



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА  
СПОРТУ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

## **КОНЦЕПЦІЇ СУЧАСНОГО ПРИРОДОЗНАВСТВА**

методичні вказівки для підготовки до практичних занять  
з дисципліни.  
Частина II

Харків

## Зміст

1. Вступ.....	3
2. Програма для студентів 1 курсу .....	5
3. Вказівки до вивчення окремих розділів фізики з прикладами розв'язання задач.....	8
<b>ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ</b>	
3.1. Закони постійного струму .....	8
3.2. Електрорушійний струм у металах, рідинах і газах .....	8
3.3. Робота і потужність струму.....	8
<b>ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ</b>	
3.4. Закон Біо-Савара-Лапласа .....	21
3.5. Електромагнітна індукція.....	21
<b>ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ</b>	
3.6. Змінний струм.....	28
3.7. Електромагнітні коливання і хвилі .....	28
3.8. Хвильова оптика.....	32
3.9 Квантові властивості випромінювання.....	39
3.10 Елементи квантової механіки та атомної фізики.....	46
4. Література .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## 1. ВСТУП

Метою практичних занять є удосконалення знань про закони фізики і застосування їх до розв'язання конкретних задач. Розв'язання конкретних фізичних задач є необхідною практичною основою при вивченні курсу фізики, допомагає розвивати аналітичне мислення, напрацьовує необхідні навички та загальні підходи, що матимуть своє значення і під час розв'язання більш складних задач при вивченні технічних і спеціальних дисциплін.

При підготовці до практичних занять необхідно добре засвоїти теоретичний матеріал за темою практичного заняття, користуючись конспектом лекцій, підручниками і навчальними посібниками, рекомендованими викладачем, розв'язати задані на дом задачі. При розв'язанні задач виникає найбільше труднощів, бо необхідні знання теоретичного матеріалу, спеціальних методів для визначених груп задач.

Перед розв'язанням конкретних задач необхідно спочатку зрозуміти умови задачі, виявити основні фізичні процеси, що мають місце в цьому випадку, з'ясувати, яким фізичним законам підкорюються ці процеси, вивчити теоретичні питання, пов'язані з цими процесами і вибрати закони, застосування яких може привести до найкоротшого шляху розв'язання задачі.

Розв'язання задач треба супроводити рисунками, схемами, які пояснюють суть задачі. Всі дані, наведені в умові задачі, необхідно записати в стандартній формі у вигляді  $a \cdot 10^n$ , де  $1 \leq a \leq 10$ . Наприклад сила  $F = 8400 \text{ Н} = 8,4 \cdot 10^3 \text{ Н}$ . Всі величини треба записати з однаковим ступенем точності. Задачу розв'язувати в загальному вигляді. Спочатку на підставі законів скласти рівняння, які зв'язують фізичні величини, що характеризують явище. Потім розв'язати систему рівнянь відносно величин, які треба визначити в цій задачі. Може бути, що частина величин, які входять в рівняння, відсутні в умові задачі, ці величини або скорочуються, або наведені в таблицях. При складанні рівнянь, що описують фізичні процеси і явища, треба знати величини, які входять в рівняння і є скалярними, а які векторними. Для повного визначення векторних величин необхідно враховувати напрямок та їх чисельні значення.

Для спрощення аналізу фізичних процесів досить часто доводиться розкласти вектор (швидкість, електричної та магнітної напруженості та інші) на складові за двома взаємно перпендикулярними напрямками. Вибір напрямку для складових вектора диктується умовою задачі, однак в загальному вигляді він може бути довільним.

Для розв'язання складної системи рівнянь треба щоб кількість рівнянь дорівнювала кількості невідомих величин.

Одержавши розрахункову формулу в загальному вигляді необхідно провести чисельні розрахунки. Всі фізичні величини, які входять в розрахункову формулу, необхідно підставляти в одиницях міжнародної системи одиниць СІ. Точність розрахунків визначається точністю величин в умові задачі. Треба перевірити одиниці одержаних величин за розрахунковими формулами.

Розв'язання задач необхідно супроводжувати необхідними обґрунтуваннями і поясненнями.

Після одержання відповіді порівняти її з відповіддю у збірнику задач. Якщо відповідь не співпадає, спробуйте ще раз вивчити відповідний теоретичний матеріал, звернувши увагу на тонкощі, і ще раз спробувати розв'язати задачу.

При розгляді наведених прикладів розв'язання задачі треба звернути увагу як на фізичний зміст розв'язання так і на послідовність розв'язання, написання пояснень.

## 2. ПРОГРАМА З ФІЗИКИ ДЛЯ СТУДЕНТІВ 1 КУРСУ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВОГО ІНСТИТУТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА БІЗНЕСУ

### Змістовий модуль 5

#### Тема 1.5. Постійний електричний струм

Постійний електричний струм, сила струму. Вектор густини струму. Електрорушійна сила, напруга, різниця потенціалів. Закон Ома. Опір провідників. Закон Ома в диференційній формі. Робота та потужність електричного струму. Закон Джоуля-Ленца. Коефіцієнт корисної дії джерела струму. Закон Джоуля-Ленца в диференційній формі. Правила Кірхгофа для розгалужених електричних ланцюгів. Струм у металах, рідинах і газах. Електроліз. \* Закон Фарадея. \* Електронна теорія провідності.\* Робота виходу електронів з металу. Термоелектронна емісія.\*

Література: [1] С.93-99, [2] С.7-16, [3 т.2], [4 ч.2].

### Змістовий модуль 6

#### Тема 2.1. Електромагнетизм

Магнітне поле в вакуумі. Магнітний момент витка зі струмом. Вектор магнітної індукції. Обертальний момент, що діє на контур зі струмом. Лінії індукції. Магнітний потік. Закон Біо-Савара-Лапласа. Магнітне поле прямолінійного та колового струмів. Магнітне поле рухомого заряду.\* Сила, що діє на провідник зі струмом в магнітному полі. Закон Ампера. Взаємодія рівнобіжних струмів. Магнітна стала. Напруженість магнітного поля. Сила, що діє на рухомий заряд у магнітному полі. Сила Лоренца. Рух заряджених частинок в однорідному магнітному полі. Магнітне поле соленоїда та тороїда.

Пояснення явища електромагнітної індукції за допомогою дослідів Фарадея. Закон Фарадея та закон Ленца. Природа виникнення електрорушійної сили індукції. Обертання рамки у магнітному полі. Вихрове електричне поле. Явище самоіндукції. Індуктивність. Явище взаємоіндукції. Вихрові струми. Струми Фуко.\* Енергія магнітного поля.

Основи теорії Максвелла електромагнітного поля. Струм зміщення. Закон повного струму. Рівняння Максвелла для електромагнітного поля в інтегральній формі. Відносний характер електричної та магнітної складових електромагнітного поля.

Література: [1] С.100-126, [2] С.17-54, [3 т.2], [4 ч.2].

## Змістовий модуль 7

### Тема 2.2. Електромагнітні коливання і хвилі

Диференціальне рівняння електромагнітних коливань. Власні незгасаючі коливання в електричному коливальному контурі. Згасаючі електромагнітні коливання. Вимушені електромагнітні коливання. Амплітуда і фаза вимушених коливань. Резонанс.

Електромагнітні хвилі. Основні властивості електромагнітних хвиль. Енергія електромагнітних хвиль. Вектор Умова-Пойтінга. Шкала електромагнітних хвиль.\* Випромінювання диполя.\*

Література: [1] С.127-159, [2] С.55-100, [3 т.2], [4 ч.2].

## Змістовий модуль 8

### Тема 2.3. Хвильова оптика

Основні закони оптики. Повне відбиття. Абсолютний та відносний показники заломлення світла. Розвиток уявлень про природу світла. Інтерференція світла. Когерентність і монохроматичність світлових хвиль. Методи спостереження інтерференції світла. Умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини. Використання інтерференції світла. Розрахунок інтерференційної картини від двох когерентних джерел. Інтерференція в тонких плівках.\*

Дифракція світла. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Прямолінійне розповсюдження світла. Дифракція Фраунгофера для однієї щілини та на дифракційних решітках. Дифракція на просторових решітках. Формула Вульфа-Бреггів.

Дисперсія світла\*. Поглинання світла\*. Закон Бугера-Ламберта\*

Поляризація світла. Природне та поляризоване світло. Закон Малюса. Поляризація світла при відбиванні і заломленні на границі двох діелектриків. Закон Брюстера. Подвійне променезаломлення. Обертання площини поляризації. Оптично активна речовина.

Література: [1] С.160-182, [2] С.101-129, [3 т.3], [4 ч.2].

## Змістовий модуль 9

### Тема 2.4. Квантові властивості світла

Теплове випромінювання та його характеристики. Абсолютно чорне тіло. Закон Кірхгофа. Розподіл енергії у спектрі абсолютно чорного тіла. Закон Стефана-Больцмана. Закон зміщення Віна. Квантова гіпотеза і формула Планка.

Зовнішній фотоефект і його основні закони. Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту. Енергія, маса і імпульс фотону. Подвійна корпускулярно-хвильова природа світла.

Література: [1] С.183-195, [2] С.130-148, [3 т.3], [4 ч.2].

### Змістовий модуль 10

#### Тема 2.5. Елементи атомної фізики і квантової механіки

Формула де-Бройля. Дослідне обґрунтування корпускулярно-хвильового дуалізму властивостей речовини. Співвідношення невизначеностей як прояв корпускулярно-хвильового дуалізму властивостей матерії. Обмеженість механічного детермінізму. Хвильова функція та її статистичний зміст. Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів. Частинка в прямокутній потенціальній ямі. Принцип відповідності Бора. Тунельний ефект.

Розвиток уявлень про будову атома. Досліди Резерфорда. Постулати Бора. Атом водню в квантовій механіці. Дослід Штерна і Герлаха. Спін електрона. Принцип Паулі. Розподіл електронів в атомі за станами. Поглинання, спонтанне та вимушене випромінювання світла. Оптичні квантові генератори (лазери). Поняття про енергетичні рівні молекул\*. Спектр молекул.\* Рентгеновські промені.\* Люменісценція.\*

Література: [1] С.196-210, [2] С.149-173, [3 т.3], [4 ч.2].

### Змістовий модуль 11

#### Тема 2.6. Елементи фізики атомного ядра і елементарних частинок

Склад ядра. Нуклони. Заряд, розмір, маса атомного ядра. Енергія зв'язку нуклонів в ядрі, дефект маси. Взаємодія нуклонів і поняття про властивості ядерних сил. Явище радіоактивності. Закон радіоактивного розпаду. Закономірності  $\alpha$ - та  $\beta$ -розпаду. Ядерні реакції. Елементарні частинки, їх класифікація та взаємне перетворення. Чотири типи фундаментальних взаємодій: сильні, слабкі, електромагнітні та гравітаційні.

Література: [1] С.211-227, [2] С.174-181, [3 т.3], [4 ч.2].

\*- питання, що винесені на самостійне вивчення.

### 3. ВКАЗІВКИ ДО ВИВЧЕННЯ ОКРЕМИХ РОЗДІЛІВ ФІЗИКИ З ПРИКЛАДАМИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

#### ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

##### 3.1. ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

##### 3.2. ЕЛЕКТРОРУШІЙНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ, РІДИНАХ І ГАЗАХ

##### 3.3. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ

###### 3.1.1. Питання, винесені на практичне заняття:

1. Постійний електричний струм, сила струму, густина струму.
2. Закони постійного струму.
3. Електрорушійна сила, напруга, різниця потенціалів, опір провідників.
4. Правила Кірхгофа для розгалужених електричних ланцюгів.

###### 3.1.2. Література: [1] С.93-99, [2] С.7-16, [3], [4 ч.2], [5].

###### 3.1.3. При вивченні цієї теми слід знати та розуміти:

Зв'язок між кількістю електрики  $q$ , силою струму  $I$  і часом  $t$ :

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

Густина струму

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

де  $S$  — переріз провідника.

Опір провідників довжиною  $l$  з постійним перерізом  $S$ :

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

де  $\rho$  — питомий опір речовини.

Залежність питомого опору від температури  $t$ :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

де  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору.

Закон Ома для ділянки кола



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

і для повного кола

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

де  $U$  — напруга на кінцях провідника;  $\varepsilon$  — ЕРС джерела струму, а  $r$  — його внутрішній опір.

Опір ділянки кола при послідовному з'єднанні провідників

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

При паралельному з'єднанні провідників

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

Правила Кірхгофа: для суми сил струмів у вузлі  $\sum_{i=1}^n I_i = 0$ ; для суми добутків сил струмів на опір ділянок і суми ЕРС при обводі по контуру  $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{k=1}^m I_k R_k$ . Робота, що виконується електричними силами на ділянці кола, кінці якої мають різницю потенціалів  $U$ , при струмі  $I$  протягом часу  $t$ :

$$A = UIt .$$

Потужність струму:

$$N = UI$$

Кількість теплоти, що виділяється на ділянці кола з опором  $R$ , по якому проходить струм  $I$ , за час  $t$ :

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

### 3.1.4. Після закінчення вивчення теми слід знати:

1. Визначення постійного електричного струму, току провідності, сили струму, густини струму.
2. Умови виникнення та існування електричного струму.
3. Що таке сторонні сили.
4. Визначення електрорушійної сили та напруги.
5. Закон Ома. Наслідки із узагальненого закону Ома.
6. Опір провідників.
7. Послідовне та паралельне з'єднання провідників.

8. Правила Кірхгофа.
9. Робота та потужність струму.
10. Закон Джоуля-Ленца.
11. Електричний струм у металах та електролітах.

### Наслідки із узагальненого закону Ома

1	Джерела струму немає: $\varepsilon_{12} = 0$	$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$	Закон Ома для однорідної ділянки
2	Ланцюг замкнений: $\varphi_1 = \varphi_2$	$I = \frac{\varepsilon}{R},$ R – опір усього ланцюга	Закон Ома для замкненого кола
3	Ланцюг розімкнений: $I = 0$	$\varepsilon_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$	ЕРС у розімкнутому колі дорівнює різниці потенціалів на його кінцях

#### 3.1.5. Приклади розв'язання задач

**Задача 1.1.** Гальванічний елемент був замкнений опором  $3,75 \text{ Ом}$  і при цьому в колі встановилася сила струму  $0,5 \text{ А}$ . Коли зовнішній опір кола збільшився до  $4,75 \text{ Ом}$ , то сила струму зменшилася до  $0,4 \text{ А}$ . Визначити електрорушійну силу і внутрішній опір елемента.

<p><b>Дано:</b>  <math>R=3,75 \text{ Ом}</math>  <math>I=0,5 \text{ А}</math>  <math>R_1=4,75 \text{ Ом}</math>  <math>I_1=0,4 \text{ А}</math></p>	
<p><b>Знайти:</b> <math>\varepsilon, r</math></p>	

#### Розв'язання:

Позначивши силу струму і зовнішній опір при першому замиканні кола через  $I$  і  $R$ , а при другому — через  $I_1$  і  $R_1$ , можемо за законом Ома записати:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad \text{і} \quad I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1+r}.$$

Розділивши перше рівняння на друге, одержимо:

$$\frac{I}{I_1} = \frac{R_1+r}{R+r}.$$

Звідси внутрішній опір

$$r = \frac{I_1 R_1 - IR}{I - I_1} = 0,25 \text{ Ом}.$$

Електрорушійна сила джерела струму

$$\varepsilon = I(R + r) = 2 B .$$

**Відповідь:**  $\varepsilon = 2 \text{ В}$ ;  $r = 0,25 \text{ Ом}$ .

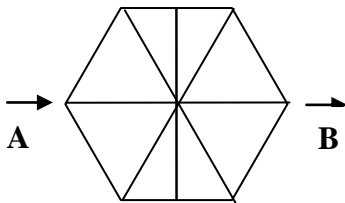
**Задача 1.2.** Знайти опір  $R$  розгалуження провідників між точками  $A$  і  $B$  (рис. 1а), якщо кожний з провідників, що входять до розгалуження, має опір  $r$ .

**Дано:**  
 $r$   

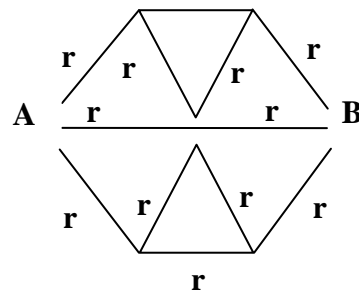

---

**Знайти:**  $R$

**Розв'язання:**



**Рисунок 1а**



**Рисунок 1б**

Дане розгалуження можна розглядати як складене з трьох окремих віток (рис. 1.1, б).

Опір центральної частини верхньої вітки  $R_1$  обчислюємо як опір паралельно з'єднаних провідників:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{r} + \frac{1}{2r} = \frac{3}{2r}, \text{ звідки } R_1 = \frac{2}{3}r .$$

Повний опір верхньої вітки

$$2r + \frac{2}{3}r = \frac{8}{3}r .$$

Такий же опір має і нижня вітка. Центральна вітка має опір  $2r$ .

Всі розглянуті вітки з'єднані паралельно, тому загальний опір розгалуження знаходимо так:

$$\frac{1}{R} = 2 \frac{1}{(8/3)r} + \frac{1}{2r} = \frac{10}{8r}, \text{ звідки } R = 0,8r .$$

**Відповідь:**  $R = 0,8r$ .

**Задача 1.3.** Ізольований телеграфний дріт з постійним опором по всій довжині його, що має заземлений металевий кожух, з'єднує дві місцевості  $A$  і  $B$ , відстань між якими  $l$ . Дріт пошкоджено в невідомому місці  $C$ , внаслідок чого стався пробій ізоляції дроту. Яким чином, маючи в розпорядженні батарею акумуляторів і мікроамперметр, визначити відстань  $AC$ ? Опір металевого кожуха вважати постійним вдовж всієї довжини.

**Дано:**  
 $R$   
 $r$   
 $l$   
 $U$

---

**Знайти:**  $x$

**Розв'язання:**

Щоб визначити відстань  $AC = x$ , в пункті  $A$  включаємо послідовно батарею акумуляторів і мікроамперметр між телеграфним проводом і кожухом і визначаємо силу струму  $I_A$ . Це саме повторюємо в пункті  $B$  і знаходимо силу струму  $I_B$ . Тоді за законом Ома можна записати два рівняння:  $I_B = \frac{U}{(l-x)R + (l-x)r}$  та  $I_A = \frac{U}{xR + xr}$ ,

де  $U$  — напруга акумуляторів (припускаємо, що нехтуємо внутрішнім опором акумулятора),  $R$  і  $r$  — опір одиниці довжини телеграфного проводу і кожуха. З цих рівнянь

$$x = \frac{I_B}{I_A + I_B} l.$$

**Відповідь:**  $x = \frac{I_B}{I_A + I_B} l.$

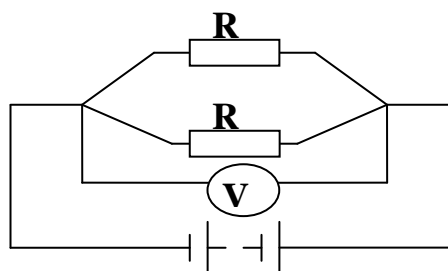
**Задача 1.4.** Батарея підключена до зовнішнього опору, що складається з двох паралельно з'єднаних опорів  $R = 4 \text{ Ом}$  кожний. Вольтметр показує при цьому  $U_1 = 6 \text{ В}$  (рис. 2). Якщо один з опорів виключити, то вольтметр покаже  $U_2 = 8 \text{ В}$ . Визначити електрорушійну силу і внутрішній опір батареї. Струм, що йде через вольтметр, не враховувати.

**Дано:**  
 $R=4 \text{ Ом}$   
 $U_1=6 \text{ В}$   
 $U_2=8 \text{ В}$

---

**Знайти:**  $\varepsilon, r$

**Розв'язання:**



**Рисунок 2**

За законом Ома в першому випадку маємо:

$$U_1 = I_1 \cdot R_1,$$

де  $U_1$ ,  $I_1$  і  $R_1$  — відповідно показання вольтметра, струм у колі і опір розгалуження, що складається з двох паралельно з'єднаних провідників. Для другого випадку  $U_2 = I_2 \cdot R$ .

Запишемо вираз для ЕРС батареї в першому і другому випадках:

$$\varepsilon = U_1 + \frac{2U_1}{R} \cdot r \quad \text{і} \quad \varepsilon = U_2 + \frac{U_2}{R} \cdot r.$$

Оскільки ЕРС є величина стала, то, прирівнявши праві частини рівностей, дістанемо:

$$U_1 + \frac{2U_1}{R} \cdot r = U_2 + \frac{U_2}{R} \cdot r,$$

Звідки

$$r = \frac{U_2 - U_1}{2U_1 - U_2} \cdot R = 2 \text{ Ом}; \quad \text{тоді} \quad \varepsilon = 6 \text{ В} + \frac{12 \text{ В}}{4 \text{ Ом}} \cdot 2 \text{ Ом} = 12 \text{ В}.$$

**Відповідь:**  $r=2$  Ом;  $\varepsilon=12$  В.

**Задача 1.5.** В коло, що складається з акумулятора і опору  $R = 10 \text{ Ом}$ , вмикають вольтметр спочатку послідовно, а потім паралельно  $R$ . Обидва показання вольтметра однакові. Опір вольтметра  $R_v = 1000 \text{ Ом}$ . Який внутрішній опір акумулятора?

<p><b>Дано:</b>  <math>R=10 \text{ Ом}</math>  <math>R_v=1000 \text{ Ом}</math></p> <hr/> <p><b>Знайти:</b> <math>r</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>Розв'язання:</b></p> <p>Оскільки показання вольтметра однакові, то спад напруги на вольтметрі в першому випадку (послідовне вмикання) дорівнює спаду напруги на вольтметрі і паралельно ввімкнутому опору в другому випадку.</p> <p>Обчислимо силу струму <math>I</math> і спад напруги на вольтметрі в обох випадках. Нехай <math>\varepsilon</math> — ЕРС акумулятора і <math>r</math> — його внутрішній опір. Тоді при послідовному вмиканні вольтметра струм у колі</p>
--	---

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

і спад напруги на вольтметрі

$$U_1 = \frac{\varepsilon}{R + R_a + r} \cdot R_a.$$

При паралельному вмиканні вольтметра

$$I = \frac{\varepsilon}{\frac{R \cdot R_a}{R + R_a} + r};$$

спад напруги на вольтметрі

$$U_2 = \frac{\varepsilon}{R \cdot R_a + R \cdot r + R_a \cdot r} \cdot R \cdot R_a.$$

За умовою задачі  $U_1 = U_2$ , тобто

$$\frac{\varepsilon \cdot R_a}{R + R_a + r} = \frac{\varepsilon \cdot R \cdot R_a}{R \cdot R_a + R \cdot r + R_a \cdot r},$$

звідки

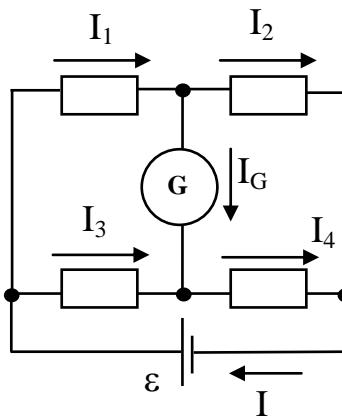
$$R^2 + R \cdot R_g + R \cdot r = R \cdot R_g + R \cdot r + R_g \cdot r \quad \text{і} \quad r = \frac{R^2}{R_g} = 0,1 \text{ Ом}.$$

**Відповідь:**  $r=0,1$  Ом.

**Задача 1.6.** На рисунку 3  $\varepsilon = 2$  В,  $R_1 = 60$  Ом,  $R_2 = 40$  Ом,  $R_3 = R_4 = 20$  Ом,  $R_G = 100$  Ом. Визначити силу струму  $I_G$ , який тече через гальванометр.

<p><b>Дано:</b>  <math>\varepsilon = 2</math> В  <math>R_1 = 60</math> Ом  <math>R_2 = 40</math> Ом  <math>R_3 = R_4 = 20</math> Ом  <math>R_G = 100</math> Ом</p> <hr/> <p><b>Знайти:</b> <math>I_G</math></p>
---

**Розв'язання:**



**Рисунок 3**

Скористаємося першим правилом Кірхгофа та запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} I = I_1 + I_3 \\ I_1 = I_2 + I_G \\ I_2 + I_4 = I \\ I_3 + I_G = I_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_2 R_2 = \varepsilon \\ I_3 R_3 + I_4 R_4 = \varepsilon \\ I_1 R_1 + I_G R_G + I_4 R_4 = \varepsilon \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 6I_1 + 4I_2 = 0,2 \\ 2I_3 + 2I_4 = 0,2 \\ 6I_1 + 10I_G + 2I_4 = 0,2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 6I_1 + 4(I_1 - I_G) = 0,2 \\ 2(I_4 - I_G) + 2I_4 = 0,2 \\ 6I_1 + 10I_G + 2I_4 = 0,2 \end{cases}$$

$$10I_1 - 4I_G = 0,2 \Rightarrow I_1 = \frac{0,2 + 4I_G}{10} ; 4I_4 - 2I_G = 0,2 \Rightarrow I_4 = \frac{0,2 + 2I_G}{4} ; 6I_1 + 10I_G + 2I_4 = 0,2 ;$$

$$6\left(\frac{0,2 + 4I_G}{10}\right) + 10I_G + 2\left(\frac{0,2 + 2I_G}{4}\right) = 0,2 ;$$

$$1,2 + 24I_G + 100I_G + 1 + 10I_G = 2 ;$$

$$134I_G = -0,2 ;$$

$I_{G=} = -1,49 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ . Знак «-» означає, що струм тече у протилежному напрямку, відносно обраному спочатку.

**Відповідь:**  $I_G = -1,49 \text{ mA}$ .

### 3.2.1. Електричний струм у металах, рідинах і газах

**Задача 2.1.** Сила електричного струму в металевому провіднику з поперечним перерізом  $S = 0,5 \text{ см}^2$  дорівнює  $I = 3 \text{ A}$ . Визначити середню швидкість  $v$  напрямленого руху електронів вздовж провідника, якщо  $1 \text{ см}^3$  металу містить  $n = 4 \cdot 10^{22}$  вільних електронів.

**Дано:** СІ

$$S = 0,5 \text{ см}^2 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$I = 3 \text{ A}$$

$$n = 4 \cdot 10^{22}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

**Знайти:**  $v$

**Розв'язання:**

Виділимо ділянку провідника, довжина якої чисельно дорівнює середній швидкості напрямленого руху електронів. Об'єм цієї частини провідника становить  $vS$ . Кількість вільних електронів в цьому об'ємі  $n v S$ , їх заряд  $q = n v S e$ . Всі вільні електрони через  $1 \text{ с}$  потраплятимуть з об'єму  $A$  в об'єм  $B$ ,

пройшовши через поперечний переріз провідника. Отже, сила струму в колі буде

$$I = \frac{q}{t} = n\nu Se,$$

звідки  $\nu = \frac{I}{nSe}$ ,  $\nu = \frac{3A}{4 \cdot 10^{28} \cdot 1/м^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} м^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} Кл} \approx 0,94 \cdot 10^{-5} м/с.$

**Відповідь:**  $\nu = 0,94 \cdot 10^{-5} м/с.$

**Задача 2.2.** З метою вимірювання температури всередині печі використовують нікель-ніхромову термопару, що дає електрорушійну силу  $0,5 \cdot 10^6 В$  на  $1^\circ C$ . Один спай термопару вставлено до печі, другий — у воду при температурі  $15^\circ C$ . Гальванометр з внутрішнім опором  $2000 Ом$ , підключений послідовно до термопару, показав струм  $25 \cdot 10^{-8} А$ . Яка температура печі?

**Дано:**

$$\varepsilon = 0,5 \cdot 10^6 В$$

$$t = 15^\circ C$$

$$R = 2000 Ом$$

$$I = 25 \cdot 10^{-8} А$$

**Знайти:**  $x$

**Розв'язання:**

Різниця температур печі і води становить  $(x - 15^\circ)$ , де  $x$  — температура всередині печі. Для різниці потенціалів між спаєм термопару всередині печі і спаєм у воді можна написати

$$U = 0,5 \cdot 10^{-6} (x - 15^\circ) В.$$

Нехтуючи опором термопару і підвідних проводів, можна визначити  $U$  через силу струму  $U = I \cdot R$ . З цих двох рівнянь

$$x = \frac{IR}{0,5 \cdot 10^{-6}} + 15^\circ,$$

або підставивши числові значення, одержимо  $x = 1015^\circ C$ .

**Відповідь:**  $x = 1015^\circ C$ .

**Задача 2.3.** Реакція сполучення водню з киснем відбувається у відповідності з рівнянням  $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 575 кДж$ . При якій найменшій напрузі на електродах вольтметра може початися електроліз води?



**Дано:**  
 $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 575 \text{ кДж}$   


---

**Знайти:**  $U$

**Розв'язання:**

Для виділення  $m$  кг якоїсь речовини під час електролізу при проходженні кількості електрики  $q$  при напрузі  $U$  витрачається енергія  $E = U \cdot q$ . Визначимо

з закону Фарадея кількість електрики  $q$  і підставимо в цю формулу:

$$E = U \frac{mFn}{A}$$

Звідси найменша напруга на електродах вольтметра повинна становити

$$U = \frac{EA}{mFn}$$

На розклад 2 кмоль води, а отже, виділення з неї 4 кг водню належить витратити  $5,75 \cdot 10^8$  Дж енергії. Підставивши числові значення, одержимо

$$U = \frac{5,75 \cdot 10^8}{4 \cdot 96,5 \cdot 10^6} = 1,49 \text{ В.}$$

**Відповідь:**  $U=1,49$  В.

**Задача 2.4.** Яка кількість електроенергії витрачається на одержання 1 кг алюмінію, якщо електроліз ведеться при напрузі 10 В, коефіцієнт корисної дії всієї установки 80%? Маса кілограм-атома алюмінію 27 кг/кг-атом.

**Дано:**  
 $U=10$  В  
 $\eta=80\%$   
 $m=27$  кг/кг-атом  


---

**Знайти:**  $E$

**Розв'язання:**

Електрична енергія, що витрачається при електролізі на одержання 1 кг алюмінію, дорівнює

$$E = \frac{qU}{\eta}$$

де  $q$  — кількість електрики, при проходженні якої через електроліт виділяється 1 кг алюмінію;  $U$  — напруга, при якій ведуть електроліз;  $\eta$  — коефіцієнт корисної дії установки. Кількість електрики  $q$  можна знайти з закону Фарадея

$$m = \frac{A}{n} \cdot \frac{q}{F}, \text{ звідси } q = \frac{mnF}{A}$$

Підставивши значення  $q$  в попереднє рівняння, одержимо

$$E = \frac{mnFU}{A\eta}.$$

Після підстановки числових значень  $E = 13,4 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 37,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ .

**Відповідь:**  $E = 37,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ .

### 3.3. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ

**Задача 3.1.** Дві спіралі з константану і нікеліну з'єднані паралельно. Довжини дротів спіралей відносяться як  $l_1:l_2 = 15:14$ , площі їх перерізів відносяться як  $S_1:S_2 = 5:4$ . Спіралі опущено в два однакові калориметри, що містять однакову кількість води, і після пропускання протягом однакового часу струму через спіралі вода в обох калориметрах нагрілася на однакове число градусів. Обчислити відношення питомих опорів константану і нікеліну.

<p><b>Дано:</b>  <math>l_1:l_2 = 15:14</math>  <math>S_1:S_2 = 5:4</math></p>	<p><b>Розв'язання:</b>  На основі закону Джоуля – Ленца</p>
<p><b>Знайти:</b> <math>\frac{\rho_1}{\rho_2}</math></p>	$Q_1 = I_1^2 R_1 t$ і $Q_2 = I_2^2 R_2 t$ звідки $\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 \frac{R_1}{R_2} = 1$ .

Спіралі з'єднані паралельно, тому

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}, \text{ а звідки } \frac{R_2}{R_1} = 1.$$

Оскільки

$$R_1 = \rho_1 \frac{l_1}{S_1} \text{ і } R_2 = \rho_1 \frac{l_2}{S_2}, \text{ то } \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{l_2 S_1}{l_1 S_2} \approx 1,16.$$

**Відповідь:**  $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1,16$ .

**Задача 3.2.** Є два електрокип'ятильники з опорами 10 і 20 Ом. Другий кип'ятильник нагріває певний об'єм води до кипіння за 20 хв. За скільки часу нагріє до кипіння той же об'єм води перший кип'ятильник? За який час вода нагріється до кипіння обома кип'ятильниками при паралельному і при послідовному їх з'єднанні? В усіх випадках кип'ятильники підключаються до однієї і тієї ж сітки з напругою  $U$ .

**Дано:**

$$R_1=10 \text{ Ом}$$

$$R_2=20 \text{ Ом}$$

$$t_2=20 \text{ хв}$$

**Знайти:**  $t_1$

**Розв'язання:**

Кількість теплоти, що виділяється кип'ятильником з опором  $R_1$  за час  $t_1$

$$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t_1. \quad (1)$$

Кількість теплоти, що виділяється кип'ятильником з опором  $R_2$  за час  $t_2$

$$Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t_2.$$

За умовою задачі  $Q_1 = Q_2$ , тому що в обох випадках теплота йде на нагрівання одного і того ж об'єму води до кипіння. Отже,

$$\frac{U^2}{R_1} t_1 = \frac{U^2}{R_2} t_2,$$

звідси

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

тобто час нагрівання води прямо пропорційний опорі кип'ятильника. Підставивши числові дані, одержимо час  $t_1$  нагрівання води першим кип'ятильником:

$$t_1 = t_2 \frac{R_1}{R_2} = 10 \text{ хв}.$$

Опір паралельно з'єднаних кип'ятильників

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Нехай вони виділяють кількість теплоти  $Q_1$  за час  $t_3$ . Тоді

$$Q_1 = \frac{U^2 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2} t_3.$$

Зіставивши це з рівнянням (1), знайдемо

$$\frac{t_1}{t_3} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \text{ звідки } t_3 = t_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx 6,6 \text{ хв.}$$

Опір послідовно з'єднаних кип'ятильників дорівнює

$$R_{\text{заг}} = R_1 + R_2.$$

Якщо вони виділяють кількість теплоти  $Q$  за час  $t_4$ , то можна написати

$$Q = \frac{U^2}{R_1 + R_2} t_4.$$

Зіставивши це з рівнянням (1), знайдемо:

$$\frac{t_1}{t_4} = \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$$\text{звідки } t_4 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} t_1 = 30 \text{ хв.}$$

**Відповідь:**  $t_4 = 30$  хв.

**Задача 3.3.** Визначити струм короткого замикання для акумуляторної батареї, якщо при навантаженні  $5 \text{ A}$  вона віддає в зовнішнє коло  $9,5 \text{ Вт}$ , а при навантаженні  $8 \text{ A}$  –  $14,4 \text{ Вт}$ .

**Дано:**

$$I_1 = 5 \text{ A}$$

$$N_1 = 9,5 \text{ Вт}$$

$$I_2 = 8 \text{ A}$$

$$N_2 = 14,4 \text{ Вт}$$

**Знайти:**  $I_0$

**Розв'язання:**

Потужність, що віддається в зовнішньому колі, дорівнює різниці потужностей, що віддається в усьому колі, і потужності у внутрішній частині кола:

$$N = I^2 R = EI - I^2 r.$$

Згідно з умовою задачі запишемо два рівняння:

$$N_1 = EI_1 - I_1^2 r \text{ і } N_2 = EI_2 - I_2^2 r.$$

Нам треба визначити струм короткого замикання  $I_0 = \frac{E}{r}$ .

Поділивши почленно праву і ліву частини кожного рівняння на  $r$ , дістанемо

$$\frac{N_1}{r} = \frac{E}{r} I_1 - I_1^2 \text{ і } \frac{N_2}{r} = \frac{E}{r} I_2 - I_2^2.$$

Розв'язавши ці два рівняння відносно  $\frac{E}{r}$ , знайдемо

$$I_0 = \frac{E}{r} = \frac{I_2^2 N_1 - I_1^2 N_2}{I_2 N_1 - I_1 N_2} = 62 \text{ А.}$$

**Відповідь:**  $I_0 = 62 \text{ А.}$

## ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### 3.4. ЗАКОН БІО-САВАРА-ЛАПЛАСА

### 3.5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

#### 3.4.1. Питання, винесені на практичне заняття:

1. Магнітне поле та його характеристики.
2. Магнітний момент витка зі струмом.
3. Вектор магнітної індукції.
4. Закон Біо-Савара-Лапласа.
5. Закон Ампера.
6. Сила Лоренца.
7. Явище електромагнітної індукції.
8. Закон Фарадея та закон Ленца.

#### 3.4.2. Література: [1] С.100-126, [2] С.17-54, [3 т.2], [4 ч.2], [5].

#### 3.4.3. При вивченні цієї теми слід зрозуміти:

Магнітна індукція – векторна величина, модуль якої визначається відношенням максимальної сили, котра діє збоку магнітного поля на ділянку провідника з током, до сили цього току та довжини ділянки провідника:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}.$$

Сила  $F$ , що діє на прямолінійний відрізок  $l$  провідника, по якому проходить струм  $I$  в магнітному полі з магнітною індукцією  $B$ ,

$$F = BIl \sin(\theta).$$

Електрорушійна сила індукції в контурі, що пронизується потоком  $\Phi$ ,

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

Електрорушійна сила індукції в провіднику довжиною  $l$ , що рухається в магнітному полі з швидкістю  $v$ ,

$$E = Blv \sin(\theta).$$

Напрями  $v$  і  $I$  передбачаються взаємно перпендикулярними. Електрорушійна сила індукції, збуджувана в рамці площею  $S$  при її обертанні в магнітному полі.

$$E = nBS\omega \sin \omega t,$$

де  $n$  — кількість витків,  $\omega$  — кутова швидкість обертання рамки.

#### 3.4.4. Після закінчення вивчення теми слід знати:

1. Магнітне поле, магнітна індукція.
2. Закон Біо-Савара-Лапласа.
3. Сила, що діє на провідник зі струмом в магнітному полі. Закон Ампера. Визначення напрямку сили Ампера.
4. Взаємодія паралельних струмів.
5. Принцип суперпозиції магнітних полів.
6. Сила, що діє на рухомий заряд у магнітному полі. Сила Лоренца.
7. Явище та закон електромагнітної індукції.
8. Правило Ленца.
9. ЕРС індукції у нерухомих та рухомих провідниках.
10. Індуктивність контуру. Самоіндукція.
11. Енергія магнітного поля.

**Задача 4.1.** Вздовж двох довгих прямих провідників, які знаходяться на відстані 5 см один від одного, протікають струми силою 10 А в одному напрямку. Визначити індукцію магнітного поля в точці, яка розташована на відстані 3 см від кожного провідника.

Дано: СІ  
 $l=5\text{см}=5\cdot 10^{-2}\text{м}$   
 $I_1 = I_2 = I = 10\text{А}$   
 $r=3\text{см}=3\cdot 10^{-2}\text{м}$

Знайти:  $B$

Розв'язання:

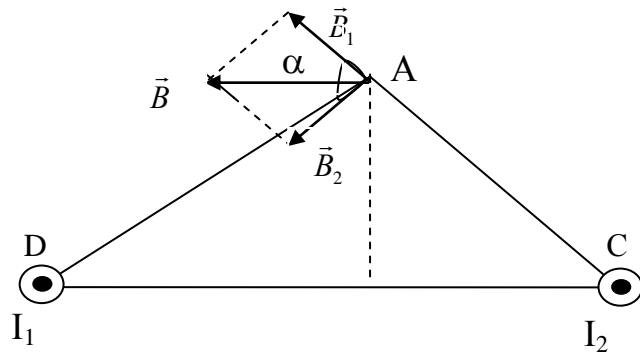


Рисунок 4

Вектор магнітної індукції  $B$  поля в точці А дорівнює векторній сумі індукцій  $B_1$  і  $B_2$  полів, створюваних у цій точці кожним струмом окремо (див. рис. 4).

Напрямок векторів  $B_1$  і  $B_2$  визначаємо за правилом буравчика. Числове значення індукції магнітного поля в точці А може бути знайдене за теоремою косинусів:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha}. \quad (1)$$

Індукції магнітних полів, створюваних кожним струмом у точці А, відповідно дорівнюють:

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_1}, \quad B_2 = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_2}.$$

Оскільки  $r_1 = r_2 = r$ ,  $B_1 = B_2$  вираз (1) матиме вигляд

$$B = \sqrt{2B_1^2 + 2B_1^2 \cos \alpha} = B_1 \sqrt{2 + 2 \cos \alpha}. \quad (2)$$

Розглянувши трикутник ADC за допомогою теореми косинусів знайдемо

$$l^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha,$$

звідки можна отримати

$$\cos \alpha = (r_1^2 + r_2^2 - l^2)/(2r_1r_2) = (2r^2 - l^2)/(2r^2).$$

Підставимо вираз для  $B_1$  та  $\cos \alpha$  у рівняння (2), отримуємо

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r} \sqrt{2 + \frac{2(2r^2 - l^2)}{2r^2}} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r^2} \sqrt{4r^2 - l^2};$$

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2 \cdot 3,14 (3 \cdot 10^{-2})^2} \sqrt{4 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2 - (5 \cdot 10^{-2})^2} \text{ Тл} \approx 66,6 \text{ мкТл}.$$

**Відповідь:**  $B=66,6$  мкТл.

**Задача 4.2.** Струм силою  $I$ , що проходить по дротяному кільцю з міді перерізом  $S$ , створює в центрі кільця індукцію магнітного поля  $\vec{B}$ . Визначити різницю потенціалів між кінцями дроту, що утворює кільце.

<p><b>Дано:</b>  <math>I</math>  <math>\rho</math>  <math>B</math>  <math>S</math></p> <hr/> <p><b>Знайти:</b> <math>U=\Delta\varphi</math></p>	<p><b>Розв'язання:</b></p> <p>Згідно з законом Ома для ділянки кола</p> $I = \frac{U}{R} = \frac{\Delta\varphi}{R};$ <p>звідси знайдемо</p> $\Delta\varphi = IR.$
---	---

Опір металевого провідника

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

отже

$$\Delta\varphi = I\rho \frac{l}{S},$$

де  $\rho$  - питомий опір провідника,  $l$  – довжина провідника,  $S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Довжина провідника (кола) визначається за формулою  $l = 2\pi r$ , де  $r$ - радіус кола.

Згідно з законом Біо-Савара-Лапласа модуль індукції поля в центрі колового струму

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}.$$

Виразимо радіус кола  $r$  і визначимо  $l$



$$r = \frac{\mu\mu_0 I}{2B}, l = \frac{2\pi\mu\mu_0 I}{2B} = \frac{\pi\mu\mu_0 I}{B}.$$

Визначимо різницю потенціалів

$$\Delta\varphi = \frac{I\rho \cdot \pi\mu\mu_0 I}{S \cdot B} = \frac{I^2 \rho \cdot \pi\mu\mu_0}{S \cdot B}.$$

**Відповідь:**  $\Delta\varphi = \frac{I^2 \rho \cdot \pi\mu\mu_0}{S \cdot B}.$

**Задача 4.3.** Електрон влітає в однорідне магнітне поле зі швидкістю  $\vec{v}$  під кутом  $\alpha$  до вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$ . Визначити радіус і крок гвинтової лінії, вдовж якої буде рухатися електрон.

<p><b>Дано:</b></p> <p><math>v</math></p> <p><math>\alpha</math></p> <p><math>B</math></p> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> <p><b>Знайти:</b> <math>R, h</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>Розв'язання:</b></p> <p>Рух електрона в однорідному магнітному полі проходить вздовж гвинтової лінії, оскільки вектори <math>\vec{v}</math> і <math>\vec{B}</math> утворюють кут <math>\alpha</math>. Це стає очевидним, якщо розкласти вектор швидкості на дві складові: паралельну вектору індукції <math>v_{\parallel}</math> і перпендикулярну вектору індукції <math>v_{\perp}</math>.</p> <p>З рисунка видно, що <math>v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha</math>, <math>v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha</math>. Сила Лоренца діє на електрон в площині, яка перпендикулярна до вектора <math>\vec{B}</math>, надаючи йому доцентрове прискорення. При цьому електрон описує в цій площині коло радіусом <math>R</math> тому, що <math>\vec{B} = \text{const}</math>, <math>v_{\perp} = \text{const}</math>.</p>
---	--

Визначимо модуль сили Лоренца:

$$F_L = e v_{\perp} B = e v B \sin \alpha.$$

Оскільки  $F_L = a_{\text{доц}} \cdot m$ , то

$$e B v \sin \alpha = \frac{v_{\perp}^2 m}{R}, \quad e B v \sin \alpha = \frac{m v^2 \sin^2 \alpha}{R},$$

тобто

$$R = \frac{m v \sin \alpha}{e B}.$$

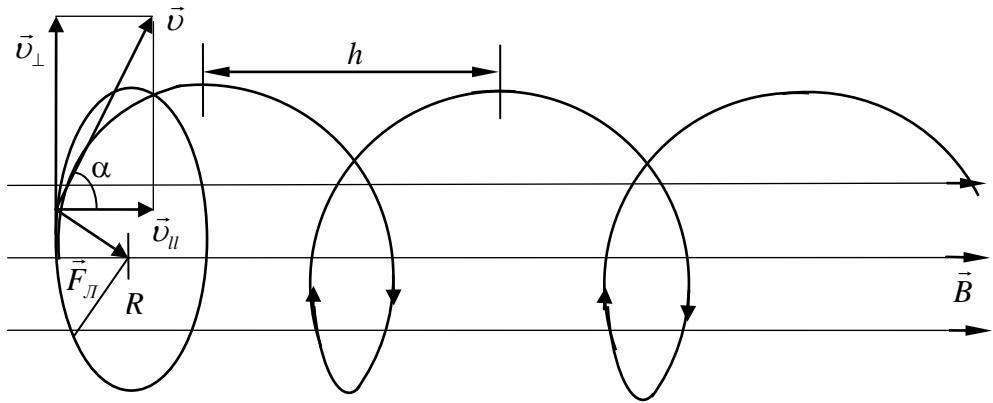


Рисунок 5

Вздовж магнітного поля електрон рухається зі сталою швидкістю  $v_{\parallel} = v \cos \alpha$ , оскільки в цьому напрямку сила не діє. В результаті додавання двох рухів - руху по колу та прямолінійного рівномірного руху по інерції - траєкторія результуючого руху представляє собою гвинтову лінію (див. рис. 5). Визначимо шаг гвинтової лінії як відстань, на яку переміщується частинка вздовж поля за один оберт:

$$h = v_{\parallel} \cdot T = v \cos \alpha \cdot T.$$

Враховуючи, що  $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}$ ,

Отримуємо

$$h = \frac{2\pi R v \cos \alpha}{v \sin \alpha} = \frac{2\pi R \cos \alpha}{\sin \alpha}.$$

Виконавши підстановку R, отримуємо

$$h = \frac{2\pi \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{mv \sin \alpha}{eB} = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{eB}.$$

**Відповідь:**  $h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{eB}$ .

**Задача 4.4.** Рамка з 50 витків дроту площею  $150 \text{ см}^2$  рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією  $B = 0,8 \text{ Вб/м}^2$ . Рамка здійснює  $n = 120$  об/хв. Визначити амплітуду ЕРС індукції.

<p><b>Дано: СІ</b>  <math>N=50</math> витків  <math>S=150 \text{ см}^2=1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2</math>  <math>B = 0,8 \text{ Вб/м}^2</math>  <math>n = 120 \text{ об/хв}=2 \text{ об/с}</math></p>
---

**Знайти:**  $E_m$

**Розв'язання:**

Електрорушійну силу індукції можна обчислити за формулою

$$E = BSN\omega \sin \varphi,$$

де  $N$  — число витків;  $\omega = 2\pi\nu$  — кутова частота;  $\nu$  — частота зміни електрорушійної сили;  $\varphi$  — фаза.

Тому

$$E = 2\pi BSN\nu \sin \varphi.$$

Амплітуда ЕРС досягається при  $\sin \varphi = 1$ :

$$E_m = 6,28 \cdot 0,8 \text{ Вб/м}^2 \cdot 0,015 \text{ м}^2 \cdot 50 \cdot 206 / \text{с} \approx 7,5 \text{ В}.$$

**Відповідь:**  $E_m = 7,5 \text{ В}$ .

**Задача 4.5.** Швидкість літака  $\nu = 950 \text{ км/год}$ . Вертикальна складова земного магнітного поля  $H = 40 \text{ А/м}$ . Знайти ЕРС індукції, що виникає на кінцях крил. Розмах крил  $l = 12,5 \text{ м}$ . Літак рухається горизонтально. Чи можна використати цю різницю потенціалів для вимірювання швидкості польоту літака?

**Дано:** СІ

$$\nu = 950 \text{ км/год} = 264 \text{ м/с}$$

$$H = 40 \text{ А/м}$$

$$l = 12,5 \text{ м}$$

**Знайти:**  $E$

**Розв'язання:**

В даному випадку літак являє собою провідник, що рухається в магнітному полі напруженістю  $H$  в напрямі, перпендикулярному до вектора напруженості. Тому на кінцях крил літака виникне ЕРС індукції

$$E = -\mu_0 H l \nu,$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$  — магнітна стала.

Підставивши числові значення, дістанемо  $E = -0,165 \text{ В}$ . Використати цю різницю потенціалів для вимірювання швидкості польоту літака не можна, тому що, замкнувши кінці крил на вольтметр, дістанемо контур, в якому при поступальному русі літака магнітний потік залишається незмінним і ЕРС індукції дорівнює нулеві. Наявність ЕРС можна виявити лише при поворотах літака (зміні кута між контуром і магнітним полем).

**Відповідь:**  $E = -0,165 \text{ В}$ .

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

### 3.6. ЗМІННИЙ СТРУМ

#### 3.7. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

##### 3.6.1. Питання, винесені на практичне заняття:

1. Диференціальне рівняння електромагнітних коливань.
2. Вимушені коливання. Амплітуда та фаза вимушених коливань.
3. Електромагнітні хвилі.
4. Енергія електромагнітних хвиль.

**3.6.2. Література:** [1] С.127-159, [2] С.55-100, [3 т.2], [4 ч.2], [5].

##### 3.6.3. При вивченні цієї теми слід зрозуміти:

Електрорушійна сила джерела змінного струму:

$$E = E_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де  $E_m$  — амплітудне значення ЕРС змінного струму;  $\omega = 2\pi\nu$  — колова частота.

Ефективні значення сили струму і ЕРС

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad i \quad E_{ef} = \frac{E_m}{\sqrt{2}},$$

де  $I_m$  і  $E_m$  — амплітудні значення відповідно сили струму і ЕРС.  
Коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1},$$

де  $n_1$  і  $n_2$  — числа витків первинної і вторинної обмоток, а  $U_1$  і  $U_2$  — напруги на обмотках трансформатора.

Період власних коливань контура

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

де  $L$  — індуктивність контура (Гн) і  $C$  — ємкість конденсатора (Ф).

### 3.6.4. Після закінчення вивчення теми слід знати:

1. Загасаючі коливання. Вимушені коливання.
2. Електромагнітний резонанс.
3. Ланцюг змінного струму.
4. Змінний струм через резистор.
5. Змінний струм через конденсатор.
6. Ланцюг змінного струму, котрий складений з послідовно підключеного резистора, котушки індуктивності та конденсатора.
7. Резонанс у ланцюгу змінного струму.
8. Потужність у ланцюгу змінного струму.

**Задача 5.1.** Ефективна напруга в колі змінного струму  $U_{\text{еф}} = 120 \text{ В}$ . Визначити час, протягом якого горить неонova лампа за кожний півперіод, якщо лампа загоряється і гасне при напрузі  $U = 84 \text{ В}$ .

**Дано:**

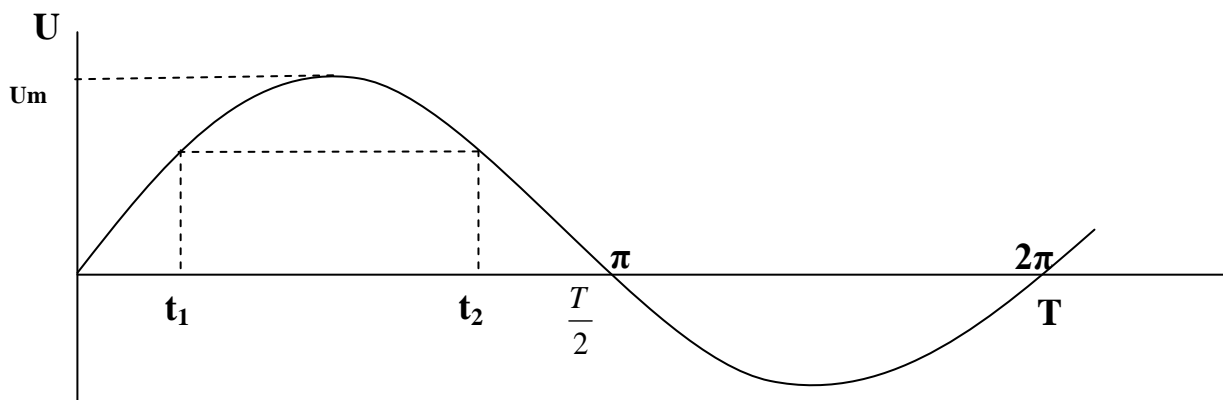
$$U_{\text{еф}} = 120 \text{ В}$$

$$U = 84 \text{ В}$$

**Знайти:**  $\Delta t$

**Розв'язання:**

Графік залежності напруги змінного струму від часу являє синусоїду (рис. 6). Період змінного струму  $T = 0,02 \text{ сек}$ . Розглянемо один півперіод.



**Рисунок 6**

Неонova лампа буде горіти протягом такого часу кожного півперіоду, коли  $U \geq 84 \text{ В}$  (фактично напруга запалювання трохи більша напруги гасіння, але для спрощення задачі в умові прийнято, що вони однакові).

Цей проміжок часу, очевидно, дорівнює  $\Delta t = t_2 - t_1$ , де  $t_2$  і  $t_1$  можна знайти з рівняння змінного струму

$$U = U_m \sin \omega t = U_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right).$$

Максимальна напруга пов'язана з елективною формулою

$$U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \text{ звідки } U_m = \sqrt{2}U_{ef}.$$

Підставимо значення  $U_m$  у формулу (1):

$$U = \sqrt{2}U_{ef} \sin \frac{2\pi}{T}t, \text{ звідки } \sin \frac{2\pi}{T}t = \frac{U}{U_{ef}\sqrt{2}}.$$

Підставивши числові значення значення  $U = U_{zan} = U_{zac}$  і  $U_{ef}$ , знайдемо

$$\sin \frac{2\pi}{T}t = \frac{1}{2},$$

звідки в межах одного півперіоду

$$\left\{ \frac{2\pi}{T}t_1 = \frac{\pi}{6}; t_1 = \frac{T}{12}; \right. \left. \left\{ \frac{2\pi}{T}t_2 = \frac{5}{6}\pi; t_2 = \frac{5}{12}T \right. \right.$$

Отже, шукане значення

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{T}{3}; \Delta t = \frac{1}{150} \text{ сек.}$$

**Відповідь:**  $\Delta t = \frac{1}{150}$  сек.

**Задача 5.2.** До точок А і В прикладена постійна напруга, що заряджає конденсатор С (рис. 7). На обмотку електромагніту Е подають змінну напругу. Електромагніт приводить в коливання язичок D, який по черзі розмикає коло живлення конденсатора і замикає коло гальванометра Г. Яка середня величина струму проходить через гальванометр, якщо частота змінного струму  $500 \text{ Гц}$ , ємність конденсатора  $1 \text{ мкФ}$ , постійна напруга  $100 \text{ В}$ ?

Стержень електромагніту і язичок виготовлені з м'якого магнітного матеріалу, тобто залишковим намагніченням можна нехтувати. Вважати, що конденсатор встигає повністю зарядитися за час, протягом якого коло зарядки замкнуте.

**Дано: СІ**

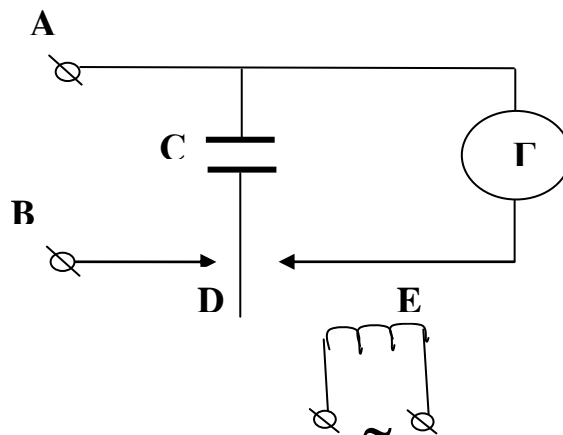
$$\nu = 500 \text{ Гц}$$

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

$$U = 100 \text{ В}$$

**Знайти:**  $I$

**Розв'язання:**



**Рисунок 7**

Струм, що тече через гальванометр, дорівнює  $I = qn$ , де  $q$  — заряд, що протікає при розряджанні конденсатора, а  $n$  — число переривань за 1 сек. Оскільки за період коло розряджання замикається через гальванометр двічі, то  $n = 1000$ . Отже,  $q = CU = 10^{-6} \cdot 100 = 10^{-4}$  Кл. Тоді  $I = 10^{-4} \cdot 10^3 = 0,1$  А.

**Відповідь:**  $I=0,1$  А.

**Задача 5.3.** Напряга на кінцях ділянки ланцюга, по якому тече змінний струм, змінюється із часом за законом  $U = U_0 \sin(\omega t + \pi/6)$ . В момент часу  $t = T/12$  миттєва напряга дорівнює 10 В. Визначити амплітуду напряги.

**Розв'язання:**

**Дано:**  
 $t = T/12$  с  
 $U = 10$  В

Підставимо в рівняння  $U = U_0 \sin(\omega t + \pi/6)$  значення  $t$  та враховуючі, що  $\omega = 2\pi/T$ , отримуємо  $10 = U_0 \sin(\frac{2\pi T}{12T} + \frac{\pi}{6})$  або

$$10 = U_0 \sin \frac{\pi}{3} \text{ звідки одержимо } U_0 = \frac{10}{\sin(\pi/3)} = \frac{10}{0,87} \text{ В} \approx 11,5 \text{ В}.$$

**Знайти:**  $U_0$

**Відповідь:**  $U_0 = 11,5$  В.

### **3.7. Електромагнітні коливання і хвилі**

**Задача 5.4.** Приймальний контур складається з котушки індуктивністю  $L = 2 \cdot 10^{-6}$  Гн і конденсатора ємністю  $C = 1,8 \cdot 10^{-10}$  Ф. На яку довжину хвилі розрахований контур?

**Розв'язання:**

**Дано:**  
 $L = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$   
 $C = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$

**Знайти:**  $\lambda$ 

Довжина хвилі пов'язана з періодом коливань співвідношенням  $\lambda = cT$ . Період коливань  $T$  контура визначається за формулою

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \text{ Отже, } \lambda = 2\pi c\sqrt{LC}.$$

Підставивши числові значення, одержимо

$$\lambda = 6,28 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,8 \cdot 10^{-10}} \text{ м} \approx 36 \text{ м}.$$

**Відповідь:**  $\lambda = 36 \text{ м}$ .

**Задача 5.5.** Звукові хвилі довжиною  $2 \text{ м}$  падають на мембрану мікрофона. Внаслідок коливань мембрани в мікрофоні виникають електричні коливання. Визначити довжину хвилі цих коливань.

**Розв'язання:**

**Дано:**  
 $\lambda_1 = 2 \text{ м}$

**Знайти:**  $\lambda$ 

Довжину хвилі електромагнітних коливань можна визначити з формули  $c = \lambda\nu$ , звідки  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , де  $c$  — швидкість поширення електромагнітних хвиль ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$ ), а  $\nu$  — частота.

Частота  $\nu$  електромагнітних коливань дорівнює в даному випадку частоті звукових коливань, яку можна визначити з формули  $\nu = \lambda_1\nu$ .

Звідси  $\nu = \frac{v}{\lambda_1}$  де  $v$  — швидкість звука в повітрі.

Підставивши значення  $\nu$  в попередню формулу, одержимо

$$\lambda = \frac{c\lambda_1}{v} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/сек} \cdot 2 \text{ м}}{330 \text{ м/сек}} \approx 1,8 \cdot 10^6 \text{ м}.$$

**Відповідь:**  $\lambda = 1,8 \cdot 10^6 \text{ м}$ .**3.8. ХВИЛЬОВА ОПТИКА****3.8.1. Питання, винесені на практичне заняття:**

1. Закони відбиття та заломлення світла. Коефіцієнт заломлення світла.
2. Інтерференція світла. Когерентність і монохроматичність світлових хвиль. Умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини.
3. Дифракція світла. Принцип Гюйгенса-Френеля.



4. Поляризація світла при відбитті та заломленні на границі двох діелектричних середовищ. Закон Брюстера. Закон Малюса.

**3.8.2. Література:** [1] С.160-182, [2] С.101-129, [3 т.3], [4 ч.2], [5].

**3.8.3.** Оптика вивчає світло, його властивості і взаємодію з речовиною. Під світлом розуміють видиму ділянку електромагнітних хвиль і прилеглі до неї інфрачервону та ультрафіолетову. Світло – потік фотонів (елементарних частинок електромагнітного поля). Фотони якісно відмінні від частинок речовини і мають подвійну корпускулярно-хвильову природу. Кожний природний промінь є сукупністю багатьох світлових хвиль різної довжини.

*3.8.3.1 При підготовці до практичних занять слід зрозуміти:*

- Світло, що випромінюється окремим атомом або молекулою являє собою плоскополяризовану електромагнітну хвилю, в ній відбувається коливання векторів електричної  $\vec{E}$  та магнітної  $\vec{B}$  складових. Площини коливань векторів  $\vec{E}$  та  $\vec{B}$  взаємно перпендикулярні.
- Світло, в якому коливання вектора  $\vec{E}$  електромагнітної хвилі яким-небудь чином впорядковані, називається поляризованим.
- При дії світла на речовину основне значення має електрична складова електромагнітної хвилі. Тому вектор напруженості електричного поля  $\vec{E}$  називають світловим вектором.
- На межі двох середовищ світло частково відбивається від другого середовища, а частково переходить з першого середовища у друге.

*3.8.3.2 Після закінчення вивчення теми слід знати:*

1. Закони розповсюдження світла.
2. Що таке інтерференція світла.
3. Які хвилі називаються когерентними.
4. Що таке оптична різниця ходу світлових променів та оптична довжина шляху.
5. Що являє собою інтерференція в тонких плівках.
6. В чому полягає сутність принципу Гюйгенса.
7. В чому полягає явище дифракції на щілині, умови дифракційного максимуму та мінімуму.
8. Що таке дифракційна ґратка.
9. Формулювання закону Брюстера.
10. Формулювання закону Малюса.

*3.8.3.3 Після закінчення вивчення теми слід запам'ятати:*

1. Визначення основних понять: інтерференція світла, когерентність та монохроматичність світлових хвиль, дифракція світла, оптична різниця ходу світлових променів, оптична довжина шляху.
2. Формулювання принципу Гюйгенса.

3. Формулювання законів розповсюдження світла.

4. Запам'ятати формули:

$L = nl$  – оптична довжина шляху

$\Delta = L_1 - L_2$  – оптична різниця ходу двох світлових хвиль

$\Delta = \pm k\lambda$  – умова максимуму інтерференційної картини ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

$\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$  – умова мінімуму інтерференційної картини ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

$\Delta = 2d \cdot n \cdot \sin i_1 \pm \frac{\lambda}{2}$  – оптична різниця ходу світлових хвиль при відбитті від тонкої плівки

$a \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$  – умова дифракційного мінімуму ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

$a \sin \varphi = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$  – умова дифракційного максимуму ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

$2d \sin \theta = \pm k\lambda$  – формула Вульфа-Бреггів.

$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$  – закон Брюстера.

$I = I_0 \cos^2 \alpha$  – закон Малюса.

*п.п.3.4. Розв'язати задані до дому задачі.*

### **3.8.4. Приклади розв'язування задач**

**Задача 6.1.** Плоска монохроматична світлова хвиля проходить крізь скляну призму з малим кутом заломлення  $0,001$  рад. Довжина хвилі світла  $500$  нм. Показник заломлення  $1,5$ . На екрані інтерферують хвилі, що пройшли крізь призму. Знайти відстань між сусідніми інтерференційними максимумами.

**Дано: СІ**  
 $\lambda = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$   
 $n = 1,5$   
 $\theta = 0,001$

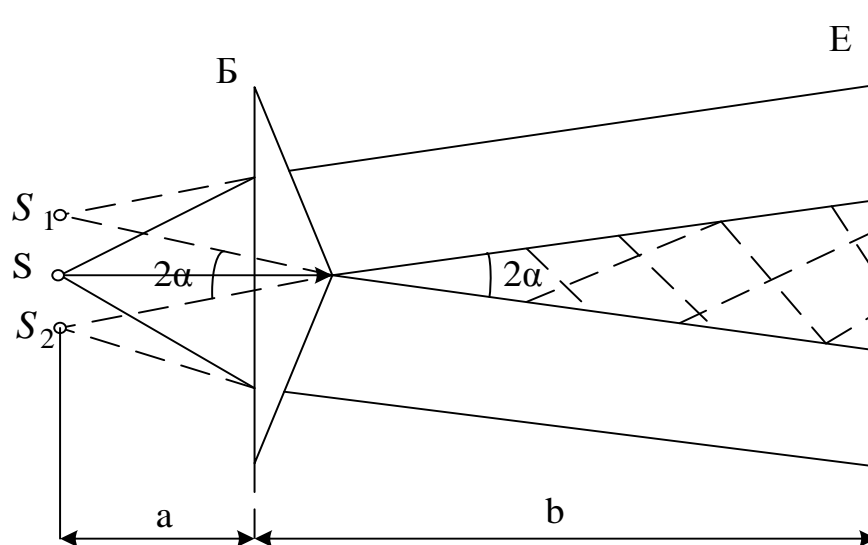
**Знайти:  $\Delta$**

**Розв'язання:**

Оскільки кут заломлення призми дуже малий, то всі промені відхиляються призмою на практично однаковий кут:

$$\alpha = (n - 1)\theta.$$

В результаті створюються дві когерентні хвилі, що як би виходять з уявних джерел  $S_1$  та  $S_2$ .



**Рис. 8**

Ширину інтерференційних смуг (відстань між сусідніми інтерференційними максимумами) знаходимо із формули:

$$\Delta = \frac{l}{d} \cdot \lambda,$$

де  $l$  – відстань від джерела світла до екрану;  $d$  – відстань між джерелами.

Враховуючи, що в даному випадку  $l = a + b$  та  $d = a2\alpha$  (див. рис. 8.), отримаємо:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\alpha} \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$$

Видно, що ширина смуг тим більше чим більше відстань  $b$  від призми до екрана. Якщо на призму падає плоска хвиля, тобто  $a \rightarrow \infty$ , тоді маємо:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

Звідси випливає, що ширина стрічки в цьому випадку не залежить від положення екрану  $b$ . Тоді

$$\Delta = \frac{\lambda}{2(n-1)\theta}$$

Після підстановки числових значень:

$$\Delta = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot (1,5 - 1) \cdot 0,001} = 0,0005 \text{ м} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Відповідь:  $\Delta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

**Задача 6.2.** На грань кристала кам'яної солі падає паралельний пучок рентгенівських променів ( $\lambda = 1,46 \text{ нм}$ ). Знайти відстань між атомними площинами кристала, якщо дифракційний мінімум третього порядку спостерігається, коли промені падають під кутом  $\varphi = 55^{\circ}30'$  з нормаллю до поверхні кристала.

<p><b>Дано: СІ</b>  <math>\lambda = 1,46 \text{ нм} = 1,46 \cdot 10^{-9} \text{ м}</math>  <math>k=3</math>  <math>\varphi = 55^{\circ}30'</math></p> <hr/> <p><b>Знайти: <math>d</math></b></p>
--

**Розв'язання:**

Запишемо формулу Вульфа-Брегга:

$$\Delta = 2 \cdot d \cdot \sin \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут ковзання. Для нашого випадку різниця ходу:

$$\Delta = k \cdot \frac{\lambda}{2},$$

тоді

$$k \cdot \frac{\lambda}{2} = 2 \cdot d \cdot \sin \alpha$$

або

$$k \cdot \frac{\lambda}{2} = 2 \cdot d \cdot \cos \varphi,$$

звідки

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{4 \cos \varphi}.$$

Після підстановки чисельних значень маємо:

$$d = \frac{3 \cdot 1,46 \cdot 10^{-9}}{4 \cos 55^{\circ} 30'} = 1,933 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Відповідь:  $d = 1,933 \cdot 10^{-9}$  м.

**Задача 6.3.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Червона лінія ( $\lambda_1 = 630$  нм) спостерігається у спектрі третього порядку під кутом  $\varphi = 60^{\circ}$ . Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  спостерігається під цим же кутом в спектрі четвертого порядку? Яке число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини має дифракційна решітка?

<p style="text-align: center;"><b>Дано: СІ</b></p> $\lambda_1 = 630 \text{ нм} = 630 \cdot 10^9 \text{ м}$ $\varphi = 60^{\circ}$	<p style="text-align: center;"><b>Розв'язання:</b></p> <p>Із умови максимумів дифракційної решітки маємо:</p>
<p style="text-align: center;"><b>Знайти:</b> <math>\lambda_2, N_0</math></p>	$d \sin \varphi = k_1 \lambda_1$

та

$$d \sin \varphi = k_2 \lambda_2, \text{ де } k_1=3, k_2=4.$$

Прирівнявши ліві та праві частини рівнянь маємо:

$$k_1 \lambda_1 = k_2 \lambda_2,$$

звідси

$$\lambda_2 = \frac{k_1 \lambda_1}{k_2} = \frac{3 \cdot 630}{4} = 472,5 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 472,5 \text{ нм.}$$

За визначенням число штрихів на одиницю площі становить:

$$N_0 = \frac{1}{d}, \text{ звідси } d = \frac{1}{N_0}.$$

Підставляємо останній вираз у формулу для максимуму дифракційної решітки отримуємо:

$$\frac{\sin \varphi}{N_0} = k\lambda,$$

звідси

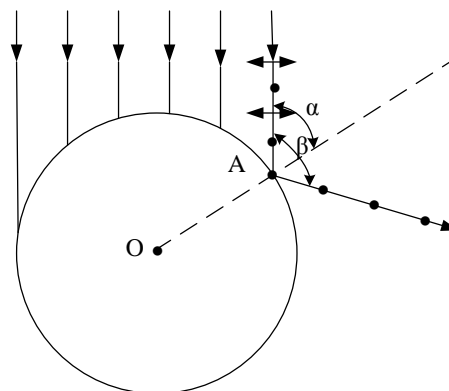
$$N_0 = \frac{\sin \varphi}{k\lambda} = 458 \text{ мм}^{-1}.$$

Відповідь:  $\lambda_2 = 472,5 \text{ нм}$ ,  $N_0 = 458 \text{ мм}^{-1}$ .

**Задача 6.4.** Паралельний пучок природного світла падає на сферичну каплю води. Знайти кут  $\beta$  між відбитим та падаючим променями в точці  $A$  (рис. 9)

<b>Дано:</b> $n_2 = 1,33$
<b>Знайти:</b> $\beta$

**Розв'язання:**



**Рис. 9**

Відбитий від поверхні каплі пучок світла являється повністю поляризованим. Тоді, згідно закону Брюстера:

$$\text{tg} \alpha = n_{21},$$

де  $\alpha$  - кут падіння пучка світла на каплю;  $n_{21}$  - відносний показник заломлення другого середовища (води) відносно першого (повітря).

Відносний показник заломлення дорівнює відношенню абсолютних показників заломлення цих середовищ тобто:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Отже:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1}.$$

Звідси:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{n_2}{n_1} \right).$$

Згідно закону відбиття світла кут падіння дорівнює куту відбиття. Тоді, кут між відбитим та падаючим пучками дорівнює:

$$\beta = 2\alpha.$$

Після підстановки  $\alpha$  маємо:

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{n_2}{n_1} \right).$$

Абсолютний показник заломлення повітря  $n_1 \approx 1$ .

Після підстановки чисельних значень маємо:

$$\beta = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{1,33}{1} \right) = 106^\circ.$$

Відповідь:  $\beta = 106^\circ$ .

### 3.9 КВАНТОВІ ВЛАСТИВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### 3.9.1 Питання, винесені на практичне заняття:

1. Теплове випромінювання. Абсолютно чорне тіло.
2. Закон Кірхгофа.
3. Випромінювання абсолютно чорного тіла. Закон Стефана-Больцмана. Закон зміщення Віна.
3. Формула Релея-Джинса. Квантова гіпотеза випромінювання та формула Планка.

4. Зовнішній фотоэффект. Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоэффекту.
5. Фотони. Енергія, маса та імпульс фотону.
6. Ефект Комптона.
7. Корпускулярно-хвильовий дуалізм властивостей світла.

**3.9.2 Література:** [1] С.183-195, [2] С.130-148, [3 т.3], [4 ч.2], [5].

**3.9.3** З погляду класичної електромагнітної теорії випромінювання світла зводиться до випромінювання електромагнітних хвиль атомами та молекулами. Світло випромінюється за рахунок переходів атомів, молекул та інших атомних систем із стану з більшою в стан з меншою енергією.

*3.9.3.1 При підготовці до практичних занять слід зрозуміти:*

- Теплове випромінювання виникає за рахунок внутрішньої енергії випромінюючого тіла і залежить від температури цього тіла.
- На відміну від інших видів випромінювання теплове випромінювання може знаходитися у термодинамічній рівновазі з речовиною.
- Тіло, що повністю поглинає падаюче на нього випромінювання будь-якої довжини хвилі називається абсолютно чорним тілом.
- Фотоэффект є результатом взаємодії фотонів світла з електронами речовини.
- Зовнішнім фотоэффектом називається висилання електронів з поверхні твердих тіл та рідини під дією електромагнітного випромінювання.
- Ефект Комптона є таким випадком взаємодії, в якому енергія та імпульс передаються електрону тільки частково, тому виникає розсіяний фотон світла з меншою енергією.

*3.9.3.2 Після закінчення вивчення теми слід знати:*

1. Яке тіло називають абсолютно чорним.
2. Яке тіло називають сірим.
3. Що називають здатністю тіла до випромінювання.
4. Закон Кірхгофа для теплового випромінювання.
5. Закон Стефана-Больцмана.
6. Формулу Віна.
7. Закон Релея-Джинса.
8. Формула Планка для теплового випромінювання.
9. Що називають фотоном та його властивості.
10. Суть явища фотоэффекту, його закони.
11. Суть ефекту Комптона.

*3.9.3.3 Після закінчення вивчення теми слід запам'ятати:*

1. Визначення основних понять: теплове випромінювання, абсолютно чорне тіло, сіре тіло, фотон, червона межа фотоэффекту.



2. Сформулювати перший закон фотоефекту, зв'язок маси та енергії фотону, зв'язок імпульсу та енергії фотону.
3. Пояснити суть ефекту Комптона.
4. Формули:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T) - \text{закон Кірхгофа}$$

$$R_e = \sigma T^4 - \text{закон Стефана-Больцмана}$$

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} - \text{закон зміщення Віна}$$

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT - \text{формула Релея-Джинса}$$

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{kT} - 1} - \text{формула Планка}$$

$$h\nu = \frac{m\nu_{max}^2}{2} + A_g - \text{рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту}$$

$$\nu_0 = \frac{A_g}{h} \text{ або } \lambda_0 = \frac{h \cdot c}{A_g} - \text{червона межа фотоефекту}$$

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} - \text{енергія фотону}$$

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda} - \text{маса фотону}$$

$$p = mc = \frac{h}{\lambda} - \text{імпульс фотону}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} - \text{формула Комптона}$$

3.9.3.4. Розв'язати задачі які були задані до дому.

### 3.9.4. Приклади розв'язування задач

**Задача 7.1.** Визначити енергію та масу фотона, що має довжину хвилі 500 нм.

**Дано: СІ**  
 $\lambda = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$   
**Знайти:  $E, m$**

**Розв'язання:**  
Енергія фотона:

$$E = h \cdot \nu,$$

де  $h$  – постійна Планка,  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ ;  $\nu$  – частота коливань.

Частота коливань:

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

де  $c$  – швидкість світла,  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,

тоді вираз для енергії фотона можна записати:

$$E = h \frac{c}{\lambda}.$$

З іншого боку, згідно формули Ейнштейна енергія фотона визначається:

$$E = mc^2$$

Прирівнюючи останні два вирази маємо:

$$h \frac{c}{\lambda} = mc^2,$$

звідки

$$m = \frac{h}{c \cdot \lambda}.$$

Масу фотона можна знайти і іншим способом із виразу:

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Підставляючи числові значення:

$$E = 6,6 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{-7}} = 3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$m = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{3 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-7}} = 4,4 \cdot 10^{-36} \text{ кг.}$$

Відповідь:  $E = 3,96 \cdot 10^{-19}$  Дж,  $m = 4,4 \cdot 10^{-36}$  кг.

**Задача 7.2.** На цинкову пластинку падає монохроматичне світло довжиною хвилі  $\lambda = 220$  нм. Визначити максимальну швидкість  $v_{\max}$  фотоелектронів.

**Дано:** СІ  
 $\lambda = 220 \text{ нм} = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

**Знайти:**  $v_{\max}$

**Розв'язання:**

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоэффекту має вигляд:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вих}} + \frac{m\nu_{\max}^2}{2},$$

де  $h\nu$  – енергія фотона ( $h$  – постійна Планка,  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с),  $A_{\text{вих}}$  – робота виходу,  $\frac{m\nu_{\max}^2}{2}$  – максимальна кінетична енергія випущеного з катода електрона ( $m$  – маса електрона,  $\nu$  – швидкість електрона).  
 Звідси максимальна кінетична енергія:

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вих}},$$

тоді максимальна швидкість  $v_{\max}$  фотоелектронів визначається:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \left( \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вих}} \right)}.$$

Оскільки для цинку  $A_{\text{вих}} = 6,4 \cdot 10^{-19}$  Дж. Після підстановки числових значень маємо:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{9,11 \cdot 10^{-31}} \cdot \left( \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,2 \cdot 10^{-7}} - 6,4 \cdot 10^{-19} \right)} = 7,6 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 760 \frac{\text{км}}{\text{с}}$$

Відповідь:  $v_{\max} = 760 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .

**Задача 7.3.** Фотон з енергією  $E_\phi = 0,75$  МеВ розсіявся на вільному електроні. Енергія розсіяного фотона  $E'_\phi = 0,43$  МеВ. Визначити кінетичну енергію електрона віддачі  $E_K$  та кут розсіювання  $\theta$ .

**Дано:**

$$E_\phi = 0,75 \text{ МеВ};$$

$$E'_\phi = 0,43 \text{ МеВ}.$$

**Знайти:**  $E_K, \theta$

**Розв'язання:**

Кінетична енергія електрона віддачі дорівнює різниці його повної енергії  $mc^2$  та енергії спокою  $m_0c^2$  електрона:

$$E_K = mc^2 - m_0c^2.$$

Закон збереження енергії під час ефекту Комптона:

$$m_0c^2 + E_\phi = E'_\phi + mc^2$$

або

$$mc^2 - m_0c^2 = E_K = E_\phi - E'_\phi.$$

Після підстановки чисельних значень маємо:

$$E_K = 0,75 - 0,43 = 0,32 \text{ МеВ}.$$

Зміну довжини хвилі розсіяного фотона знаходимо за формулою

$$\lambda' - \lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Виразимо  $\lambda'$  і  $\lambda$  через енергію:

$$\frac{hc}{E'_\phi} - \frac{hc}{E_\phi} = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Помноживши ліву і праву частини цього рівняння на  $1/c$  і виконавши перетворення дістанемо:

$$\frac{1}{E'_\phi} - \frac{1}{E_\phi} = \frac{2}{m_0 c} \cdot \frac{1}{c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

або

$$\frac{1}{E'_\phi} - \frac{1}{E_\phi} = \frac{2}{m_0 c^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Знаходимо кут розсіювання фотона:

$$\sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{(E_\phi - E'_\phi) m_0 c^2}{2 E'_\phi E_\phi}; \quad \sin \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{m_0 c^2 (E_\phi - E'_\phi)}{2 E_\phi E'_\phi}},$$

де  $m_0 c^2 = 0,51$  еВ.

Виконуємо обчислення:

$$\sin \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{0,51(0,75 - 0,43)}{2 \cdot 0,75 \cdot 0,43}} = 0,5;$$

$$\frac{\theta}{2} = 30^\circ \text{ і } \theta = 60^\circ.$$

Відповідь:  $E_\kappa = 0,32 \text{ MeV}$ ,  $\theta = 60^\circ$ .

**Задача 7.4.** Довжинна хвилі, на яку приходиться максимум енергії в спектрі випромінювання чорного тіла  $\lambda_0 = 0,58$  мкм. Знайти енергетичне випромінювання  $R_e$  поверхні тіла.

<p><b>Дано: СІ</b>  <math>\lambda_0 = 0,58 \text{ мкм} = 0,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}</math></p>	<p><b>Розв'язання:</b></p> <p>Енергетичне випромінювання <math>R_e</math> абсолютно чорного тіла у відповідності до закону Стефана-</p>
<p><b>Знайти: <math>R_e</math></b></p>	

Больцмана пропорційна четвертому степеню термодинамічної температури та виражається формулою:

$$R_e = \sigma T^4,$$

де  $\sigma$  – постійна Стефана – Больцмана,  $T$  – термодинамічна температура.

Знайдемо термодинамічну температуру за законом Віна:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \text{ звідси } T = \frac{b}{\lambda_{\max}}$$

де  $b$  – постійна закону зміщення Віна.  
Тоді знайдемо енергетичну випромінювання:

$$R_e = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4.$$

Після підстановки чисельних значень маємо:

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 3,54 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2 = 35,4 \text{ МВт/м}^2.$$

Відповідь:  $R_e = 35,4 \text{ МВт/м}^2$ .

## 3.10 ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ ТА АТОМНОЇ ФІЗИКИ

### 3.10.1 Питання, винесені на практичне заняття:

1. Корпускулярно-хвильва подвійність властивостей частинок речовини.
2. Формула де Бройля. Властивості хвиль де Бройля.
3. Співвідношення невизначеності Гайзенберга.
4. Хвильова функція. Рівняння Шредінгера.
5. Моделі атома Томсона і Резерфорда.
6. Лінійчатий спектр атом водню. Постулати Бора.
7. Принцип Паулі. Розподіл електронів у атомі за станами.
8. Основні властивості та будова ядра. Ядерні сили. Радіоактивність.

**3.10.2 Література:** [1] С.196-210, [2] С.149-173, [3 т.3], [4 ч.2], [5].

**3.10.3** Фотони, електрони та інші довільні частинки матерії поряд з корпускулярними властивостями володіють також хвильовими властивостями. Мікрочастинки через наявність хвильових властивостей відрізняються від тіл в класичній механіці, тому для опису їх поведінки основні рівняння класичної механіки непридатні. Стан мікрочастинок у квантовій механіці визначається хвильовою функцією, що є функцією координат та часу.

*3.10.3.1 При підготовці до практичних занять слід зрозуміти:*

- Кожній частинці, що володіє імпульсом відповідає хвильовий процес.

- З кожним мікрооб'єктом зв'язані з однієї сторони корпускулярні характеристики енергія  $E$  та імпульс  $p$ , а з іншої хвильові – частота  $\nu$  і довжина хвилі  $\lambda$ .
- Об'єкт мікросвіту не може з наперед заданою точністю одночасно характеризуватися імпульсом  $p$  та координатами  $(x, y, z)$ .
- У квантовій механіці стан мікрочастинок описується за допомогою хвильової функції, що являється основним носієм інформації про їх корпускулярні та хвильові властивості

3.10.3.2 Після закінчення вивчення теми слід знати:

1. В чому полягає корпускулярно-хвильова подвійність властивостей частинок речовини.
2. Формула хвилі де Бройля. Властивості хвиль де Бройля.
3. В чому полягає співвідношення невизначеності.
4. Визначення поняття хвильова функція.
5. Постулати Бора.
6. Закон квантування енергії електрона в атомі Бора.
7. Суть принципу Паулі.

3.10.3.3 Після закінчення вивчення теми слід запам'ятати:

1. Визначення основних понять: хвильова функція, спонтанне та вимушене випромінювання, радіоактивність, період напіврозпаду.
2. Постулати Бора.
3. Знати формули:

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ – довжина хвилі де Бройля}$$

$$p = \sqrt{2m_0E_k} \text{ – зв'язок імпульсу частинки з кінетичною енергією}$$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} \text{ – співвідношення невизначеності для координати та імпульсу}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \text{ – співвідношення невизначеності для енергії та часу}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{d\Psi}{dt} \text{ – рівняння Шредінгера}$$

$$E = h\omega = E_{n_2} - E_{n_1} \text{ – енергія випромінювання або поглинання атомом водню}$$

$$A = Z + N \text{ – масове число ядра}$$

$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$  – закон радіоактивного розпаду

$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$  – дефект маси ядра

$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$  – енергія зв'язку ядра

3.10.3.4. Розв'язати задані до дому задачі.

### 3.10.4. Приклади розв'язування задач

**Задача 8.1.** Визначити довжину хвилі де Бройля для електрона, що рухається по коловій орбіті атома водню, що знаходиться в основному стані.

<p><b>Дано:</b> <math>q = 1,6 \cdot 10^{-19}</math> Кл <math>m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}</math> кг</p> <hr/> <p><b>Знайти:</b> <math>\lambda_B</math></p>	<p><b>Розв'язання:</b></p> <p>Запишемо перший постулат Бора для першої орбіти:</p> $m_e \cdot V \cdot r = \frac{h}{2\pi},$
--	--

де  $m_e$  – маса електрона;  $V$  – швидкість електрона;  $r$  – радіус орбіти;  $h$  – постійна Планка,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

На електрон, що рухається по орбіті атома водню діє кулонівська сила:

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

де  $q$  – заряд електрона;  $\epsilon_0$  – електрична постійна,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>·Н. Сила що діє на електрон являється доцентровою та надає електрону прискорення

$$a = \frac{V^2}{r},$$

де  $V$  – швидкість електрона.

За визначенням другого закону Ньютона:

$$F = ma.$$

Підставляючи вираз кулонівської сили, що діє на електрон та формулу для прискорення електрона в останній вираз маємо:



$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e V^2}{r},$$

звідси радіус орбіти:

$$r = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 m_e V^2}.$$

Знайдемо швидкість електрона із першого постулату Бора, враховуючи вираз для радіусу орбіти:

$$V = \frac{q^2}{2\epsilon_0 h}.$$

Довжина хвилі де Бройля для будь-якої частинки визначається за формулою

$$\lambda_B = \frac{h}{p},$$

де  $p$  – імпульс частинки  $p = mV$ .

З урахуванням виразу швидкості електрона довжина хвилі де Бройля для електрона, що рухається на першій орбіті має вид:

$$\lambda_B = \frac{2h^2 \epsilon_0}{m_e q^2},$$

Після підстановки чисельних значень маємо:

$$\lambda_B = \frac{2 \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2} = 3,3 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Відповідь:  $\lambda_B = 3,3 \cdot 10^{-10}$  м.

**Задача 8.2.** Виходячи зі співвідношення невизначеностей, оцінити розміри ядра атома, вважаючи, що мінімальна енергія нуклона в ядрі 8 МеВ.

**Дано: Сі**

$$E_{\kappa} = 8\text{MeV} = 8 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

**Знайти:  $r$**

**Розв'язання:**

Співвідношення невизначеностей для координат та імпульсу має вигляд:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

Зв'язок імпульсу та енергії нуклона в ядрі:

$$\Delta p = \sqrt{2mE_{\kappa}}$$

Вважаючи, що  $\Delta x$  становить половину радіуса ядра атома, тобто

$$\Delta x = \frac{r}{2},$$

Звідки

$$\frac{r}{2} \sqrt{2mE_{\kappa}} \geq \frac{h}{2\pi}$$

Отже, радіус ядра

$$r = \frac{2h}{2\pi \sqrt{2mE_{\kappa}}} = \frac{h}{\pi \sqrt{2mE_{\kappa}}},$$

де  $h$  – постійна Планка,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $m$  – маса протона  $m_p$  або нейтрона  $m_n$  тобто їхні числові значення практично однакові:

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \text{ та } m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Виконуємо обчислення:

$$r = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{\pi \sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 8 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

Відповідь:  $r = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ .

**Задача 8.3.** Знайти енергію  $E$ , що поглинається під час реакції

$${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$$

**Дано:**  
 $m_N = 14,0067$  а.о.м.  
 $m_{He} = 4,00260$  а.о.м.  
 $m_H = 1,00783$  а.о.м.;  
 $m_O = 15,9994$  а.о.м.

**Знайти:**  $E$

**Розв'язання:**

Зміна енергії в ході ядерної реакції

$$\Delta E = c^2 (\sum m_1 - \sum m_2),$$

де  $\sum m_1$  – сума мас частинок, що вступили у реакцію;  
 $\sum m_2$  – сума мас частинок після реакції.

Тоді

$$\sum m_1 = m_{14}^7 N + m_4^2 He = 18,0093 \text{ а.о.м.},$$

$$\sum m_2 = m_1^1 H + m_{17}^8 O = 17,00723 \text{ а.о.м.}$$

Оскільки  $\sum m_1 < \sum m_2$ , то реакція йде з поглинанням тепла.  
 Після підстановки чисельних значень маємо:

$$E = 1,13 \text{ MeV}$$

Відповідь:  $E = 1,13 \text{ MeV}$

**Задача 8.4.** Обчислити дефект маси та енергію зв'язку ядра  ${}^7_3\text{Li}$ .

**Дано:**  
 ${}^7_3\text{Li} = 1,13$

**Знайти:**  $E, \Delta m$

**Розв'язання:**

Маса ядра завжди менше суми мас вільних протонів та нейтронів, з яких утворилось ядро. Дефект маси ядра  $\Delta m$  являє собою різницю між масою вільних нуклонів (протонів та нейтронів) та

масою ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a,$$

де  $Z$  – атомний номер (число протонів у ядрі);  $A$  – масове число (число нуклонів, що утворюють ядро);  $m_p, m_n, m_a$  – відповідно маси протона, нейтрона, ядра.

Маса нейтрального атома виражається наступним чином:

$$m_a = m_a + Zm_e,$$

звідси

$$m_{\text{я}} = m_{\text{а}} - Zm_{\text{е}}.$$

З урахуванням виразу для маси ядра рівняння дефекту мас має вид:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{а}} + Zm_{\text{е}}$$

або

$$\Delta m = Z(m_p + m_{\text{е}}) + (A - Z)m_n - m_{\text{а}}.$$

Оскільки  $m_p + m_{\text{е}} = m_{\text{H}}$ , де  $m_{\text{H}}$  – маса водню, рівняння дефекту мас кінцевий вид:

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{а}}.$$

Після підстановки чисельних значень маємо:

$$\Delta m = 3 \cdot 1,00783 + (7 - 3) \cdot 1,00867 - 7,01601 = 0,04216 \text{ а.о.м.}$$

Відповідно до закону пропорційності мас та енергії:

$$E = c^2 \Delta m,$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі.

Коефіцієнт пропорційності  $c^2$  може бути виражений двоюко:

$$c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2 / \text{с}^2 \text{ або } c^2 = \Delta E / \Delta m = 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг}.$$

При обчисленні величини  $E$  скористаємось позасистемними одиницями величини квадрата швидкості світла у вакуумі  $c^2 = 931 \text{ MeV/а.о.м.}$  З урахуванням цього формула для знаходження енергії зв'язку має вид:

$$E = 931 \Delta m \text{ MeV}$$

Після підстановки чисельних значень маємо

$$E = 931 \cdot 0,04216 = 39,2 \text{ MeV}$$

Відповідь:  $\Delta m = 0,04216 \text{ а.о.м.}, E = 39,2 \text{ MeV}$



## Література

### Основна:

1. Погожих М.І. Фізика та фізичні методи дослідження сировини та матеріалів: навч. посібник / М.І. Погожих, А.Л. Фощан, М.М. Цуркан. – Харків, ХДУХТ, 2008.
2. Фізика. Конспект лекцій. Частина 2. Електрика та магнетизм, колювання та хвилі, елементи хвильової оптики, квантові властивості випромінювання, елементи квантової механіки та атомної фізики. – Харків, ХДУХТ, 2004 р.
3. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: навч. Посібник / І.М. Кучерук. – Т. 1-3. – К.: Виша шк., 2006р.
4. Фізика: навчальний посібник у двох частинах / В.В. Куліш [та ін.]. – К.: Книжкове видавництво НАУ, 2005 р.
5. Загальна фізика. Збірник задач. За загальної редакцією І.Г.Горбачука. – К.: Виша шк., 1993 р.

### Додаткова:

6. Т.Ф. Бушок, Г.Ф. Півень, В.В. Левандовський Курс фізики: навч. посібник: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001 р. – 448 с.
7. Т.Ф. Бушок, Г.Ф. Півень, В.В. Левандовський Курс фізики: навч. посібник: Кн.2 Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001 р. – 448 с.
8. Курс фізики: навчальний підручник / І.Р. Зачек [та ін.]. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2002 р. – 376 с.
9. Трофимова Т.И. Краткий курс физики с примерами решения задач: учеб. пособие / Т.И. Трофимова. – М.: КНОРУС, 2007. – 280 с.
10. Соколович Ю.А. Физика. Справочник с примерами решения задач / Ю.А. Соколович, А.С. Богданова. – Харьков: “Ранок”, 2007.

### Навчально-методичні видання:

11. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики. Розділи «Механіка» та «Молекулярна фізика». – Харків, ХДУХТ, 2008р.
12. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики. Розділи «Електрика та магнетизм». – Харків, ХДУХТ, 2009р.
13. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики. Розділ «Оптика». – Харків, ХДУХТ, 2006 р.
14. Фотометрія у харчовій промисловості: спектрофотометрія, мікроскопія. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів. – Харків, ХДУХТ, 2004 р.

Навчальне видання

Укладачі:  
ПОГОЖИХ Микола Іванович  
ВОРОНЦОВА Жанна Вадимівна  
МІЩЕНКО Тетяна Володимирівна

## ФІЗИКА

Методичні вказівки для підготовки до практичних занять  
з дисципліни.

Частина II

Підп. до др. 19.01.2011	Формат 60x84 1/16
Папір газет. Друк офс.	Ум. друк арк. Обл.-вид. арк. 3.0
Ум. фабр. – відб 3,4	Тираж 100 прим. Зам.

---

Видпвець і виготовлювач  
Харківський державний університет харчування та торгівлі.  
Вул. Клочківська, 333, Харків, 61051.  
Свідоцтво суб'єктивної видавничої справи ДК №2319 від 19.10.2005 р.