підставивши значення  $\Delta t$ , дістанемо:

$$l = \frac{\Delta t_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Виконуємо обчислення:

$$l = \frac{0,9 c \cdot 1}{\sqrt{1 - 0,81}} = 619 \cdot 10^6 \text{ м.}$$

**Відповідь.** Корабель пройде відстань у системі відліку, яка зв'язана з Землею,  $619 \cdot 10^6$  м.

**Задача 2.** З якою швидкістю має рухатись електрон, щоб його маса змінилася вдвічі?

*Дано:*

$$m = 2m_0$$

$v$  — ?

*Розв'язання*

Маса електрона збільшиться, якщо він рухатиметься зі швидкістю, яка наближається до швидкості світла. Тоді маса визначається за формулою

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

За умовою задачі  $m = 2m_0$ , тоді

$$2m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Звідси швидкість руху електрона:

$$v = c\sqrt{0,75}.$$

Виконуємо обчислення:

$$v = c \cdot \sqrt{0,75} = 0,87c.$$

**Відповідь.** Швидкість руху електрона дорівнює  $0,87c$ .

**Задача 3.** На скільки відсотків зміниться маса протона після проходження ним в однорідному полі з напруженістю  $10^5$  В/м відстані 10 см вздовж силових ліній?

*Дано:*

$$E = 10^5 \text{ В/м};$$

$$l = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м};$$

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\frac{\Delta m}{m_p} \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

За рахунок роботи сил поля кінетична енергія протона збільшиться:

$$\Delta E_k = A = F \cdot l = e \cdot E \cdot l.$$

За формулою Ейнштейна визначимо зміну маси протона так:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_k}{c^2},$$

або

$$\frac{\Delta m}{m_p} = \frac{\Delta E_k}{m_p \cdot c^2}.$$

Підставивши значення  $\Delta E_k$ , дістанемо таку формулу:

$$\frac{\Delta m}{m_p} = \frac{e \cdot E \cdot l}{m_p \cdot c^2} \cdot 100 \%.$$

Виконуємо обчислення:

$$\frac{\Delta m}{m_p} = \frac{1,6 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2} \cdot 100 \% = 1,1 \cdot 10^{-3} \%.$$

**Відповідь.** Маса протона зміниться на  $\frac{\Delta m}{m_p} = 1,1 \cdot 10^{-3} \%$ .

**Задача 4.** З якою швидкістю має рухатися протон, щоб його кінетична енергія була вдвічі більше енергії спокою?

*Дано:*

$$E_k = 2E_0$$

$v - ?$

*Розв'язання*

Кінетична енергія релятивістської частинки визначається за формулою:

$$E_k = E - E_0,$$

або

$$E_k = mc^2 - m_0c^2.$$

За умовою задачі  $E_k = 2E_0$ , тоді

$$2m_0c^2 = mc^2 - m_0c^2.$$

Тоді

$$3m_0c^2 = mc^2.$$

Маса релятивістської частинки визначається так:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Після підставлень і перетворень формула для визначення швидкості протона набуває вигляду:

$$v = 0,94 c.$$

**Відповідь.** Швидкість протона дорівнює  $0,94 c$  м/с.

### **Я-1.5. Задачі для аудиторного розв'язування**

**1-1.** Яку швидкість матиме стрижень, щоб його поздовжні розміри зменшилися для спостерігача втричі? ( $2,8 \cdot 10^8$  м/с)

**1-2.** У рухомій системі відліку  $K'$  перебуває стрижень у стані спокою, власна довжина якого дорівнює  $l_0 = 1$  м. Положення стрижня збігається з віссю  $x$ . Визначити довжину  $l$  стрижня відносно нерухомої системи  $K$ , якщо швидкість  $v_0$  системи відліку  $K'$  відносно  $K$  дорівнює  $0,8 c$ . ( $0,8$  м)

**1-3.** Власний час життя нестабільної елементарної частинки  $\mu$ -мезона дорівнює  $2$  мкс. Від точки його народження до точки розпаду в лабораторній системі відліку  $\mu$ -мезон пролетів відстань  $6$  км.

З якою швидкістю рухався  $\mu$ -мезон?  $\left( v = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{\tau_0 c^2}{l^2}}} = 0,995 c \right)$

**1-4.** Який інтервал часу пройде на космічному кораблі, що рухається відносно Землі зі швидкістю  $0,4 c$ , якщо на Землі минає  $10$  років? ( $9,16$  років)

**1-5.** З якою швидкістю має рухатись електрон, щоб його маса збільшилася в  $4$  рази? ( $2,9 \cdot 10^8$  м/с)

**1-6.** На скільки зміниться маса  $\alpha$ -частинки, якщо її швидкість збільшилася від початкової, яка дорівнює нулю, до швидкості  $0,9 c$ ? ( $8,644 \cdot 10^{-27}$  кг)

**1-7.** З якою швидкістю рухається частинка, якщо її релятивістська маса втричі більша за масу спокою? ( $0,943 c$ )

**1-8.** Протон рухається зі швидкістю  $0,7 c$ . Визначити імпульс і кінетичну енергію протона.  $\left( 4,91 \cdot 10^{-19} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}; 0,6 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \right)$

**1-9.** Електрон рухається зі швидкістю  $0,8 c$ . Визначити кінетичну енергію електрона (в електрон-вольтах). ( $0,341$  еВ)

**1-10.** Визначити швидкість електрона, якщо його кінетична енергія дорівнює  $4$  МеВ.  $\left( 13,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$

### **Я-1.6. Задачі для самостійного розв'язування**

**1-11.** Космічна ракета віддаляється від нерухомого спостерігача зі швидкістю  $v = 0,6 c$ . Який час мине за годинником нерухомого спостерігача, якщо за годинником, який рухається разом з ракетою, минуло 6 років? (7,5 року)

**1-12.** З якою швидкістю має рухатися тіло відносно спостерігача, щоб його довжина зменшилася на 50 %? ( $2,6 \cdot 10^8$  м/с)

**1-13.** Визначити кінетичну енергію електрона, який рухається зі швидкістю  $0,75 c$ . Маса спокою електрона дорівнює  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. ( $3,5 \cdot 10^{-14}$  Дж)

**1-14.** З якою швидкістю рухається електрон, якщо його маса втричі більша від маси спокою? ( $2,83 \cdot 10^8 \frac{m}{c}$ )

**1-15.** Протон пройшов через прискорювач елементарних частинок і набув кінетичної енергії  $10^{-19}$  Дж. У скільки разів збільшилася маса протона? (7,7 рази)

**1-16.** Визначити, у скільки разів маса електрона, що має кінетичну енергію 1,02 МеВ, більша від маси спокою електрона? (у 4 рази)

**1-17.** За якої швидкості кінетична енергія частинки дорівнює енергії спокою? ( $2,6 \cdot 10^8 \frac{m}{c}$ )

**1-18.** Маса рухомого електрона в 11 разів більша від його маси спокою. Визначити кінетичну енергію електрона та його імпульс. ( $8,3 \cdot 10^{-13}$  Дж;  $8,65 \cdot 10^{-22} \frac{kg \cdot m}{c}$ )

**1-19.** Яку різницю потенціалів має пройти протон, який перебував у стані спокою, щоб його енергія стала в 11 разів більша за енергію спокою? У скільки разів збільшиться його маса? ( $9,38 \cdot 10^9$  В; в 11 разів)

**1-20.** Яку різницю потенціалів має пройти електрон, щоб його швидкість становила 95 % швидкості світла? ( $1,1 \cdot 10^6$  В)

**1-21.** Електрон рухається зі швидкістю  $0,6 c$ . Визначити релятивістський імпульс електрона. ( $2,05 \cdot 10^{-22} \frac{kg \cdot m}{c}$ )

**1-22.** Визначити імпульс, повну й кінетичну енергію електрона, який рухається зі швидкістю  $0,7 c$ .  $\left( 2,68 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}; 11,47 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}; 3,28 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \right)$

**1-23.** Визначити релятивістський імпульс і кінетичну енергію електрона, який рухається зі швидкістю  $0,9 c$ .  $\left( 5,6 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}; 106 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} \right)$





### Я-2.1. Теоретичні відомості

Джерела випромінюють світло малими порціями — **квантами**. **Енергія кванта** світла (фотона) пропорційна до його частоти:

$$E = h\nu.$$

**Фотон** — це частинка, що рухається завжди зі швидкістю світла. Її маса спокою дорівнює нулю, маса фотона, що рухається, дорівнює

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

**Фотоефект** — явище вибивання електронів із поверхні металу під дією світла. На основі досліджень було сформульовано **закони фотоефекту**:

— кількість електронів, вибитих світлом із поверхні металу, прямо пропорційна до інтенсивності світла;

— максимальна кінетична енергія фотоелектронів прямо пропорційна до частоти світла;

— для кожної речовини існують порогові значення частоти і довжини хвилі, які відповідають межі існування фотоефекту; світло з меншою частотою або більшою довжиною хвилі не викликає фотоефекту.

Закон збереження енергії при фотоефекті — це **рівняння Ейнштейна** для фотоефекту:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

тобто енергія фотона  $h\nu$  витрачається на виконання роботи виходу електрона  $A_{\text{вих}}$  і надання йому кінетичної енергії.

Фотоефект відбувається, якщо енергія фотона більша або дорівнює роботі виходу:  $h\nu_0 = A_{\text{вих}}$ . Тоді гранична частота фотоефекту

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$$

або червона межа  $\lambda_{\text{чер}} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}$ .

**Червоною межею** фотоелектру називають найменшу частоту або найбільшу довжину хвилі, що викликає фотоелектр.

### Я-2.2. Завдання для поточного тестування

1. Енергія кванта визначається так:

1)  $m_0c^2$ ; 2)  $mc^2$ ; 3)  $\Delta mc^2$ ; 4)  $h\nu$ .

2. Маса фотона визначається так:

1)  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ; 2)  $m = \frac{h\nu}{c^2}$ ; 3)  $m = \frac{h}{c\lambda}$ .

3. Підставити в рівняння Ейнштейна  $h\nu = A_{\text{вих}} + E_{\text{к}}$  необхідні величини:

1)  $\lambda$ ; 2)  $\frac{c}{\lambda}$ ; 3)  $A_{\text{вих}}$ ; 4)  $\frac{mv^2}{2}$ ; 5)  $E_{\text{к}}$ .

4. У формулу  $\nu_0 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$  для визначення граничної частоти фотоелектру підставити необхідні величини:

1)  $A_{\text{вих}}$ ; 2)  $h$ ; 3)  $hc$ .

5. У формулу  $\lambda_{\text{чер}} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}$  для визначення червоної межі фотоелектру підставити необхідні величини:

1)  $A_{\text{вих}}$ ; 2)  $h$ ; 3)  $hc$ .

6. Випромінювання складається з фотонів енергією  $6,62 \cdot 10^{-19}$  Дж. Довжина хвилі в вакуумі для цього випромінювання, нм, така:

1) 100; 2) 200; 3) 300; 4) 400; 5) правильної відповіді тут немає.

7. Червона межа фотоелектру для натрію дорівнює 500 нм, робота виходу електронів, еВ, така:

1) 2; 2) 2,5; 3) 3; 4) 3,5; 5) правильної відповіді тут немає.

8. Робота виходу електрона з платинового катода дорівнює 6,3 еВ. Найбільша довжина хвилі, при якій починається фотоефект, така (мкм):

1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) правильної відповіді тут немає.

9. Робота виходу електронів поверхні калію дорівнює 2,26 еВ. Максимальна кінетична енергія електронів, що вилітають з калію під дією променів довжиною хвилі 345 нм, ( $\cdot 10^{-18}$  Дж), така:

1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) правильної відповіді тут немає.

10. Кінетична енергія фотоелектронів дорівнює  $4,5 \cdot 10^{-20}$  Дж, робота виходу електрона з металу –  $7,5 \cdot 10^{-19}$  Дж. Довжина хвилі світла, яке падає на поверхню металу, нм, така:

1) 200; 2) 250; 3) 300; 4) 350; 5) правильної відповіді тут немає.

11. Червона межа фотоефекту для деякого металу дорівнює 275 нм. Максимальна енергія фотона, що викликає фотоефект, така ( $\cdot 10^{-19}$  Дж):

1) 6,8; 2) 7,2; 3) 7,6; 4) 8; 5) правильної відповіді тут немає.

12. Імпульс фотона частотою  $5 \cdot 10^{14}$  Гц дорівнює ( $\cdot 10^{-27}$  кгс. м/с):

1) 0,9; 2) 1,1; 3) 1,3; 4) 1,5; 5) правильної відповіді тут немає.

13. Маса фотона частотою  $5 \cdot 10^{14}$  Гц дорівнює ( $\cdot 10^{-36}$  кг):

1) 2,9; 2) 3,3; 3) 3,7; 4) 4,1; 5) правильної відповіді тут немає.

14. Імпульс фотона довжиною хвилі 600 нм дорівнює ( $\cdot 10^{-27}$  кгс. м/с):

1) 0,8; 2) 1,1; 3) 1,4; 4) 1,7; 5) правильної відповіді тут немає.

15. Маса фотона довжиною хвилі 600 нм дорівнює ( $\cdot 10^{-36}$  кг):

1) 2,7; 2) 3,2; 3) 3,7; 4) 4,2; 5) правильної відповіді тут немає.

16. Пучок зеленого світла довжиною хвилі 520 нм у вакуумі несе енергію  $10^{-3}$  Дж. Кількість фотонів у цьому пучку така ( $\cdot 10^{15}$ ):

1) 2; 2) 2,6; 3) 3,2; 4) 3,8; 5) правильної відповіді тут немає.

17. Імпульс фотона частотою  $\nu$  дорівнює:

1)  $m_0 c^2$ ; 2)  $mc^2$ ; 3)  $h\nu$ ; 4)  $\frac{h\nu}{c}$ ; 5) інша відповідь.

18. Енергія фотона, якому в середовищі з показником заломлення  $n$  відповідає довжина хвилі  $\lambda$ , дорівнює:

- 1)  $\frac{hc}{\lambda n}$ ; 2)  $\frac{hc}{\lambda}$ ; 3)  $\frac{hcn}{\lambda}$ ; 4)  $\frac{hn}{\lambda}$ ; 5) інша відповідь.

**19.** Імпульс фотона, якому в середовищі з показником заломлення  $n$  відповідає довжина хвилі  $\lambda$ , дорівнює:

- 1)  $\frac{hc}{\lambda n}$ ; 2)  $\frac{hc}{\lambda}$ ; 3)  $\frac{hcn}{\lambda}$ ; 4)  $\frac{hn}{\lambda}$ ; 5) інша відповідь.

**20.** Як зміниться гранична частота фотоелекту, якщо кулі радіуса  $R$  надати позитивний заряд  $q$ ?

- 1) Не зміниться; 2) збільшиться на  $\frac{eq}{4\pi\epsilon_0 Rh}$ ; 3) зменшиться на  $\frac{eq}{4\pi\epsilon_0 Rh}$ ; 4) збільшиться на  $\frac{eq}{4\pi\epsilon_0 R^2 h}$ ; 5) зменшиться на  $\frac{eq}{4\pi\epsilon_0 R^2 h}$ ;  
5) інша відповідь.

**21.** При освітленні катода вакуумного фотоелемента потоком монохроматичного світла відбувається вивільнення фотоелектронів. Як зміниться максимальна кінетична енергія фотоелектронів при збільшенні частоти світла у 2 рази?

- 1) Збільшиться у 2 рази; 2) збільшиться менше ніж у 2 рази; 3) зменшиться у 2 рази; 4) збільшиться більш ніж у 2 рази; 5) не зміниться.

**22.** Які з наведених далі параметрів визначають червону межу фотоелекту?

- 1) Частота світла; 2) властивості речовини катода; 3) площа катода; 4) частота світла та властивості речовини катода; 5) інша відповідь.

**23.** Визначити швидкість електрона, якщо його імпульс дорівнює імпульсу фотона з довжиною хвилі 555 нм.

- 1)  $2,6 \cdot 10^4$  м/с; 2)  $1,3 \cdot 10^4$  м/с; 3)  $3,6 \cdot 10^5$  м/с; 4) інша відповідь.

### **Я-2.3. Висновки з теми**

1. Світло — це складний матеріальний об'єкт, який в одних умовах виявляє властивості електромагнітної хвилі, а в інших — потоку квантів світла.

2. Фотон — це частинки світла.

3. Існує «межа» прояву квантових властивостей світла, яка визначається частотою світла. Це означає, що за певних значень частот світла квантова фізика перетворюється на класичну — хвилюву.

4. Існування червоної межі фотоефекту пояснюється тим, що енергії фотона має вистачити на роботу з виривання електрона з поверхні металу та надання йому кінетичної енергії за межами поверхні металу.

5. Якщо фотон несе замалу кількість енергії, якої не вистачить хоча б на виконання роботи виходу електронем, фотоефект не відбуватиметься.

6. Маса фотона залежить від частоти або довжини хвилі випромінювання.

7. Явище фотоелектричного ефекту підтверджує квантові властивості світла.

8. Роботою виходу електрона називається додаткова енергія, яку потрібно надати електрону, щоб він залишив поверхню металу.

9. Робота виходу електрона з металу залежить від хімічної природи металу і не залежить від частоти та інтенсивності випромінювання, що подає на поверхню металу.

#### Я-2.4. Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Визначити енергію, масу та імпульс фотона видимого світла з довжиною хвилі 500 нм.

*Дано:*

$$\lambda = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с};$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\varepsilon — ? \quad m — ? \quad p — ?$$

*Розв'язання*

Енергія фотона визначається так:

$$\varepsilon = hv = \frac{hc}{\lambda}.$$

Маса фотона

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}.$$

Імпульс фотона

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Перевіримо одиницю енергії:

$$[\varepsilon] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right] = [\text{Дж}].$$

$$[m] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{м/с}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2} \right] = [\text{кг}];$$

$$[p] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right].$$

Виконуємо обчислення:

$$\varepsilon = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{-7}} = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$m = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,44 \cdot 10^{-35} = 4,4 \cdot 10^{-36} \text{ кг};$$

$$p = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-7}} = 1,3 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

**Відповідь.** Енергія фотона дорівнює  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж; маса —  $4,4 \cdot 10^{-36}$  кг; імпульс —  $1,3 \cdot 10^{-27}$  кг · м/с.

**Задача 2.** Лазер випромінює світло довжиною хвилі 630 нм. Скільки фотонів випромінює лазер за одну секунду, якщо його потужність дорівнює 2 мВт?

**Дано:**

$$t = 1 \text{ с};$$

$$\lambda = 6,3 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с};$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$$

$$P = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$$

$$N = ?$$

**Розв'язання**

Енергія одного фотона дорівнює:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Енергія, випромінювана лазером за час  $t$

$$E = Pt = N\varepsilon = N \frac{hc}{\lambda}.$$

Тоді кількість фотонів, які випромінює лазер за одну секунду, визначається так:

$$N = \frac{Pt\lambda}{hc}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[N] = \left[ \frac{\text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot \text{Дж}} \right] = [1].$$

Виконуємо обчислення:

$$N = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6,3 \cdot 10^{-7}}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 6,3 \cdot 10^{15}.$$

**Відповідь.** Лазер випромінює за одну секунду  $6,3 \cdot 10^{15}$  фотонів.

**Задача 3.** Електрон, початкова швидкість якого дорівнює  $10^6$  м/с, пройшов прискорювальну різницю потенціалів 4 В. Визначити довжину хвилі фотона, енергія якого дорівнює кінетичній енергії такого електрона.

*Дано:*

$$E_{\text{к}} = \varepsilon;$$

$$U = 4 \text{ В};$$

$$v_0 = 10^6 \text{ м/с};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

---

$$\lambda \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Енергія фотона

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Звідси його довжина хвилі визначатиметься так:

$$\lambda = \frac{hc}{\varepsilon}.$$

Робота електричного поля дорівнює зміні кінетичної енергії електрона

$$A = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

звідки

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + A.$$

Оскільки робота електричного поля дорівнює:

$$A = eU,$$

то

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + eU.$$

Підставивши цей вираз у формулу для визначення довжини хвилі, дістанемо:

$$\lambda = \frac{hc}{\frac{mv_0^2}{2} + eU}$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\lambda] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{Дж}} \right] = [\text{м}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{\frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (10^6)^2}{2} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

**Відповідь.** Довжина хвилі фотона дорівнює  $1,8 \cdot 10^{-7}$  м.

**Задача 4.** Визначити червону межу фотоефекту, якщо при опромінюванні катода світлом частотою  $1,6 \cdot 10^{15}$  Гц фотострум припиняється при затримуючій напрузі 4,2 В.

*Дано:*

$$\nu = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ Гц};$$

$$U_3 = 4,2 \text{ В};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

---


$$\nu_0 \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

За рівнянням Ейнштейна

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}.$$

Оскільки

$$\frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2} = eU_3,$$

Тоді

$$h\nu = A_{\text{вих}} + eU_3,$$

звідки робота виходу дорівнює:

$$A_{\text{вих}} = h\nu - eU_3.$$

Червона межа фотоефекту визначається за формулою:



$$h\nu_o = A_{\text{вих}}, \text{ тоді } \nu_o = \frac{h\nu - eU_3}{h} = \nu - \frac{eU_3}{h}.$$

Перевіримо одиницю вимірювання:

$$[\nu] = \left[ \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{Дж} \cdot \text{с}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Дж} \cdot \text{с}} \right] = [\text{Гц}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\nu_o = 1,6 \cdot 10^{15} - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 0,585 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

**Відповідь.** Гранична частота фотоелекту дорівнює  $5,85 \cdot 10^{14}$  Гц.

### **Я-2.5. Задачі для аудиторного розв'язування**

**2-1.** Визначити енергію, масу та імпульс фотонів рентгенівського випромінювання з довжиною хвилі  $10^{-10}$  м. ( $1,99 \cdot 10^{-15}$  Дж;  $2,27 \cdot 10^{-34}$  кг;  $6,62 \cdot 10^{-24}$  Н · с)

**2-2.** Визначити довжину хвилі випромінювання, якщо фотон несе енергію, що дорівнює  $10^{-17}$  Дж? (19,9 нм)

**2-4.** З якою швидкістю має рухатись електрон, щоб його кінетична енергія дорівнювала енергії фотона з довжиною хвилі  $5,2 \cdot 10^{-7}$  м? ( $9,3 \cdot 10^5$  м/с)

**2-5.** Визначити довжину хвилі фотона, якщо його імпульс дорівнює імпульсу електрона, який пройшов прискорювальну різницю потенціалів 4,9 В.  $\left( \lambda = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}} \right)$

**2-6.** Око людини сприймає світло довжиною хвилі 0,5 мкм, якщо світлові промені, які потрапляють в око, несуть енергію не менш як  $2 \cdot 10^{12}$  Дж. Яка кількість квантів світла при цьому щосекунди потрапляє на сітківку ока? ( $5,2 \cdot 10^{30}$  с<sup>-1</sup>)

**2-7.** При освітленні металу світлом, довжина хвилі якого дорівнює  $0,4 \cdot 10^{-6}$  м, фотоелектрони вилітають зі швидкістю  $0,5 \cdot 10^2$  км/с. Визначити роботу виходу з цього металу? ( $5 \cdot 10^{-19}$  Дж)

**2-8.** Робота виходу електрона з поверхні цезію дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. Визначити довжину хвилі світла, яким освітлюється цезій, якщо фотоелектрони мають швидкість  $6,3 \cdot 10^5$  м/с. (585 нм)

**2-9.** Робота виходу електрона з поверхні калію дорівнює  $3,44 \cdot 10^{-19}$  Дж. Визначити найбільшу кінетичну енергію електронів, вирваних з калію монохроматичним світлом, довжина хвилі якого дорівнює 313 нм. ( $2,88 \cdot 10^{-19}$  Дж)

**2-10.** При послідовному освітленні поверхні деякого металу світлом з довжиною хвилі 0,35 мкм і 0,54 мкм виявили, що відповідні максимальні швидкості фотоелектронів відрізняються між собою вдвічі. Визначити роботу виходу з поверхні цього металу. ( $3 \cdot 10^{-19}$  Дж)

**2-11.** На поверхню деякого металу падає фіолетове світло довжиною хвилі 0,400 мкм, при цьому затримувальна напруга для вибитих світлом електронів дорівнює 2 В. Визначити затримувальну напругу  $U_2$ , яку треба прикласти між катодом і анодом, щоб фотострум припинився, при освітленні того самого металу червоним світлом довжиною хвилі 0,770 мкм.  $\left( U_2 = U_1 + \frac{hc}{e} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = 0,51 \text{ В} \right)$

**2-12.** Фотоелектрони, що вириваються з поверхні металу світлом з частотою  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, повністю затримуються гальмуючим полем при різниці потенціалів 7 В, а за частоти  $4 \cdot 10^{15}$  Гц — при різниці потенціалів 15 В. Визначити сталу Планка.

**2-13.** Для калію червона межа фото ефекту 0,62 мкм. Визначити максимальну швидкість фотоелектронів, що вилітають при опроміненні калію фіолетовим світлом з довжиною хвилі 0,42 мкм? ( $5,2 \cdot 10^5$  м/с)

### *Я-2.6. Задачі для самостійного розв'язування*

**2-14.** Визначити енергію та довжину хвилі випромінювання, якщо маса фотонів дорівнює масі спокою електронів. ( $8,2 \cdot 10^{-14}$  Дж; 2,43 пм)

**2-15.** Визначити енергію, масу та імпульс фотона з довжиною хвилі  $1,6 \cdot 10^{-9}$  м.  $\left( 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}; 1,3 \cdot 10^{-34} \text{ кг}; 3,9 \cdot 10^{-34} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right)$ .

**2-16.** Вибиті світлом при фото ефекті електрони повністю затримуються затримувальним потенціалом 4 В, червона межа для металу дорівнює 0,6 мкм. Визначити частоту падаючого світла. ( $9,6 \cdot 10^{14}$  Гц)

**2-17.** Червона межа фото ефекту для вольфраму дорівнює  $2,75 \cdot 10^{-7}$  м. Визначити роботу виходу електрона з вольфраму, максимальну швидкість фотоелектронів, що вириваються з вольфраму світлом з довжиною хвилі  $1,8 \cdot 10^{-7}$  м. ( $4,51 \text{ еВ}; 8,8 \cdot 10^5$  м/с).

**2-18.** Червона межа фото ефекту для літію дорівнює 520 нм. Визначити затримувальну різницю потенціалів, яку треба прикласти, щоб затримати фотоелектрони, які вилітають із літію під дією ультрафіолетових променів довжиною хвилі 200 нм. (3,86 В)

**2-19.** Робота виходу електрона з поверхні цезію дорівнює 1,94 еВ. Визначити затримувальну різницю потенціалів, яку треба прикласти до фотоелемента, щоб затримати електрони, які виліта-

ють з поверхні цезію під дією променів з довжиною хвилі 200 нм. (0,17 В)

**2-20.** Визначити довжину хвилі випромінювання, яке падає на поверхню цинку, щоб максимальна швидкість фотоелектронів дорівнювала 2000 км/с. Червона межа фотоєфекту для цинку дорівнює 0,35 мкм. (83 нм)

**2-21.** Око людини сприймає світло з довжиною хвилі  $5 \cdot 10^{-7}$  м, якщо потужність світла, що падає на око, не менша за  $2,1 \cdot 10^{-17}$  Вт. Скільки фотонів щосекунди потрапляє на сітківку ока? (53 фотони)

**2-22.** На металеву пластинку падає світло, що має довжину хвилі 413 нм. Фотострум припиняється, коли затримувальна різниця потенціалів становить 1 В. Визначити роботу виходу електрона з поверхні пластинки й червону межу фотоєфекту. ( $3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $6,2 \cdot 10^{-7}$  м)

**2-23.** Визначити довжину хвилі випромінювання, якщо енергія фотона дорівнює енергії спокою електрона. ( $0,24 \cdot 10^{-11}$  м)

**2-24.** На поверхню золота падає випромінювання з довжиною хвилі 200 нм. Визначити роботу виходу електронів із золота, якщо їх максимальна кінетична енергія дорівнює  $2,5 \cdot 10^{-19}$  Дж. ( $7,43 \cdot 10^{-19}$  Дж)

**2-25.** З якою швидкістю має рухатись електрон, щоб його імпульс дорівнював імпульсу фотона випромінювання з довжиною хвилі  $5,2 \cdot 10^{-7}$  м? ( $1,4 \cdot 10^3$  м/с)

**2-26.** Визначити кінетичну енергію фотоелектронів під час опромінення вольфраму світловою хвилею довжиною  $1,8 \cdot 10^{-7}$  м, якщо довжина хвилі, яка відповідає червоній межі фотоєфекту для вольфраму, дорівнює  $2,75 \cdot 10^{-7}$  м. ( $3,8 \cdot 10^{-19}$  Дж)

**2-27.** Визначити червону межу фотоєфекту для цезію, якщо під час освітлення його поверхні фіолетовими променями з довжиною хвилі 400 нм максимальна швидкість фотоелектронів дорівнює  $6,5 \cdot 10^5$  м/с. (650 нм)

**2-28.** Робота виходу електронів з поверхні цезію дорівнює 1,94 еВ. Визначити затримувальний потенціал, який треба прикласти, щоб затримати фотоелектрони, якщо поверхня цезію опромінюється монохроматичним світлом довжиною хвилі 589 нм? (0,16 В)

**2-29.** Довжина хвилі, що відповідає червоній межі фотоєфекту, для цинку дорівнює 370 нм. Визначити довжину хвилі, що падає на поверхню цинку, якщо фотоєфект припинився при затримувальному потенціалі 0,2 В. (349 нм)

**2-30.** Визначити довжину світлової хвилі, що опромінює поверхню стронцію, якщо фотоелектрони мають максимальну кінетичну енергію  $1,8 \cdot 10^{-19}$  Дж, а червона межа фотоєфекту для стронцію дорівнює 550 нм. (367 нм)



### *Я-3.1. Теоретичні відомості*

Резерфорд, вивчаючи розсіювання  $\alpha$ -частинок, що проходили крізь тонкі шари речовини, дійшов висновку, що позитивний заряд атома та його маса містяться в дуже малому ядрі в центрі атома. Він запропонував планетарну, або ядерну, модель атома: *у центрі розташоване ядро, навколо якого обертаються електрони під дією кулонівських сил ядра*. Ці сили є причиною виникнення доцентрового прискорення. Проте ця модель не пояснює стабільності атомів. За законами електродинаміки електрон, що рухається з прискоренням, має випромінювати електромагнітні хвилі і, витрачаючи на це кінетичну енергію, впасти на ядро. Вихід із глухого кута знайшов у **1913 році данський фізик Н. Бор**. Він створив теорію будови і випромінювання атома водню і воднеподібних атомів, яка ґрунтується на моделі атома Резерфорда. Однак йому довелося ввести припущення, зовсім чужі класичним уявленням. Ці припущення Бор сформулював як постулати.

**Перший постулат Бора:** існують деякі стаціонарні стани атома, в яких він не випромінює енергію. Цим стаціонарним станам відповідають *певні* — стаціонарні орбіти, по яких рухаються електрони. Кожній орбіті відповідає *певне* значення енергії електрона. З віддаленням орбіти від ядра атома значення енергії електрона збільшується. Під час руху по стаціонарних орбітах електрони, не зважаючи на існування в них прискорення, *не випромінюють* електромагнітних хвиль.

**Другий постулат Бора:** у стаціонарному стані атома електрон, рухаючись по коловій орбіті, повинен мати квантовані значення моменту імпульсу, які задовольняють умову:

$$L_n = mvr = n\hbar,$$

де  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

**Третій постулат Бора:** під час переходу атома з одного стаціонарного стану в інший випускається або поглинається **один квант** енергії:

$$h\nu = E_n - E_k,$$

де  $E_n$  і  $E_k$  — енергії  $n$ -го та  $k$ -го стаціонарних станів.

Третій постулат ще називається **правилом частот Бора**. Випромінювання відбувається під час переходу атома зі стану з більшим значенням енергії у стан з меншим значенням енергії. Цьому відповідає перехід електрона з віддаленої від ядра орбіти на орбіту, ближчу до ядра. Поглинання енергії супроводжується переходом атома у стан з більшим значенням енергії. Цьому відповідає перехід електрона з орбіти, ближчої до ядра, на орбіту, більш віддалену від нього.

**Ядра** атомів усіх елементів складаються з елементарних частинок: **протонів** і **нейтронів**, які називають **нуклонами**.

Кількість протонів  $Z$  визначає порядковий номер атома хімічного елемента в таблиці Менделєєва. Кількість протонів  $Z$  і кількість нейтронів  $N$  в атомному ядрі визначає масове число атома:

$$A = Z + N.$$

Маси протона і нейтрона приблизно однакові ( $m_p \approx m_n$ ), а маса електрона в 1840 разів менша за масу протона. Тому практично вся маса атома зосереджується в ядрі. Ядра атомів з однаковими зарядами, але з різними масовими числами називають **ізотопами**, тобто вони відрізняються кількістю нейтронів. Протони і нейтрони в ядрі утримуються особливими ядерними силами. **Енергія зв'язку ядра**  $E_{зв}$  — це енергія, яку необхідно витратити на те, щоб поділити ядро на окремі нуклони і відокремити їх один від одного. Енергію зв'язку можна визначити за формулою Ейнштейна:

$$\Delta E_{зв} = \Delta mc^2.$$

Маса ядра завжди менша, ніж сума мас спокою нуклонів, з яких складається ядро. Різницю мас нуклонів і маси ядра називають **дефектом мас**:

$$\Delta m = [Zm_p + Nm_n] - M_{я}.$$

Маси нуклонів і ядер вимірюють або в кілограмах, або в атомних одиницях маси (а.о.м.):

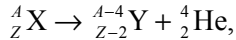
$$1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

**Радіоактивність** — це самовільне перетворення ядер одних елементів в ядра інших, яке супроводжується виділенням елементарних частинок.

Існує три види радіоактивного розпаду:

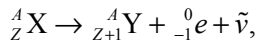
$\alpha$ -,  $\beta$ - і  $\gamma$ -розпад.

**Альфа-розпад** відбувається за схемою:

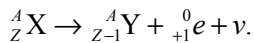


виділяється ядро гелію  ${}^4_2 \text{He}$  й утворюється ядро, зарядове число якого зменшується на два, а масове — на чотири. Під час бета-розпаду виділяється з ядра електрон або позитрон, зарядове число утвореного ядра збільшується або зменшується на одиницю, а масове число не змінюється.

**Бета-мінус розпад ( $\beta^-$ -розпад):**



**Бета-плюс розпад ( $\beta^+$ -розпад):**



Бета-розпад супроводжується випромінюванням антинейтрино ( $\tilde{\nu}$ ) і нейтрино ( $\nu$ ), які виникають при самовільному перетворенні нейтрона у протон і навпаки. Під час **гамма-розпаду** нове ядро не утворюється, а існуюче переходить у незбуджений стан, випромінюючи  $\gamma$ -промені — фотони великих енергій. Гамма-розпад завжди супроводжується альфа- і бета-випромінюванням, оскільки утворені ядра перебувають у збудженому стані.

Для реєстрації радіоактивних випромінювань і елементарних частинок використовують лічильники Гейгера, камеру Вільсона, бульбашкову камеру, метод товстошарових фотоемулсій.

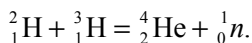
Біологічна дія радіоактивних випромінювань полягає в іонізації атомів і молекул живих організмів, унаслідок чого порушуються біологічні процеси та обмін речовин. Великі дози випромінювання можуть спричинити необоротні ураження окремих органів і організму в цілому.

**Ядерними реакціями називають перетворення атомних ядер під дією елементарних частинок або інших ядер.** Ядро атома урану під дією одного нейтрона поділяється на два близькі за масою уламки. При цьому звільняються два-три нейтрони, які, у свою чергу, можуть викликати поділ ядер урану. Відбувається **ланцюгова реакція**, під час якої кількість поділених ядер лавиноподібно зростає. Кількість урану, за якої можливе виникнення ланцюгової реакції, називається **критичною**. Кількість енергії, що виділяється під час поділу ядер, дуже велика. Вона становить  $2,3 \cdot 10^4$  кВт · год на один грам

урану. У разі некерованої ядерної реакції станеться ядерний вибух. Щоб відбувалася керована ядерна реакція, необхідно підтримувати в даній масі урану сталою середню кількість ядер, що поділяються.

Пристрої, в яких відбувається керована ядерна реакція, називають ядерними реакторами. Вони застосовуються як джерела енергії на атомних станціях, а також і в наукових цілях.

**Термоядерні реакції** — це реакції синтезу з легких ядер більш важких, які відбуваються при надвисоких температурах з виділенням дуже великої кількості енергії. Типовою є реакція злиття ядер дейтерію і тритію в ядро атома гелію:



Ця реакція відбувається на Сонці.

**Енергію ядерної реакції** можна визначити за формулою

$$\Delta E = c^2 [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

де  $m_1$  і  $m_2$  — маси ядер, які вступають у реакцію;  $m_3$  і  $m_4$  — маси ядер, які утворилися в ході реакції.

Якщо  $\Delta E > 0$ , то енергія виділяється.

Якщо  $\Delta E < 0$ , то енергія поглинається під час ядерної реакції.

### Я-3.2. Завдання для поточного тестування

1. Дописати формулювання першого постулату Бора:

Існують деякі ..... стани атома, в яких він .....

2. Дописати формулювання другого постулату Бора:

У ..... стані атома електрон, рухаючись по ....., повинен мати ..... значення ....., які задовольняють умову  $mvr = ?\hbar$ .

3. Дописати формулювання третього постулату Бора:

Під час переходу атома з одного ..... стану в інший ..... або ..... один .....  $h\nu = ? - ?$ .

4. Ядро атома складається із таких частинок:

1) протонів; 2) нуклонів; 3) нейтронів; 4) електронів.

5. Енергія зв'язку ядра визначається за формулою:

1)  $m_0c^2$ ; 2)  $mc^2$ ; 3)  $\Delta mc^2$ ; 4)  $h\nu$ .

6. У формулу для визначення дефекту маси ядра поставити необхідні величини:  $\Delta m = [?m_p + N?] - ?$

1)  $m_0$ ; 2)  $m_n$ ; 3)  $A - N$ ; 4)  $M_{\text{я}}$ ; 5)  $M_{\text{ат}}$ .

7. У схему  $\alpha$ -розпаду  ${}_Z^AX \rightarrow {}_2^4Y + {}_Z^A?$  підставити необхідні величини:

1)  ${}_{-1}^0e$ ; 2)  $\tilde{\nu}$ ; 3) He; 4)  ${}_{+1}^0e$ ; 5)  $\nu$ ; 6)  $Z - 2$ ; 7)  $Z - 1$ ; 8) A; 9)  $A - 4$ ; 10)  $Z + 1$ .

8. У схему  $\beta^-$ -розпаду  ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_Z^0e + ?$  підставити необхідні величини:

1)  ${}_{-1}^0e$ ; 2)  $\tilde{\nu}$ ; 3) He; 4)  ${}_{+1}^0e$ ; 5)  $\nu$ ; 6)  $Z - 2$ ; 7)  $Z - 1$ ; 8) A; 9)  $A - 4$ ; 10)  $Z + 1$ .

9. У схему  $\beta^+$ -розпаду  ${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^AY + {}_{+1}^0e + ?$  підставити необхідні величини:

1)  ${}_{-1}^0e$ ; 2)  $\tilde{\nu}$ ; 3) He; 4)  ${}_{+1}^0e$ ; 5)  $\nu$ ; 6)  $Z - 2$ ; 7)  $Z - 1$ ; 8) A; 9)  $A - 4$ ; 10)  $Z + 1$ .

10. У схему термоядерної реакції  ${}_1^1\text{H} + {}_1^1\text{H} = {}_2^4? + {}_0^1n$  підставити необхідні величини:

1) e; 2) 3; 3) He; 4) p; 5)  $\nu$ ; 6) 2; 7) 0; 8) 1; 9) -1; 10) +1.

11. У схему ядерної реакції  ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_0^1n = {}_7^? + {}_2^? \text{He}$  підставити необхідні величини:

1) 5; 2) 3; 3) He; 4) p; 5) 11; 6) 2; 7) 0; 8) 1; 9) -1; 10) +1.

12. У схему термоядерної реакції  ${}_{3}^6\text{Li} + {}_1^2\text{H} = {}_2^? \text{He} + {}_1^? \text{He}$  підставити необхідні величини:

1) 5; 2) 3; 3) He; 4) p; 5) 11; 6) 2; 7) 0; 8) 1; 9) -1; 10) +1.

### Я-3.3. Висновки з теми

1. Теорія Бора пояснює стабільність атома; умови, при яких атом випромінює; чому спектр випромінювання атома лінійчатий.

2. Бор вперше застосував квантування енергії та моменту імпульсу електрона для пояснення поведінки електрона в атомі водню.

3. Енергія випромінювання атома водню визначається різницею енергій стаціонарних станів електрона в атомі.



4. Ядра будь-яких атомів складаються тільки з протонів і нейтронів. Їх називають нуклонами.

5. Протон несе елементарний позитивний електричний заряд, заряд нейтрона дорівнює нулю.

6. Радіоактивність — це самовільне перетворення ядер атомів.

7. Під час радіоактивного розпаду завжди виконуються закони збереження зарядового і масового чисел.

8. Ядерні реакції відбуваються під дією на ядро атома елементарних частинок.

9. Під час  $\alpha$ -розпаду утворюється ядро, розташоване на дві клітинки ближче до початку таблиці Менделєєва.

10. Під час  $\beta^-$ -розпаду утворюється ядро, яке зсувається на одну клітинку ближче до кінця таблиці Менделєєва.

11. Під час  $\beta^+$ -розпаду утворюється ядро, яке зсувається на одну клітинку ближче до початку таблиці Менделєєва.

### Я-3.4. Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Визначити енергію зв'язку ізотопу літію  ${}^7_3\text{Li}$ .

*Дано:*

$$m_p = 1,6724 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$M_{\text{я}} = 11,6275 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

$$\Delta E_{\text{зв}} = ?$$

*Розв'язання*

Енергія зв'язку визначається за формулою:

$$\Delta E_{\text{зв}} = c^2(Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}),$$

де  $N = A - Z$  — кількість нейтронів.

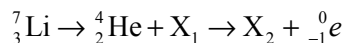
Виконуємо обчислення:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{зв}} &= (3 \cdot 10^8)^2 (3 \cdot 1,6724 \cdot 10^{-27} + \\ &+ 4 \cdot 1,6748 \cdot 10^{-27} - 11,6275 \cdot 10^{-27}) = 6,2 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

**Відповідь.** Енергія зв'язку ізотопу літію дорівнює  $6,2 \cdot 10^{-12}$  Дж.

**Задача 2.** Який ізотоп утворюється з радіоактивного ізотопу літію  ${}^7_3\text{Li}$  після одного  $\alpha$ -розпаду і одного  $\beta^-$ -розпаду?

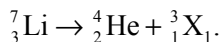
*Дано:*



$$X - ?$$

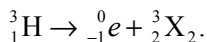
*Розв'язання*

Запишемо спочатку рівняння  $\alpha$ -розпаду:



Утворилося ядро ізоотопу  ${}^3_1\text{X}_1$ . Такі зарядове і масове числа відповідають ізоотопу водню тритію  ${}^3_1\text{H}$ .

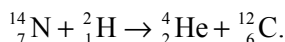
Потім відбувається  $\beta$ -розпад за схемою:



Утворилося ядро ізоотопу  ${}^3_2\text{X}_2$ . Такі зарядове і масове числа відповідають ізоотопу гелію  ${}^3_2\text{He}$ .

**Відповідь.** Утворився ізоотоп гелію  ${}^3_2\text{He}$ .

**Задача 3.** Обчислити енергію такої ядерної реакції:



*Дано:*

$$m_{\text{N}} = 14,00725 \text{ а.о.м.};$$

$$m_{\text{H}} = 2,01474 \text{ а.о.м.};$$

$$m_{\text{He}} = 4,00386 \text{ а.о.м.};$$

$$m_{\text{C}} = 12,00382 \text{ а.о.м.}$$

---


$$\Delta E \text{ — ?}$$

*Розв'язання*

Енергія реакції визначається за формулою:

$$\Delta E = \pm \Delta mc^2.$$

Якщо  $\Delta m > 0$ , то це означає, що внаслідок ядерної реакції енергія виділяється, а якщо  $\Delta m < 0$ , то енергія поглинається.

Порахуємо в а.о.м. масу частинок до та після реакції, а потім визначимо різницю мас  $\Delta m$ .

Вихідні частинки

$$m_{\text{N}} = 14,00725 \text{ а.о.м.}$$

$$m_{\text{H}} = 2,01474 \text{ а.о.м.}$$

---


$$16,02199 \text{ а.о.м.}$$

Частинки, що утворилися

$$m_{\text{He}} = 4,00386 \text{ а.о.м.};$$

$$m_{\text{C}} = 12,00382 \text{ а.о.м.}$$

---


$$16,00768 \text{ а.о.м.}$$

$$\Delta m = 16,02226 \text{ а.о.м.} - 16,00768 \text{ а.о.м.} = 0,01516 \text{ а.о.м.}$$

Оскільки  $\Delta m > 0$ , енергія під час ядерної реакції виділяється. Оскільки  $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ ,

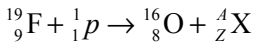
виконуємо обчислення:

$$\Delta E = 0,01516 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 2,27 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

**Відповідь.** Енергія, яка виділяється під час ядерної реакції дорівнює  $2,27 \cdot 10^{-12}$  Дж.

**Задача 4.** Під час бомбардування ядер фтору  ${}^{19}_9\text{F}$  протонами утворюється кисень  ${}^{16}_8\text{O}$ . Які ще ядра виникають під час цієї реакції і скільки енергії виділяється?

*Дано:*



$X - ? \quad \Delta E - ?$

*Розв'язання*

За законом збереження масового числа визначимо масове число невідомого ядра, яке утворюється під час реакції:

$$19 + 1 = 16 + A.$$

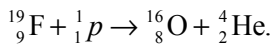
Масове число невідомого ядра дорівнює  $A = 4$ .

За законом збереження заряду визначимо зарядове число невідомого ядра:

$$9 + 1 = 8 + Z.$$

Зарядове число невідомого ядра таке  $Z = 2$ . Ядру з таким зарядом та масовим числом відповідає ядро атома гелію:  ${}^4_2\text{X} = {}^4_2\text{He}$ .

Запишемо рівняння ядерної реакції:



Енергію, яка виділяється під час ядерної реакції, визначимо за формулою:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2.$$

Різниця мас ядер в ядерній реакції така:

$$\Delta m = \sum_{i=1}^n m_i - \sum_{k=1}^n m_k = (m_{\text{F}} + m_{\text{p}}) - (m_{\text{O}} + m_{\text{He}}).$$

Тоді енергія ядерної реакції дорівнює:

$$\Delta E = [(m_F + m_p) - (m_O + m_{He})] \cdot 1,662 \cdot 10^{-27} \cdot c^2.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[\Delta E] = \left[ \text{а.о.м.} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{а.о.м.}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right] = [\text{Дж}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\begin{aligned} \Delta E &= [(18,99843 + 1,00783) - (15,99491 + 4,00260)] \times \\ &\times 1,662 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

**Відповідь.** Енергія ядерної реакції дорівнює  $1,3 \cdot 10^{-12}$  Дж.

**Задача 5.** Вперше штучно отримано радіоактивний нуклід при бомбардуванні ядер алюмінію  ${}_{13}^{27}\text{Al}$   $\alpha$ -частинками. Ядро якого елемента утворилося в результаті реакції, якщо при цьому виділилися нейтрони? Визначити енергію зв'язку отриманого ядра, якщо маса спокою нейтрона  $m_n = 1,00899$  а.о.м., маса спокою протона  $m_p = 1,00814$  а.о.м., маса спокою ядра  $m_{\text{я}} = 29,9783$  а.о.м.

**Дано:**

$$m_n = 1,00899 \text{ а.о.м.} = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

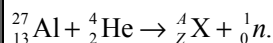
$$m_p = 1,00814 \text{ а.о.м.} = 1,6735 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$m_{\text{я}} = 29,9783 \text{ а.о.м.} = 49,7640 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$${}^A_Z X \text{ — ? } \Delta E_{\text{зв}} \text{ — ?}$$

**Розв'язання**

Запишемо рівняння ядерної реакції:



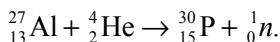
За законом збереження масового числа визначимо масове число невідомого ядра:

$$27 + 4 = A + 1, \text{ звідки } A = 30.$$

За законом збереження заряду визначимо зарядове число невідомого ядра:

$$13 + 2 = Z + 0, \text{ звідки } Z = 15.$$

За періодичною системою Д. І. Менделєєва визначимо, що  ${}_{15}^{30}\text{X}$  — ядро атома фосфору  ${}_{15}^{30}\text{P}$ . Остаточне рівняння реакції набуває такого вигляду:



Енергія зв'язку визначається за формулою:

$$\Delta E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot c^2.$$

Дефект маси ядра  $\Delta m$  визначимо так:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}},$$

Кінцева формула така:

$$\Delta E_{\text{зв}} = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{яд}}) \cdot c^2.$$

Виконуємо обчислення:

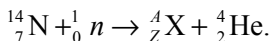
$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{зв}} &= (15 \cdot 1,00814 + 15 \cdot 1,00899 - 29,9783) \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = \\ &= 4,16 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

**Відповідь.** Утворилося ядро атома фосфору  ${}_{15}^{30}\text{P}$ , енергія зв'язку якого дорівнює  $4,16 \cdot 10^{-12}$  Дж.

**Задача 6.** Ядро ізоотопу азоту  ${}_{7}^{14}\text{N}$  захоплює нейтрон, унаслідок чого із ядра вилітає  $\alpha$ -частинка й утворюється невідомий елемент  ${}_{Z}^AX$ . Записати ядерну реакцію і визначити невідомий елемент.

### *Розв'язання*

Запишемо ядерну реакцію:



За законами збереження масових і зарядових чисел можна визначити  $Z$  і  $A$ :

$$14 + 1 = A + 4, \text{ тоді } A = 11;$$

$$7 + 0 = Z + 2, \text{ тоді } Z = 5.$$

**Відповідь.** Невідомий елемент — це ізоотоп бору  ${}_{5}^{11}\text{B}$ .

**Задача 7.** Під час реалізації термоядерного синтезу  ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} = 2 \cdot {}^4_2\text{He}$  виділяється  $2,68 \cdot 10^{13}$  Дж теплоти. Визначити масу ядерного пального  ${}^6_3\text{Li}$ , що витрачається.

*Дано:*

$$E = 2,68 \cdot 10^{13} \text{ Дж};$$

$$m_{\text{Li}} = 9,985 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$m_{\text{H}} = 3,343 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$m_{\text{He}} = 6,6500 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$m$  — ?

*Розв'язання*

Визначимо енергію, яка виділяється в ядерній реакції:

$$\Delta E = [(m_1 + m_2) - 2m_3]c^2,$$

де  $m_1$ ,  $m_2$  — маси елементів, що беруть участь у реакції;  $m_3$  — маса елемента, що утворився під час реакції. Така кількість енергії виділяється, якщо в реакцію вступає один атом літію і один атом дейтерію.

Можна визначити кількість атомів, які утворюють енергію  $2,68 \cdot 10^{13}$  Дж:

$$N = \frac{E}{\Delta E}, \text{ але } N = \frac{m}{\mu} N_A.$$

Маса ядерного пального визначається за формулою:

$$m = \frac{N\mu}{N_A},$$

де  $\mu$  — молярна маса Li;  $N_A$  — число Авогадро. Тоді

$$m = \frac{E\mu}{\Delta E N_A}.$$

Перевіримо одиницю величини:

$$[m] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{Дж} \cdot \text{моль}} \right] = [\text{кг}].$$

Виконуємо обчислення:

$$\Delta E = (3 \cdot 10^8)^2 \cdot (9,985 + 3,343 - 2 \cdot 6,65) \cdot 10^{-27} = 0,252 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

$$m = \frac{2,68 \cdot 10^{13} \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 0,1 \text{ кг}.$$

**Відповідь.** Маса ядерного пального дорівнює 0,1 кг.

### Я-3.5. Задачі для аудиторного розв'язування

**3-1.** Заряд ядра атома хімічного елемента дорівнює  $4,8 \cdot 10^{-18}$  Кл. Визначити номер елемента. Скільки електронів на електронній оболонці цього атома? (Цинк; 30 електронів)

**3-2.** Чому дорівнює заряд ядра атома ванадію, атомний номер якого 23? ( $3,68 \cdot 10^{-18}$  Кл)

**3-3.** Назвати хімічний елемент, в ядрі атома якого містяться: а) 6 протонів і 6 нейтронів; б) 19 протонів і 20 нейтронів; в) 50 протонів і 69 нейтронів.

**3-4.** Який ізотоп утворюється з радіоактивного талію  ${}_{81}^{210}\text{Tl}$  після трьох послідовних  $\beta$ -розпадів і одного  $\alpha$ -розпаду? (Ізотоп свинцю  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ ).

**3-5.** Радіоактивний натрій  ${}_{11}^{24}\text{Na}$ , розпадаючись, випромінює електрон. Який новий елемент утворюється при цьому? ( ${}_{10}^{24}\text{Na}$ ).

**3-6.** Під час радіоактивного розпаду уран  ${}_{92}^{238}\text{U}$  перетворюється на свинець  ${}_{82}^{296}\text{Pb}$ . Скільки  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпадів при цьому відбувається? (8  $\alpha$ -розпадів; 6  $\beta$ -розпадів)

**3-7.** Радіоактивний ізотоп азоту  ${}_{7}^{13}\text{N}$ , розпадаючись, перетворюється в ізотоп вуглецю  ${}_{6}^{13}\text{C}$ . Записати рівняння ядерної реакції. Яка частинка при цьому випромінюється? (Позитрон)

**3-8.** Визначити енергію, що виділяється під час ядерної реакції:  
 ${}_{3}^7\text{Li} + {}_{1}^1\text{H} \rightarrow {}_{2}^4\text{He} + {}_{2}^4\text{He}$ . (17,3 МеВ)

**3-9.** Знайти енергію, що поглинається під час ядерної реакції:  
 ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_{2}^4\text{He} \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{1}^1\text{H}$ . (1,16 МеВ)

**3-10.** Під час поділу ядра урану  ${}_{92}^{235}\text{U}$  на два уламки виділяється енергія 200 МеВ. Скільки енергії виділяється під час спалювання в ядерному реакторі 1 г урану  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ? ( $8,2 \cdot 10^{10}$  Дж)

**3-11.** Атомна електростанція потужністю  $10^9$  Вт має ККД 20 %. Скільки урану-235 витрачається за добу? Вважати, що при поділі одного ядра урану виділяється енергія  $E_0 = 200$  МеВ. (5,3 кг)

**3-12.** Визначити енергію зв'язку ядра дейтерію  ${}_{1}^2\text{H}$  і тритію  ${}_{1}^3\text{H}$ . (1,72 МеВ; 7,97 МеВ)

**3-13.** Визначити питому енергію зв'язку (енергію, що припадає на один нуклон) для ядра ізотопу кисню  ${}_{8}^{17}\text{O}$ . (7,76 МеВ)

### Я-3.6. Задачі для самостійного розв'язування

**3-14.** Енергія зв'язку ядра, яке складається з двох протонів і одного нейтрона, дорівнює 7,72 МеВ. Визначити масу нейтрального атома, який має це ядро. ( $m_{\text{я}} = 2m_p + m_n + \Delta m = 3,01604$  а.о.м.)

**3-15.** Визначити питому енергію зв'язку ядра  $^{12}_6\text{C}$ . (7,68 МеВ/нуклон)

**3-16.** Визначити порядковий номер і масове число ізоотпу, який утворюється з торію  $^{232}_{90}\text{Th}$  після трьох  $\alpha$ -розпадів і двох  $\beta$ -розпадів. ( $Z = 80$ ,  $A = 220$ , цим елементом є радон).

**3-17.** Ядро берилію  $^9_4\text{Be}$ , захоплюючи дейтерій  $^2_1\text{H}$ , перетворюється на ядро атома бору  $^{10}_5\text{B}$ . Записати рівняння ядерної реакції і визначити, яка частинка при цьому викидається. (Нейтрон)

**3-18.** Під час опромінювання алюмінію  $^{27}_{13}\text{Al}$   $\alpha$ -частинками утворюється фосфор  $^{30}_{13}\text{P}$ . Записати цю реакцію.

**3-19.** Яка енергія виділяється під час синтезу одного ядра гелію  $^4_2\text{He}$  з тритію й дейтерію? (17,6 МеВ)

**3-20.** Визначити енергію ядерних реакцій: 1)  $^9_4\text{Be} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n}$ ; 2)  $^{44}_{20}\text{Ca} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{41}_{19}\text{K} + ^4_2\text{He}$ ; 3)  $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^7_4\text{Be} + ^1_0\text{n}$ ; 4)  $^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n}$ . Поглинається чи виділяється енергія в цих реакціях? (1) 43,6 МеВ, виділяється; 2) 1,05 МеВ, поглинається; 3) 1,64 МеВ, поглинається; 4) 2,8 МеВ, поглинається)

**3-21.** Який елемент утворюється під час  $\alpha$ -розпаді ізоотпу полонію  $^{208}_{84}\text{Po}$ ? ( $^{204}_{82}\text{Pb}$ )

**3-22.** Під час захоплення нейтрона ядром магнію  $^{24}_{12}\text{Mg}$  утворюється радіоактивний ізоотп натрію  $^{24}_{11}\text{Na}$ . Які частинки випускаються при цьому ядерному перетворенні? Записати рівняння ядерної реакції. (Нейтрони)

**3-23.** Скільки  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинок утворюється під час перетворення ядра урану  $^{223}_{92}\text{U}$  в ядро вісмуту  $^{209}_{83}\text{Bi}$ ? (6  $\alpha$ - і 3  $\beta$ -частинок)

**3-24.** Який ізоотп утворюється з радіоактивного ізоотпу сурми  $^{133}_{51}\text{Sb}$  після чотирьох  $\beta$ -розпадів? Обчислити заряд ядра нового ізоотпу. ( $8,8 \cdot 10^{-18}$  Кл)

**3-25.** Під час взаємодії атома дейтерію з ядром літію  $^7_3\text{Li}$  випромінюється нейтрон. Записати рівняння ядерної реакції й обчислити енергію, яка виділяється під час цієї реакції. (15 МеВ)

**3-26.** Знайти енергію, що виділяється під час ядерної реакції:  $^9_4\text{Be} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{H}$ . (4,35 МеВ)



**3-27.** Під час бомбардування протонами ядер берилію відбувається ядерна реакція з виділенням  $\alpha$ -частинки. Записати рівняння ядерної реакції. Визначити енергію ядерної реакції. (2,14 MeV)

**3-28.** Скільки енергії виділяється під час утворення 1 г гелію  ${}^4_2\text{He}$  з протонів і нейтронів? ( $65 \cdot 10^{10}$  Дж)

**3-29.** Яку кількість води можна нагріти від  $0^\circ\text{C}$  до кипіння, якщо використати все тепло, що виділяється під час реакції  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$  при повному перетворенні 1 г літію? ( $5,6 \cdot 10^5$  êã)

**3-30.** Якій зміні мас  $\Delta m$  відповідає енергія, що утворюється за 1 годину на електростанції потужністю  $2,5 \cdot 10^3$  МВт? ( $1,0 \cdot 10^{-4}$  кг)

**3-31.** Під час поділу одного ядра урану  ${}^{235}_{92}\text{U}$  виділяється енергія 200 MeV. Скільки води, взятої при температурі  $20^\circ\text{C}$ , можна перетворити на пару, якщо використати всю енергію, яка виділяється в ядерному реакторі з 1 г урану? ( $3,2 \cdot 10^4$  кг)

**3-32.** Під час роботи ядерного реактора за добу виділяється енергія, еквівалентна масі 1 г. Яка потужність такого реактора? ( $1,04 \cdot 10^{11}$  Вт)

**3-33.** При поділі ядра урану  ${}^{135}_{92}\text{U}$  на два уламки їх загальна маса спокою менша за початкову масу ядра на 0,2 маси протону. Визначити потужність атомної електростанції, яка витрачає за добу 200 г ізотопу урану і має ККД 25 %? ( $4,4 \cdot 10^7$  Вт)

**3-34.** Скільки урану-235 витрачає за добу атомний криголам, якщо потужність його двигунів дорівнює  $3,2 \cdot 10^7$  Вт, а ККД — 17 %. Вважати, що під час поділу одного ядра урану-235 виділяється 200 MeV енергії. (0,2 кг)

**3-35.** Скільки урану-235 витрачається за добу на АЕС потужністю 5 MeV з ККД 17 %? Під час поділу одного ядра урану виділяється енергія  $E_0 = 200$  MeV. (31 г)



---

---

## ДОДАТКИ

---

---

### Тригонометричні формули

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta;$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta;$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha;$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1 = 1 - 2 \sin^2 \alpha;$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2};$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2};$$

$$\sin \alpha \pm \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha \pm \beta}{2} \cos \frac{\alpha \mp \beta}{2};$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2};$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2};$$

$$\cos \alpha + \sin \alpha = \sqrt{2} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right) = \sqrt{2} \sin \left( \alpha + \frac{\pi}{4} \right);$$

$$\cos \alpha - \sin \alpha = \sqrt{2} \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{4} \right) = -\sqrt{2} \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right);$$

$$a \sin \alpha + b \cos \alpha = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\alpha + \varphi), \text{ де } \varphi = \arctg \left( \frac{a}{b} \right).$$

### Теорема синусів і теорема косинусів

Нехай  $a, b, c$  — сторони трикутника  $ABC$ ;  $\alpha, \beta, \gamma$  — кути цього трикутника, що лежать відповідно проти сторін  $a, b, c$ ;  $R$  — радіус кола, описаного навколо трикутника. Тоді справедливі:

*теорема синусів:*

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} = 2R;$$

*теорема косинусів:*

$$a^2 + b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha; \quad b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta; \quad c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma.$$

## Множники для утворення десяткових, кратних і часткових одиниць

Найменування	Множник	Скорочене позначення	
		українське	міжнародне
Фемто	$10^{-15}$	Ф	F
Піко	$10^{-12}$	п	p
Нано	$10^{-9}$	н	n
Мікро	$10^{-6}$	мк	μ
Мілі	$10^{-3}$	м	m
Санті	$10^{-2}$	с	c
Деци	$10^{-1}$	д	d
Дека	$10^1$	да	da
Гекто	$10^2$	г	h
Кіло	$10^3$	к	k
Мега	$10^6$	М	M
Гіга	$10^9$	Г	G
Тера	$10^{12}$	Т	T
Пета	$10^{15}$	П	
Екса	$10^{18}$	Е	

## Одиниці фізичних величин СІ, що мають власні найменування

Величина	Одиниця		Величина	Одиниця	
	найменування	позначення		найменування	позначення
Довжина	метр	м	Сила струму	ампер	А
Маса	кілограм	кг	Потік електричного заряду	кулон	Кл
Час	секунда	с	Потенціал електричного поля, електрична напруга	вольт	В

Закінчення табл.

Плоский кут	радіан	рад	Електрична ємність	фарада	Ф
Тілесний кут	стерадіан	ср	Електричний опір	ом	Ом
Сила, вага	ньютон	Н	Електрична провідність	сіменс	См
Тиск, на-пруга	паскаль	Па	Магнітна ін-дукція	тесла	тл
Модуль пружності	паскаль	Па	Магнітний потік	вебер	Вб
Робота, енергія	джоуль	Дж	Індуктивність	генрі	Гн
Потужність	ват	Вт	Сила світла	кандела	кд
Частота коливань	герц	Гц	Світловий по-тік	люмен	лм
Термоди-намічна температу-ра, різниця температур	кельвін	К	Освітленість	люкс	лк
Теплота (кількість теплоти)	джоуль	Дж	Потік випро-мінювання, доза випромі-нювання (по-глинена доза випроміню-вання)	грей	Гр
Кількість речовини	моль	моль	Активність ізотопу	беке-рель	Бк
Електрич-ний заряд	кулон	Кл			

**Позасистемні одиниці, допущені до  
використання на рівні з одиницями СІ**

Величина	Найменування	Одиниця позначення	Співвідношення з одиницею СІ
Маса	тонна	т	$10^3$ кг
	атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Об'єм, місткість	літр	л	$10^{-3}$ м <sup>3</sup>
Плоский кут	градус	...°	$1,74 \cdot 10^{-2}$ рад
	хвилина	...'	$2,91 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	..."	$4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
Робота, енергія	електрон-вольт	еВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж
Відносна величина	одиниця (число 1)	—	1
	процент	%	$10^{-2}$
Логарифмічна величина	Бел децибел	Б дБ	—
Температура	градус Цельсія	°С	$1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ К}$

**Співвідношення між позасистемними  
одиницями та одиницями СІ**

<i>Одиниці простору та часу. Одиниці механічних величин</i>	
Довжина	$1\text{ ангстрем (}\text{Å}) = 10^{-10}\text{ м} = 10^{-8}\text{ см}$
Час	$1\text{ доба} = 86\ 400\text{ с}$
	$1\text{ рік} = 365,25\text{ доби} = 3,16 \cdot 10^7\text{ с}$
Плоский кут	$1^{\circ} = \pi / 180\text{ рад} = 1,75 \cdot 10^{-2}\text{ рад}$
	$1' = \pi / 108 \cdot 10^{-2}\text{ рад} = 2,91 \cdot 10^{-4}\text{ рад}$
	$1'' = \pi / 648 \cdot 10^{-3}\text{ рад} = 4,85 \cdot 10^{-6}\text{ рад}$
Об'єм, місткість	$1\text{ л} = 10^{-3}\text{ м}^3 = 10^3\text{ см}^3$
Маса	$1\text{ т} = 10^3\text{ кг}$
	$1\text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$

Сила	1 кгс = 9,81 Н
Робота, енергія	1 кгс·м = 9,81 Дж 1 Вт·ч = 3,6 · 10 <sup>3</sup> Дж 1 еВ = 1,60 · 10 <sup>-19</sup> Дж
Потужність	1 л. с. = 736 Вт
Тиск	1 кг/см <sup>2</sup> = 9,81 · 10 <sup>4</sup> Па 1 мм рт. ст. = 133 Па 1 бар = 10 <sup>5</sup> Па 1 атм = 1,01 · 10 <sup>5</sup> Па
Потужність (механічна)	1 кгс/мм <sup>2</sup> = 9,81 · 10 <sup>6</sup> Па
Частота обертання	1 об/с = 1с <sup>-1</sup> 1 об/хв. = 1/60 1с <sup>-1</sup>
Хвильове число	1 см <sup>-1</sup> = 100 м <sup>-1</sup>
<i>Одиниці величин молекулярної фізики та термодинаміки</i>	
Концентрація частинок	1 см <sup>-3</sup> = 10 <sup>6</sup> м <sup>-3</sup>
Теплота (кількість теплоти)	1 кал = 4,19 Дж 1ккал = 4,19 · 10 <sup>3</sup> Дж
<i>Одиниці електричних та магнітних величин</i>	
Електричний момент диполя	1Д = 3,34 · 10 <sup>-30</sup> Кл·м
Питомий електричний опір	1Ом·мм <sup>2</sup> /м = 10 <sup>6</sup> Ом·м
Магнітна індукція	1 Гс = 10 <sup>-4</sup> Тл
Магнітний потік	1 Мкс = 10 <sup>-8</sup> Вб
Потужність магнітного поля	$1E = \frac{10^3}{4\pi} \frac{A}{m} = 79,6 \text{ А/м}$

### Астрономічні величини

Середній радіус Землі 6,37 · 10 <sup>6</sup> м	Маса Місяця 7,3 · 10 <sup>22</sup> кг
Середня густина Землі 5500 кг/м <sup>3</sup>	Період обертання Місяця навколо Землі 27 діб 7 год 43 хв
Маса Землі 5,98 · 10 <sup>24</sup> кг	Середня відстань між центрами Землі та Місяця 3,84 · 10 <sup>8</sup> м
Радіус Сонця 6,96 · 10 <sup>8</sup> м	Середня відстань між центрами Сонця та Землі 1,5 · 10 <sup>11</sup> м
Маса Сонця 1,99 · 10 <sup>30</sup> кг	
Середня густина Сонця 1400 кг/м <sup>3</sup>	
Радіус Місяця 1,74 · 10 <sup>6</sup> м	

## Основні фізичні сталі

Атомна одиниця маси (а.о.м.)	$1,660567 \cdot 10^{-27}$ кг
Гравітаційна стала	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н · м <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup>
Електрична стала	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Елементарний заряд	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Магнітна стала	$1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Маса спокою електрона	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса спокою протона	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою нейтрона	$1,675 \cdot 10^{-27}$ кг
Стала Больцмана	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Стала Фарадея	$9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Стала Планка	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Швидкість світла у вакуумі	$3 \cdot 10^8$ м/с
Стала Авогадро	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Універсальна газова стала	8,31 Дж/(моль · К)

## Густина речовини

### *Тверді тіла, 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>*

Алюміній	2,7	Олово	7,3
Германій	5,4	Свинець	11,3
Кремній	2,4	Срібло	10,5
Лід	0,9	Сталь	7,8
Мідь	8,9	Хром	7,2
Ніхром	8,4	Латунь	8,4

### *Рідини, 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>*

Бензин	0,70	Нафта	0,80
Вода	1,0	Ртуть	13,6
Гас	0,80	Спирт	0,8

### Гази (за нормальних умов), кг/м<sup>3</sup>

Азот	1,25	Повітря	1,29
Водень	0,09	Кисень	1,43

### Теплові властивості речовин

#### Тверді тіла

Речовина	Питома теплоємність, кДж/(кг · К)	Температура плавлення, °С	Питома теплота плавлення, кДж/кг
Алюміній	0,88	660	380
Лід	2,1	0	330
Мідь	0,38	1083	180
Олово	0,23	232	59
Свинець	0,13	3227	25
Срібло	0,23	960	87
Сталь	0,46	1400	82

#### Рідини

Речовина	Питома теплоємність, кДж/(кг · К)	Температура кипіння <sup>1</sup> , °С	Питома теплота пароутворення, МДж/кг
Вода	4,19	100	2,3
Ртуть	0,12	357	0,29
Спирт	2,4	78	0,85

<sup>1</sup>За нормального атмосферного тиску.

#### Гази

Речовина	Питома теплоємність <sup>2</sup> , кДж/(кг · К)	Температура конденсації <sup>1</sup> , °С
Азот	1,05	-196
Водень	14,3	-253
Повітря	1,01	—
Гелій	5,29	-269
Кисень	0,913	-183

<sup>1</sup> За нормального атмосферного тиску.

<sup>2</sup> За сталого атмосферного тиску.



**Коефіцієнт поверхневого натягу  
рідин при температурі 20 °С, мН/м**

Вода	73	Молоко	46
Бензин	21	Нафта	30
Гас	24	Ртуть	510
Мильний розчин	40	Спирт	22

**Питома теплота згорання  
палива, МДж/кг**

Бензин	46	Порох	3,8
Деревина	10	Спирт	29
Дизельне паливо	42	Паливо для реактивних літаків (ТС-1)	43
Кам'яне вугілля	29		
Гас	46	Умовне паливо	29

**Залежність тиску  $p$  і густини  $\rho$   
насиченої водяної пари  
від температури**

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-5	0,40	3,2	11	1,33	10,0
0	0,61	4,8	12	1,40	10,7
1	0,65	5,2	13	1,49	11,4
2	0,71	5,6	14	1,60	12,1
3	0,76	6,0	15	1,71	12,8
4	0,81	6,4	16	1,81	13,6
5	0,88	6,8	17	1,93	14,5
6	0,93	7,3	18	2,07	15,4
7	1,0	7,8	19	2,20	16,3
8	1,06	8,3	20	2,33	17,3
9	1,14	8,8	25	3,17	23,0
10	1,23	9,4	50	12,3	83,0

## Психрометрична таблиця

Показання сухого термометра, °С	Різниця показань сухого і вологого термометрів, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Відносна вологість, %										
0	100	81	63	45	28	11	–	–	–	–	–
2	100	84	68	51	35	20	–	–	–	–	–
4	100	85	70	56	42	28	14	–	–	–	–
6	100	86	73	60	47	35	23	10	–	–	–
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

## Межа міцності і модуль Юнга

Речовина	$\sigma_{\max}$ , МПа	$E$ , ГПа
Алюміній	100	70
Латунь	50	100
Свинець	15	17
Срібло	140	80
Сталь	500	210

## Діелектрична проникність $\epsilon$

Речовина	$\epsilon$	Речовина	$\epsilon$
Вода	81	Масло трансформаторне	2,2
Восковий папір	3,7	Парафін	2
Гас	2	Скло	5,5
Ебоніт	2,6	Слюда	6
Кварц	2,7	Фарфор	6

**Питомий опір  $\rho$  (при температурі  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ )  
та температурний коефіцієнт опору  $\alpha$**

Провідник	$\rho$ , нОм·м	$\alpha$ , К <sup>-1</sup>	Провідник	$\rho$ , нОм·м	$\alpha$ , К <sup>-1</sup>
Алюміній	28	0,0038	Нікелін	400	0,000017
Вольфрам	55	0,0051	Ніхром	980	0,00026
Графіт	$3,9 \cdot 10^3$	-0,0008	Ртуть	958	0,0009
Залізо	98	0,0062	Свинець	211	0,0042
Константан	480	0,00002	Сталь	120	0,006
Мідь	17,2	0,0043	Платина	107	0,0039

**Електрохімічні еквіваленти, мг/Кл ( $10^{-6}$  кг/Кл)**

Алюміній (Al <sup>3+</sup> )	0,093	Нікель (Ni <sup>2+</sup> )	0,30
Водень (H <sup>+</sup> )	0,0104	Срібло (Ag <sup>+</sup> )	1,12
Кисень (O <sup>2-</sup> )	0,083	Хром (Cr <sup>3+</sup> )	0,18
Мідь (Cu <sup>2+</sup> )	0,33	Цинк (Zn <sup>2+</sup> )	0,34
Олово (Sn <sup>2+</sup> )	0,62		

**Показники заломлення  $n$**   
(середні для видимого випромінювання)

Речовина	$n$	Речовина	$n$
Алмаз	2,42	Повітря	1,00029
Вода ( $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ )	1,33	Сірковуглець	1,63
Кварц	1,54	Скипидар ( $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ )	1,47
Лід ( $t=-4\text{ }^\circ\text{C}$ )	1,31	Скло	1,50
Бензол	1,60	Гліцерин	1,470

## Робота виходу електронів з металу

Метал	A, eB	A, 10 <sup>-19</sup> Дж	Метал	A, eB	A, 10 <sup>-19</sup> Дж
Цезій	2,0	3,2	Залізо	4,5	7,2
Рубідій	2,1	3,4	Золото	4,7	7,5
Калій	2,2	3,5	Платина	6,3	10,1
Літій	2,3	3,7	Срібло	4,7	7,5
Нагрій	2,5	4,0	Цинк	4,0	6,4

## Маса атомів (а.о.м.) деяких ізотопів

Елемент	Порядковий номер	Ізотоп	Маса	Елемент	Порядковий номер	Ізотоп	Маса
Нейтрон	0	n	1,00867				
Водень	1	<sup>1</sup> H	1,00783	Берилій	4	<sup>7</sup> Be	7,01693
		<sup>2</sup> H	2,01410			<sup>8</sup> Be	8,00531
		<sup>3</sup> H	3,01605			<sup>9</sup> Be	9,01219
		<sup>10</sup> Be	10,01354				
Гелій	2	<sup>3</sup> He	3,01603	Бор	5	<sup>9</sup> B	9,01333
		<sup>4</sup> He	4,00260			<sup>10</sup> B	10,01294
Літій	3	<sup>6</sup> Li	6,01513				
Вуглець	6	<sup>10</sup> C	10,00168	Магній	12	<sup>23</sup> Mg	22,99414
		<sup>11</sup> C	11,01492			<sup>26</sup> Mg	25,99413
		<sup>12</sup> C	12,00000			<sup>27</sup> Mg	26,98504
		<sup>13</sup> C	13,00335	Алюміній	13	<sup>27</sup> Al	26,98154
<sup>14</sup> C	14,00324	<sup>30</sup> Al	29,99817				
Азот	7	<sup>13</sup> N	13,00574	Кремній	14	<sup>30</sup> Si	29,97377
		<sup>14</sup> N	14,00307			<sup>31</sup> Si	30,97535
		<sup>15</sup> N	15,00011	Фосфор	15	<sup>31</sup> P	30,97376

Закінчення табл.

Кисень	8	<sup>15</sup> O	15,00777	Калій	19	<sup>41</sup> K	40,96184		
		<sup>16</sup> O	15,99491			Кальцій	20	<sup>40</sup> Ca	39,96257
		<sup>17</sup> O	16,99913			Свинець	82	<sup>44</sup> Ca	43,95549
		<sup>18</sup> O	17,99916					<sup>206</sup> Pb	205,97446
Фтор	9	<sup>19</sup> F	18,99840	Полоній	84	<sup>210</sup> Po	209,98297		
Нікель	28	<sup>59</sup> Ni	58,71000	Мідь	29	<sup>62</sup> Cu	61,85220		
						<sup>63</sup> Cu	62,9296		
Ванадій	23	<sup>52</sup> V	51,9415	Марганець	25	<sup>55</sup> Mn	54,9380		
Цинк	30	<sup>62</sup> Zn	61,8522	Бром	35	<sup>87</sup> Br	86,904		
Рубідій	37	<sup>94</sup> Rb	94,02	Кадмій	48	<sup>112</sup> Cd	11,90276		
Цезій	55	<sup>140</sup> Cs	140,013	Уран	92	<sup>235</sup> U	235,04393		
						<sup>238</sup> U	238,05353		

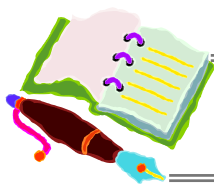
### Період піврозпаду радіоактивних ізотопів

Ізотоп	Символ	Тип розпаду	Період піврозпаду
Актиній	<sup>225</sup> <sub>89</sub> Ac	α	10 діб
Йод	<sup>131</sup> <sub>53</sub> I	β <sup>-</sup> , γ	8 діб
Ірідій	<sup>192</sup> <sub>77</sub> Ir	β <sup>-</sup> , γ	75 діб
Кобальт	<sup>60</sup> <sub>27</sub> Co	β <sup>-</sup> , γ	5,3 року
Магній	<sup>27</sup> <sub>12</sub> Mg	β <sup>-</sup>	10 хв
Радій	<sup>226</sup> <sub>88</sub> Ra	α	10 <sup>-3</sup> с
Радій	<sup>226</sup> <sub>88</sub> Ra	α, γ	1,62 · 10 <sup>3</sup> років
Радон	<sup>222</sup> <sub>86</sub> Rn	α	3,8 доби
Стронцій	<sup>90</sup> <sub>38</sub> Sr	β <sup>-</sup>	28 років
Торій	<sup>229</sup> <sub>90</sub> Th	α, γ	7 · 10 <sup>3</sup> років
Уран	<sup>238</sup> <sub>92</sub> U	α, γ	4,5 · 10 <sup>9</sup> років
Фосфор	<sup>32</sup> <sub>15</sub> P	β <sup>-</sup>	14,3 доби
Натрій	<sup>22</sup> <sub>11</sub> Na	γ	2,6 року

## Періодична система хімічних елементів Д.І. Менделєєва

7	6					5				4			3		2		1	Період	
францій 87 Fr (223)	аурум золото 79 Au 196,97	цезій 55 Cs 132,91	барій 86 Ba 137,33	кадмій 48 Cd 112,41	аргентум срібло 47 Ag 107,87	рубідій 37 Rb 85,467	купрум мідь 29 Cu 63,55	калій 19 K 39,100	натрій 11 Na 22,997	літій 3 Li 6,940	водень гідроген 1H 1,0080							I	
радій 88 Ra 226,03	ртуть 80 Hg 200,59	барій 56 Ba 137,33	кадмій 48 Cd 112,41	кадмій 48 Cd 112,41	стронцій 38 Sr 87,62	стронцій 38 Sr 87,62	цинк 30 Zn 65,38	кальцій 20 Ca 40,08	магній 12 Mg 24,32	берилій 4 Be 9,013								II	
актиній 89 Ac** (227)	талій 81 Tl 204,37	лантан 57 La* 138,91	лантан 57 La* 138,91	індій 49 In 114,82	індій 49 In 114,82	ітрій 39 Y 88,906	галій 31 Ga 69,74	скандій 21 Sc 44,96	алюміній 13 Al 26,98	бор 5 B 10,82								III	
курчаповий 104 Ku (260)	свинцев 82 Pb 207,20	гафній 72 Hf 178,49	гафній 72 Hf 178,49	станум олово 50 Sn 118,69	цирконій 40 Zr 91,22	цирконій 40 Zr 91,22	германій 32 Ge 72,59	титан 22 Ti 47,90	силіцій кремній 14 Si 28,06	вуглець 6 C 12,011								IV	
дждолотій 105 Jt (260)	плонбум бісмут 83 Bi 208,98	тантал 73 Ta 180,95	тантал 73 Ta 180,95	стібій сурма 51 Sb 121,75	ніобій 41 Nb 92,906	ніобій 41 Nb 92,906	арсен миш'як 33 As 74,922	ванадій 23 V 50,95	фосфор 15 P 30,975	нітроген азот 7 N 14,008								V	
Резерфордій 106 Rf (263)	полоній 84 Po (209)	вольфрам 74 W 183,85	вольфрам 74 W 183,85	телур 52 Te 127,60	молібден 42 Mo 95,94	молібден 42 Mo 95,94	селен 34 Se 78,96	хром 24 Cr 52,01	сульфур сірка 16 S 32,066	окисень 8 O 16,0000								VI	
	астат 85 At (210)	рений 75 Re 186,21	рений 75 Re 186,21	йод 53 I 126,90	технецій 43 Tc 98,906	технецій 43 Tc 98,906	бром 35 Br 79,904	марганець 25 Mn 54,94	хлор фтор 17 Cl 35,457	флуор 9 F 19,00								VII	
	радон 86 Rn (222)	осмій 76 Os 190,2	осмій 76 Os 190,2	ксенон 54 Xe 131,30	рутений 44 Ru 101,07	рутений 44 Ru 101,07	криптон 36 Kr 83,80	ферум залізо 26 Fe 55,85	аргон 18 Ar 39,944	неон 10 Ne 20,183	гелій 2 He 4,004							VIII	
		ірідій 77 Ir 192,22	ірідій 77 Ir 192,22	родій 45 Rh 102,906	родій 45 Rh 102,906	родій 45 Rh 102,906	кобальт 27 Co 58,933												
		платина 78 Pt 195,09	платина 78 Pt 195,09	паладій 46 Pd 106,40	паладій 46 Pd 106,40	паладій 46 Pd 106,40	нікель 28 Ni 58,71												

\* — лантанойди; \*\* — актиноїди.



---

---

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

---

---

1. *Кузнцова О. Я.* Фізика: навч. посібник / *О. Я. Кузнцова, Н. П. Муранова.* — К. : Книжкове вид-во НАУ, 2007. — 316 с.
2. *Элементарный учебник физики: уч. пособие в 3-х т.* / под ред. Г. С. Ландсберга. Т. I. Механика. Теплота. Молекулярная физика. — М. : 1972. — 656 с.
3. *Элементарный учебник физики : уч. пособие в 3-х т.* / под ред. Г. С. Ландсберга. Т. II. Электричество и магнетизм. — 10-е изд., перераб. — М. : Наука, 1985. — 480 с.
4. *Элементарный учебник физики: уч. пособие в 3-х т.* / под ред. Г. С. Ландсберга. Т. III. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. — 10-е изд., перераб. — М. : Наука, 1986. — 656 с.
5. *Кабардин О. Ф.* Физика: справочные материалы / *О. Ф. Кабардин.* — М. : Просвещение, 1990. — 165 с.
6. *Савченко Н. Е.* Ошибки на вступительных экзаменах по физике: справ. пособие / *Н. Е. Савченко.* — Минск : Вышэйш. шк., 1992. — 368 с.
7. *Третьяков І. Г.* Практичні заняття: навч. посібник / *І. Г. Третьяков, Н. П. Муранова.* — К. : Книжкове вид-во НАУ, 2006. — 310 с.



<b>Розділ 3. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ</b> . . . . .	<b>3</b>
<b><i>Тема Е-1. Взаємодія нерухомих зарядів. Закон Кулона</i></b> . . . . .	<b>4</b>
Е-1.1. Теоретичні відомості. . . . .	4
Е-1.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	6
Е-1.3. Висновки з теми . . . . .	8
Е-1.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	9
Е-1.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	16
Е-1.6. Задачі для самостійного розв'язання. . . . .	17
<b><i>Тема Е-2. Електричне поле.</i></b> . . . . .	<b>19</b>
Е-2.1. Теоретичні відомості. . . . .	19
Е-2.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	23
Е-2.3. Висновки з теми . . . . .	25
Е-2.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	26
Е-2.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	30
Е-2.6. Задачі для самостійного розв'язання. . . . .	30
<b><i>Тема Е-3. Робота електричного поля. Різниця потенціалів</i></b> . . . . .	<b>32</b>
Е-3.1. Теоретичні відомості. . . . .	32
Е-3.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	35
Е-3.3. Висновки з теми . . . . .	37
Е-3.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	37
Е-3.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	40
Е-3.6. Задачі для самостійного розв'язання. . . . .	41
<b><i>Тема Е-4. Речовина в електричному полі. Ємність.</i></b> <b><i>Конденсатори</i></b> . . . . .	<b>44</b>
Е-4.1. Теоретичні відомості. . . . .	44
Е-4.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	50
Е-4.3. Висновки з теми . . . . .	53
Е-4.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	53
Е-4.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	60
Е-4.6. Задачі для самостійного розв'язання. . . . .	61



<b>Тема Е-5. Закони постійного струму</b> . . . . .	63
Е-5.1. Теоретичні відомості . . . . .	63
Е-5.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	70
Е-5.3. Висновки з теми . . . . .	75
Е-5.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	75
Е-5.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	81
Е-5.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	83
<b>Тема Е-6. Робота електричного струму. Теплова та хімічна дії електричного струму.</b> . . . . .	85
Е-6.1. Теоретичні відомості . . . . .	85
Е-6.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	87
Е-6.3. Висновки з теми . . . . .	89
Е-6.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	89
Е-6.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	99
Е-6.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	100
<b>Тема Е-7. Магнітне поле. Дія магнітного поля на провідник із струмом та рухомий заряд.</b> . . . . .	102
Е-7.1. Теоретичні відомості . . . . .	102
Е-7.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	109
Е-7.3. Висновки з теми . . . . .	113
Е-7.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	113
Е-7.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	122
Е-7.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	123
<b>Тема Е-8. Явище електромагнітної індукції</b> . . . . .	126
Е-7.1. Теоретичні відомості . . . . .	126
Е-7.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	128
Е-7.3. Висновки з теми . . . . .	131
Е-7.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	131
Е-7.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	141
Е-7.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	142
<b>Розділ 4. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ.</b> . . . . .	147
<b>Тема К-Х-1. Вільні механічні коливання</b> . . . . .	148
К-Х-1.1. Теоретичні відомості . . . . .	148
К-Х-1.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	152
К-Х-1.3. Висновки з теми . . . . .	156
К-Х-1.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	156
К-Х-1.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	164
К-Х-1.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	165

<b>Тема К-Х-2. Електромагнітні коливання</b> . . . . .	169
К-Х-2.1. Теоретичні відомості . . . . .	169
К-Х-2.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	175
К-Х-2.3. Висновки з теми . . . . .	179
К-Х-2.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	180
К-Х-2.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	187
К-Х-2.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	189
<b>Тема К-Х-3. Механічні та електромагнітні хвилі</b> . . . . .	193
К-Х-3.1. Теоретичні відомості . . . . .	193
К-Х-3.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	196
К-Х-3.3. Висновки з теми . . . . .	198
К-Х-3.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	199
К-Х-3.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	206
К-Х-3.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	208
<b>Розділ 5. ОПТИКА</b> . . . . .	211
<b>Тема О-1. Відбиття і заломлення світла</b> . . . . .	212
О-1.1. Теоретичні відомості . . . . .	212
О-1.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	215
О-1.3. Висновки з теми . . . . .	217
О-1.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	218
О-1.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	223
О-1.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	224
<b>Тема О-2. Побудова зображення в лінзі</b> . . . . .	226
О-2.1. Теоретичні відомості . . . . .	226
О-2.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	227
О-2.3. Висновки з теми . . . . .	230
О-2.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	230
О-2.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	236
О-2.6. Задачі для самостійного розв'язання . . . . .	237
<b>Розділ 6. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ. КВАНТОВА, АТОМНА, ЯДЕРНА ФІЗИКА</b> . . . . .	239
<b>Тема Я-1. Елементи теорії</b> . . . . .	240
Я-1.1. Теоретичні відомості . . . . .	240
Я-1.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	241
Я-1.3. Висновки з теми . . . . .	242

Я-1.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	243
Я-1.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	246
Я-1.6. Задачі для самостійного розв'язання. . . . .	247
<b>Тема Я-2. Квантова фізика . . . . .</b>	<b>249</b>
Я-2.1. Теоретичні відомості . . . . .	249
Я-2.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	250
Я-2.3. Висновки з теми. . . . .	252
Я-2.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	253
Я-2.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	257
Я-2.6. Задачі для самостійного розв'язання. . . . .	258
<b>Тема Я-3. Елементи атомної і ядерної фізики . . . . .</b>	<b>260</b>
Я-3.1. Теоретичні відомості . . . . .	260
Я-3.2. Завдання для поточного тестування . . . . .	263
Я-3.3. Висновки з теми. . . . .	264
Я-3.4. Приклади розв'язання задач . . . . .	265
Я-3.5. Задачі для аудиторного розв'язання . . . . .	271
Я-3.6. Задачі для самостійного розв'язання. . . . .	272
<b>ДОДАТКИ . . . . .</b>	<b>274</b>
<b>Список літератури . . . . .</b>	<b>287</b>

*Навчальне видання*

КУЗНСЦОВА Олена Яківна  
МУРАНОВА Наталія Петрівна

# Ф І З И К А

Навчальний посібник

Частина 2

Редактор *Л. Бондаренко*  
Коректор *Л. Романова*  
Художник обкладинки *Т. Зябліцева*  
Верстка *А. Гедзюк*

Підп. до друку 16.06.09. Формат 60×84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 16,97. Обл.-вид. арк. 18,25.  
Тираж 500 пр. Замовлення № 153-1.

Видавництво Національного авіаційного університету «НАУ-друк»  
03680, Київ-58, просп. Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002