



**Кафедра фізико-математичних дисциплін  
Національного університету цивільного захисту України**

# **ФІЗИКА**

**Методичні рекомендації з організації самостійної роботи  
студентів при вивченні дисципліни**

**Харків 2010**

Друкується за рішенням засідання  
кафедри фізико-математичних  
дисциплін НУЦЗУ  
Протокол від 11.05.10 № 10

**Укладачі:** В.Г. Борисенко, Ю.Ф. Деркач, В.І. Кривцова, К.Р. Умеренкова

**Рецензенти:** кандидат фізико-математичних наук С.Є. Кальний, доцент кафедри фізики ХУПС;  
доктор фізико-математичних наук О.П. Сознік, професор кафедри фізико-математичних дисциплін НУЦЗУ.

**Фізика:** Методичні рекомендації з організації самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни./ Укладачі: В.Г. Борисенко, Ю.Ф. Деркач, В.І. Кривцова, К.Р. Умеренкова – Х.: НУЦЗУ, 2010, 63 с.

Методичні рекомендації містять роз'яснення з підготовки до всіх видів аудиторних занять з дисципліни „Фізика” під час самостійних занять. Навчальне видання охоплює всі основні розділи курсу фізики для технічних вузів. Наведено загальні вимоги і рекомендації до самостійної роботи над дисципліною і видами занять, а також рекомендації до конкретних занять за модулями і темами дисципліни.

Навчальне видання призначено для слухачів Національного університету цивільного захисту України.

## ЗМІСТ

Передмова .....	4
Розділ I. Організаційно-методичні рекомендації до самостійної роботи над дисципліною „Фізика” .....	5
1.1. Предмет і мета дисципліни .....	5
1.2. Самостійна робота при підготовці до окремих видів занять .....	6
Розділ 2. Методичні рекомендації до самостійної роботи над модулями і темами дисципліни „фізика” .....	9
Вступ .....	9
Модуль 1. Фізичні основи механіки .....	10
Тема 1. кінематика .....	10
Тема 2. динаміка.....	13
Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „динаміка абсолютно твердого тіла” .....	16
Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „ робота та енергія. закон збереження енергії ” .....	17
Модуль 2. Статистична фізика. агрегатні стани речовини .....	20
Тема 3. Основи молекулярно-кінетичної теорії.....	20
Тема 4. Основи термодинаміки. ....	23
Тема 5. Агрегатні стани речовини.....	26
Модуль 3. Електростатика.....	27
Тема 6. Електричне поле. електростатика.....	27
Тема 7. Постійний електричний струм.....	34
Модуль 4. Магнітне поле. електромагнетизм. ....	38
Тема 8. Магнітне поле. магнітостатика. електромагнетизм. ....	38
Модуль 5. Коливання та хвилі. оптика .....	42
Тема 9. Коливання .....	42
Тема 10. Хвильові процеси. оптика. ....	45
Модуль 6. Квантова механіка. фізика атома та атомного ядра. ....	49
Тема 11. Елементи квантової механіки .....	49
Тема 12. Атомна та ядерна фізика.....	52

## ПЕРЕДМОВА

Сьогодні в Україні на законодавчому рівні вже затверджено систему стандартів з кожного освітньо-кваліфікаційного рівня та профілю підготовки. Стандарти за відповідним напрямом підготовки містять усі вимоги до компетентності та кваліфікаційну характеристику і системи діагностики якості знань. Для реалізації цих стандартів в системах освіти за основу пропонується прийняти систему обліку трудомісткості навчальної роботи в кредитах ECTS {Європейська система перезарахування кредитів (*залікових одиниць трудомісткості*)}, зробивши її нагромаджувальною системою, здатною працювати в рамках концепції «навчання впродовж усього життя». Однак, за своєю суттю ECTS жодним чином не регулює змісту, структури чи еквівалентності навчальних програм. Це є питаннями якості, яка повинна визначатися самими вищими навчальними закладами. На практиці реалізація ECTS приводить до значного збільшення долі самостійної роботи і, відповідно, зменшення долі аудиторного навантаження в навчальному процесі. Тому нагальним є питання як більш раціонально організувати самостійну роботу, зробити її більш ефективною, полегшити підготовку до всіх видів аудиторних занять.

Окрім того одна із основних цілей навчання у вищому навчальному закладі – це здобуття майбутніми спеціалістами вміння самостійно опанувати нові наукові і технічні досягнення, які реалізуються після закінчення навчання і впроваджувати їх в свою професійну діяльність. Для фахівців технічного профілю досягнення цієї мети неможливо без засвоєння дисципліни „Фізика”, яка має велике значення у формуванні сучасного світогляду і є основою науково-технічного прогресу.

Допомогти розв’язанню цих питань при викладанні дисципліни „Фізика” покликані дані методичні рекомендації. Засвоєння основних положень фізики найбільш ефективно відбувається в процесі самостійної роботи курсантів і студентів над навчальним матеріалом. Тому навчальним планом по вивченню дисципліни „Фізика” передбачено на одну годину занять під керівництвом викладача дві години самостійної роботи.

Структурно рекомендації розбито на дві частини. В першій наведені загальні вимоги і рекомендації до самостійної роботи над дисципліною і окремими видами занять, а в іншій частині – рекомендації до конкретних занять за темами дисципліни. Основними складовими за якими розбито самостійну роботу над дисципліною є модулі, а їх складовими елементами є теми. Самостійна підготовка до аудиторних занять за кожною темою та підготовка до модульного контролю і складає зміст рекомендацій.

Автори

# РОЗДІЛ I

## ОРГАНІЗАЦІЙНО – МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ НАД ДИСЦИПЛІНОЮ „ФІЗИКА”

### 1.1. ПРЕДМЕТ І МЕТА ДИСЦИПЛІНИ

Фізика є складовою природних наук і вивчає, поряд з ними основні закони навколишнього світу, основні властивості і форми руху матерії. В процесі вивчення природи фізика відштовхується від спостереження явищ, що дозволяє одержати якісне уявлення про предмет дослідження, виробити пояснення явища у вигляді гіпотези, справедливості якої може бути встановлена тільки експериментальним (дослідним) шляхом.

Дисципліна „Фізика” має за мету надання фундаментальних знань, що необхідні для глибокого засвоєння загальноінженерних та спеціальних дисциплін, для формування наукового світогляду та розвитку теоретичного мислення, для забезпечення базової підготовки з фізики, яка дозволить самостійно працювати з науково-технічною інформацією та літературою та використовувати ці знання на практиці.

Внаслідок вивчення дисципліни „Фізика” необхідно

#### ЗНАТИ:

1. Сутність основних фізичних явищ, законів та сучасних теорій, які потрібні для засвоєння загальноінженерних та спеціальних дисциплін.
2. Основні методи фізичних вимірювань та обробки їх результатів.

#### ВМІТИ:

1. Використовувати знання фізичних законів та уявлень при вивченні відповідних дисциплін та експлуатації техніки.
2. Проводити вимірювання фізичних величин та опрацьовувати їх результати, здійснювати належні розрахунки та оцінки похибок, обґрунтовувати зроблені висновки.

#### БУТИ ОЗНАЙОМЛЕНИМ:

1. З основами сучасного наукового світогляду.
2. З актуальними напрямками сучасної фізики.
3. З перспективами використання досягнень фізики у науці і техніці.

## **1. 2. САМОСТІЙНА РОБОТА ПРИ ПІДГОТОВЦІ ДО ОКРЕМИХ ВИДІВ ЗАНЯТЬ**

Вивчення дисципліни “Фізика” передбачає різні аудиторні форми навчальної роботи: лекції, практичні та лабораторні заняття. На лекціях забезпечується змістовне викладення теоретичного матеріалу дисципліни. Одержані на лекції знання закріплюються і поглиблюються на практичних та лабораторних заняттях.

На самостійних заняттях проводиться підготовка до всіх видів аудиторних занять та виконуються завдання викладача з метою закріплення одержаних знань та навичок.

### **Самостійна робота при підготовці до лекції і на лекціях**

До лекції необхідно підготувати загальний зошит в якому ведеться конспект лекцій (типовий формат  $235 \times 205$  мм<sup>2</sup>), ручку, олівець та лінійку. Для виділення заголовків, формул, визначень можна користуватись кольоровими фломастерами.

Важливим елементом самостійної роботи на лекції є ведення конспекту лекцій. Мета конспектування – відобразити в конспекті основний зміст лекції в меншому об’ємі ніж матеріал, що надається викладачем, але достатньому для повного розуміння законспектованого матеріалу і для подальшого вивчення або повторення його при самостійній підготовці до занять. Тому конспект повинен обов’язково містити: роз’яснення суті фізичних явищ, визначення основних фізичних величин; формулювання основних фізичних законів і положень, їх математичний вираз і трактування; опис фізичної моделі і формулювання задачі, логічний і математичний розв’язок (доведення), аналіз одержаного результату, його фізичний зміст і наслідки з нього. При конспектуванні обов’язково відобразити рисунки і графічні ілюстрації, які додають образного уявлення до аналітичної чи текстової інформації. Примітки та зауваження доцільно викладати на завчасно виділених полях конспекту.

Характерними ознаками задовільного конспекту є загальний об’єм 4-6 сторінок в зошиті вище згаданого формату, переважання об’єму текстової інформації над математичними викладками, використання скорочень і умовних позначень (стрілки, тощо), виділення заголовків, формул і визначень, наявність рисунків, графіків, схем, таблиць.

Особливо слід зауважити, що розуміння наступної лекції неможливе без засвоєння матеріалу попередніх лекцій. В зв’язку з цим на самостійній роботі, не чекаючи практичних чи лабораторних занять, необхідно обов’язково вивчати матеріали кожної лекції і розглядати це як підготовку до наступної лекції.

### **Самостійна робота при підготовці до практичних занять**

Проведення практичних занять з фізики має за мету:

- закріпити, поглибити та розширити знання, що отримані на лекціях, шляхом розв'язання вправ і задач;
- виробити уміння практичного застосування теоретичних знань при розв'язуванні конкретних фізичних задач.

Для досягнення цієї мети на самостійній роботі необхідно керуватись методичними рекомендаціями до відповідного практичного заняття (див. далі). Ці рекомендації містять:

- перелік навчальних питань, що виносяться на дане практичне заняття і за якими вивчається необхідний теоретичний матеріал;
- перелік літератури, необхідної для самостійної підготовки;
- контрольні питання та вправи які будуть задані викладачем для перевірки підготовки до заняття;
- розв'язок типової задачі за темою практичного заняття;
- перелік задач, що необхідно розв'язати на самопідготовці до наступного практичного заняття.

При підготовці до практичних занять і на самих заняттях необхідно мати окремий зошит, збірник задач, що рекомендований у переліку літератури та калькулятор відповідного рівня.

### **Самостійна робота при підготовці до лабораторних робіт**

Виконання лабораторних робіт з фізики має за мету:

- застосувати і закріпити теоретичні знання при експериментальному вивченні основних фізичних явищ;
- виробити практичні навички роботи з вимірювальною апаратурою і приладами, методами їх використання для вимірювання основних фізичних величин, оцінювання їх абсолютних значень та похибок вимірювання;
- виробити навички зображення результатів експерименту у вигляді графіків, таблиць і діаграм.

Частина вказаних вимог повинна бути реалізована за рахунок самостійної роботи. Зокрема, опрацювання (закріплення) теоретичного матеріалу, заочне ознайомлення із змістом експерименту та ходом виконання роботи виконується на самостійній підготовці *шляхом вивчення методичних рекомендацій* до відповідної роботи.

Оскільки результати виконання лабораторної роботи оформляються в лабораторному журналі, то перша частина журналу, що передуює виконанню вимірювань та обробці їх результатів повинна бути оформлена на самостійній підготовці до лабораторної роботи. Зокрема, необхідно, базуючись на матеріалі методичних рекомендацій, занести до журналу лабораторних робіт зміст наступних пунктів журналу: 1. Мета та стислий зміст роботи. 2. Схема експериментальної установки та метрологічне забезпечення. 3. Основні розрахункові формули. 4. Відповіді на контрольні запитання.



Як на самостійній роботі, так і при виконанні лабораторної виконуються розрахунки, тому необхідно мати калькулятор відповідного рівня.

Дозвіл на виконання лабораторної роботи надається після проведення попереднього тестування, а зарахування лабораторної роботи викладачем відбувається після перевірки результатів експерименту, їх оформлення в журналі та наступного опитування. Зарахування роботи завіряється підписом викладача в журналі лабораторних робіт.

### **Самостійна робота при підготовці до виконання модульних тестових завдань або контрольних робіт**

В цьому випадку самостійна робота полягає в повторенні всіх навчальних і контрольних питань, що розглядались на лекціях, практичних і лабораторних заняттях за темою відповідного модуля, а також задач, що розв'язувались на практичних заняттях і були задані для самостійного розв'язання. Необхідно також підготувати відповіді на типові тестові завдання і додаткові контрольні питання, якщо вони будуть задані викладачем перед модульним контролем.

### **Література**

#### **Основна література**

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1-3. – М. : Наука, 1989.
2. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1985. 384с.
3. Борисенко В. Г. ФІЗИКА. Практикум. Лабораторні роботи. Розділи: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електрика і магнетизм. – Харків: НУЦЗУ, 2010, 86с.

#### **Довідкова література**

4. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Справочник по физике. – М. : Наука, 1980. 512с.

#### **Додаткова література**

5. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики. т.1-3. – Київ: Техніка, 1999.
6. Трофимова Т. И. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1990. 542с.
7. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1968. 384с.
8. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. т. 1-2. – М.: Наука, 1981.
9. Горбачук І.Т. Загальна фізика (збірник задач). К., Вища школа, 1993. 359с.
10. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики с решениями. – М.: Высшая школа. 1999. 591с.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ НАД МОДУЛЯМИ І ТЕМАМИ ДИСЦИПЛІНИ „ФІЗИКА”

#### ВСТУП

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

Мета та побудова дисципліни “Фізика”. Зв’язок фізики з проблемами цивільного захисту при виникненні надзвичайних ситуацій. Навколишній світ, місце фізики в його пізнанні, метод фізичного дослідження. Загальні та фундаментальні поняття.

Комп’ютери в сучасній фізиці. Основні одиниці СІ. Фізичні вимірювання та обробка їх результатів.

**Завдання на самостійну роботу до лабораторного заняття**

***Лабораторна робота „Фізичні вимірювання та обробка їх результатів”***

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу:*

1. Типи вимірювань.
2. Обчислення похибок при прямих і непрямих вимірюваннях.
3. Особливості запису результатів вимірювань та побудова графіків.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

*Контрольні питання та вправи*

1. Дайте визначення прямих та непрямих вимірювань та наведіть приклади таких вимірювань.
2. Дайте визначення систематичної похибки і наведіть приклади визначення таких похибок в лабораторній роботі.
3. Дайте визначення випадкової похибки і наведіть приклади визначення таких похибок в лабораторній роботі.
4. Як обчислюється середнє арифметичне значення вимірюваної величини?
5. Як обчислюється абсолютна похибка даного вимірювання?
6. Дайте визначення відносної похибки.
7. Як обчислюється похибка при непрямих вимірюваннях?
8. В якій формі записується остаточний результат вимірювання?
9. Визначте систематичну похибку вимірювання напруги вольтметром, клас точності якого 0,5, а граничне значення шкали 150 В. Чому дорівнює відносна похибка виміру даним вольтметром напруги 30 В?
10. Запишіть результат виміру діаметра кульки якщо абсолютна похибка виміру дорівнює 0,19 см, а середнє значення діаметру – 2,427 см.

# МОДУЛЬ 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ

## Тема 1. Кінематика

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

- 1.1. Кінематичне рівняння руху. Прямолінійний і криволінійний рух.
- 1.2. Кінематичні характеристики руху матеріальної точки – швидкість та прискорення (дотичне, нормальне, повне).
- 1.3. Ступені вільності і кінематичне рівняння руху абсолютно твердого тіла (АТТ).
- 1.4. Типи рухів АТТ. Кінематика обертального руху АТТ.
- 1.5. Взаємозв'язок між кінематичними характеристиками поступального та обертального руху.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 1—5, 28-29.

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Кінематика матеріальної точки і абсолютно твердого тіла”**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Кінематика матеріальної точки.
2. Кінематика абсолютно твердого тіла.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 1-5, 28-29.

*Контрольні питання та вправи*

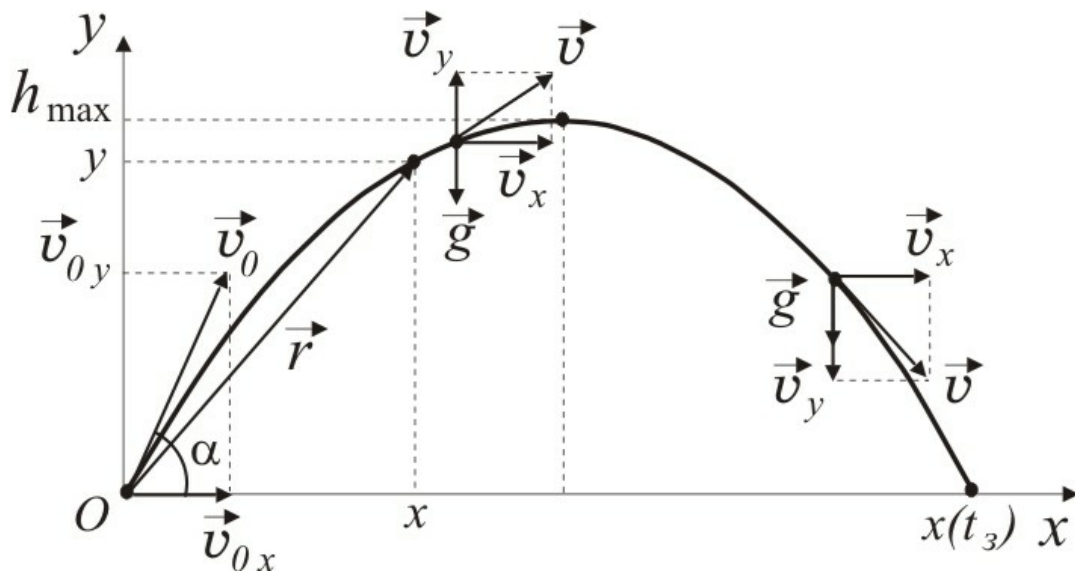
1. Дайте визначення кінематичного рівняння руху матеріальної точки та вкажіть способи його виразу.
2. Дайте визначення траєкторії, шляху, переміщення.
3. Дайте визначення швидкості точки (середньої і миттєвої). Як визначити величину та напрямок швидкості?
4. Дайте визначення прискорення точки (дотичного, нормального і повного). Як визначити їх величину та напрямок?
6. Дайте визначення числа ступенів вільності. Яке число ступенів вільності має АТТ?
7. Дайте визначення поступального та обертального руху.
8. Дайте визначення кінематичних характеристик обертального руху: елементарного кута повороту, кутової швидкості та кутового прискорення.
9. Укажіть зв'язок між лінійними та кутовими характеристиками руху.

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача 1.** Тіло кинуто під кутом  $\alpha$  до горизонту з швидкістю  $v_0$  з точки з координатами  $x_0 = y_0 = 0$ . Знайти залежність  $y = y(x)$ , тобто одержати рівняння траєкторії, якщо кінематичний закон руху має вигляд

$$\vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{g} t^2}{2}.$$

**Розв'язання:**



**Рис. 1**

Запишемо кінематичне рівняння руху у проекціях на осі  $x$  та  $y$  (рис.1)

$$\begin{aligned}x &= v_0 t \cos \alpha, \\ y &= v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.\end{aligned}$$

Виключимо з цих рівнянь час  $t$ , знайшовши з першого рівняння, що  $t = x/v_0 \cos \alpha$ . Підставивши це в друге рівняння одержимо

$$y = v_0 \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \sin \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}.$$

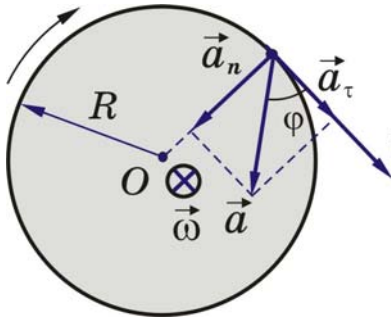
Звідси маємо рівняння траєкторії у вигляді

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}.$$

Отже, траєкторія є параболою.

**Задача 2. ([2], 1.58).** Знайти кутове прискорення колеса, якщо відомо, що за час  $t = 2,00$  с після початку руху вектор повного прискорення точки, яка лежить на ободі, складає кут  $\varphi = 60^\circ$  з вектором її швидкості. Вважати рух колеса рівноприскореним.

**Розв'язання:**



**Рис. 2**

З рисунка випливає, що

$$\frac{a_n}{a_\tau} = \operatorname{tg} \varphi.$$

З другого боку

$$\begin{aligned} a_n &= \omega^2 R, \\ a_\tau &= \varepsilon R. \end{aligned}$$

За умовою задачі рух рівноприскорений.

Тому

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$$

де  $\omega_0$  — початкова кутова швидкість. На початку руху  $\omega_0 = 0$ . Отже тангенс кута між вектором повного прискорення і вектором швидкості дорівнює

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_n}{a_\tau} = \frac{\varepsilon^2 t^2 R}{\varepsilon R} = \varepsilon t^2.$$

Звідси кутове прискорення визначається за виразом

$$\varepsilon = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{t^2} = \frac{\operatorname{tg} 60^\circ}{t^2} = \frac{\sqrt{3}}{4} \approx 0,433 \text{ рад/с}^2.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

**[2], 1.26.** З башти висотою  $h = 25$  м горизонтально кинуто камінь з швидкістю  $v_x = 15$  м/с. Який час  $t$  камінь буде знаходитись в русі? На якій відстані  $l$  від основи башти він впаде на землю? З якою швидкістю  $v$  він упаде на землю? Який кут  $\varphi$  складе траєкторія каменю з горизонтом в точці його падіння?

Відповідь:  $t = 2,66$  с;  $l = 33,9$  м;  $v = 40,51$  м/с;  $\varphi = 56^\circ$ .

**[2], 1.55.** Колесо радіусом  $R = 10$  см обертається з кутовим прискоренням  $\varepsilon = 3,14$  рад/с<sup>2</sup>. Визначити для точок на ободі колеса в кінці першої секунди після початку руху: а) величину кутової швидкості  $\omega$ ; б) величину лінійної швидкості  $v$ ; в) тангенціальне прискорення  $a_\tau$ ; г) нормальне прискорення  $a_n$ ; д) повне прискорення  $a$ ; е) кут  $\alpha$ , який складає вектор  $\vec{a}$  з вектором нормального прискорення  $\vec{a}_n$ .

Відповідь:  $\omega = 3,14$  рад/с;  $v = 0,314$  м/с;  $a_t = 0,314$  м/с<sup>2</sup>;  $a_n = 0,986$  м/с<sup>2</sup>;  $a = 1,03$  м/с<sup>2</sup>;  $\alpha = 17^\circ 46'$ .

## Тема 2. Динаміка

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

2.1. Динаміка матеріальної точки. Перший закон Ньютона. 2.2. Імпульс. Другий закон Ньютона. 2.3. Третій закон Ньютона. Види сил. 2.4. Закон збереження імпульсу.

2.5. Динаміка абсолютно твердого тіла (АТТ). Рух центра інерції АТТ. 2.6. Момент сили. Момент імпульсу. 2.7. Рівняння динаміки обертального руху АТТ. Момент інерції. 2.8. Довільний рух абсолютно твердого тіла. 2.9. Закон збереження моменту імпульсу.

2.10. Робота та потужність. 2.11. Кінетична енергія. 2.12. Потенціальні та непотенціальні сили. Потенціальна енергія. 2.13. Закон збереження енергії.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 6-16, 30-32, 26-27, 17-25, 33-34.

### **Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Динаміка матеріальної точки”**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Перший закон Ньютона. Інерціальні системи відліку.
2. Другий закон Ньютона. Імпульс. Сила та маса.
3. Третій закон Ньютона. Принцип суперпозиції сил.
4. Закон збереження імпульсу.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 6-16.

*Контрольні питання та вправи*

1. Сформулюйте перший закон Ньютона.
2. Чим відрізняються інерціальні та неінерціальні системи відліку?

Наведіть приклади таких систем.

3. Дайте визначення імпульсу матеріальної точки.
4. Сформулюйте другий закон Ньютона, використовуючи поняття:  
а) прискорення; б) імпульсу тіла; в) імпульсу сили.
5. Сформулюйте принцип суперпозиції сил.
6. Який фізичний зміст поняття маси?
7. Сформулюйте третій закон Ньютона. Чи можуть компенсувати одна одну сили, з якими тіла взаємодіють?
8. Вкажіть приклади сил різної природи та наведіть закони їх дії.
9. Сформулюйте закон збереження імпульсу.
10. Наведіть приклади прояви закону збереження імпульсу, проєкцій імпульсу.

11. Скласти у векторному вигляді та у проекціях на осі координат рівняння руху тіл у наступних випадках; а) брусок масою  $m$  тягнуть вздовж горизонтальної поверхні, сила натягу горизонтальна, коефіцієнт тертя дорівнює  $\mu$ ; б) тіло масою  $m$  падає у повітрі, сила тертя при цьому пропорційна швидкості руху; в) брусок масою  $m$  тягнуть вздовж похилої площини, що складає з горизонтом кут  $\alpha$ , сила натягу  $\vec{F}$  спрямована вздовж площини вгору, коефіцієнт тертя дорівнює  $\mu$ .

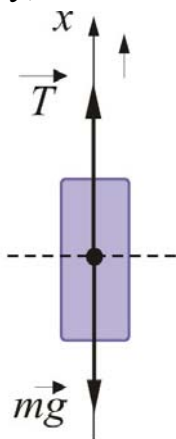
12. Запишіть вираз для сумарного імпульсу відносно нерухомої системи відліку такої системи тіл: по рухомій платформі масою  $m_1$ , що рухається прямолінійно, в напрямку руху іде людина масою  $m_2$ . Швидкість платформи відносно Землі  $v_1$ , швидкість людини відносно платформи  $v_2$ .

*Приклад розв'язання типової задачі*

**Задача 1.** Вантаж висить на сталевій дротині, яка витримує силу натягу  $T_{\max} = 6$  кН. Під час підйому вантажу масою  $m = 0,5$  т за час  $t = 0,5$  с від початку руху швидкість зростає до  $v_t = 0,8$  м/с. Визначити: а) силу натягу дротини; б) з яким максимальним прискоренням можна піднімати вантаж, щоб дротина не розірвалась?

**Розв'язання:**

Під час підйому вантажу з прискоренням на нього діють сила тяжіння  $m\vec{g}$  ( $\vec{g}$  – прискорення вільного падіння), що спрямована вертикально донизу, і сила натягу нитки  $\vec{T}$ , що спрямована вертикально вгору (рис.2).



а) Згідно з другим законом Ньютона рівняння руху вантажу у векторній формі має вигляд:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{T},$$

де  $\vec{a}$  – прискорення вантажу, що спрямоване вгору (оскільки швидкість при підйомі зростає). Звідси випливає, що рух вантажу з прискоренням буде відбуватися, коли сума сил  $m\vec{g} + \vec{T} \neq 0$  (тоді  $\vec{a} \neq 0$ ). У проекціях на вісь  $x$  маємо

**Рис. 3**

$$ma = T - mg,$$

звідки сила натягу дротини дорівнює

$$T = ma + mg = m(a + g).$$

Оскільки результуюча сила під час руху не змінюється, то рух буде рівноприскореним з прискоренням, що дорівнює за величиною

$$a = \frac{v_t - v_0}{t},$$

де  $v_0$  – початкова швидкість,  $v_t$  – кінцева швидкість,  $t$  – час, за який відбулась зміна швидкості. Оскільки  $v_0 = 0$ , одержимо для прискорення вираз  $a = v_t/t$ . Підставивши його у формулу для сили натягу дротини, знайдемо

$$T = m \left( \frac{v_t}{t} + g \right).$$

Використавши числові дані, одержимо

$$T = 500 \left( \frac{0,8}{0,5} + 9,81 \right) = 5705 \text{ Н};$$

б) очевидно, що для визначення максимального прискорення, за якого дротина не розірветься, необхідно покласти в рівнянні руху  $T = T_{\max} = 6 \text{ кН}$ . Тоді одержимо

$$ma_{\max} = T_{\max} - mg.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

**[2], 2.7.** Поїзд масою  $m = 500 \text{ т}$  рухається рівносповільнено і протягом часу  $t = 1 \text{ хв}$  зменшує свою швидкість з  $v_1 = 40 \text{ км/год}$  до  $v_2 = 28 \text{ км/год}$ . Знайти силу гальмування. Відповідь:  $F = 27,7 \text{ кН}$ .

**[2], 2.65.** Граната масою  $m = 1 \text{ кг}$ , що летить з швидкістю  $v = 10 \text{ м/с}$ , в найвищій точці траєкторії, розірвалась на дві частини. Менша частина масою  $m_1 = 0,4 \text{ кг}$  полетіла під кутом  $\alpha = 90^\circ$  до горизонту угору з швидкістю  $u_1 = 21,65 \text{ м/с}$ . Знайти напрямок руху і величину швидкості  $u_2$

більшої частини. Відповідь:

$u_2 = 22,05 \text{ м/с}$ ; під кутом  $\alpha = 40,53^\circ$  до горизонту униз.



## Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Динаміка абсолютно твердого тіла”

Питання, що виносяться на практичне заняття

1. Момент сили. Момент імпульсу.
2. Закон динаміки обертального руху абсолютно твердого тіла. Момент інерції.
3. Закон збереження моменту імпульсу.

Література: конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 30-32, 26-27.

Контрольні питання та вправи

1. Дайте визначення моменту сили: відносно точки, відносно осі обертання.
2. Як визначити напрям моменту сили? Навести приклади.
3. Дайте визначення моменту інерції відносно осі обертання. Які властивості тіла характеризує момент інерції? Від чого залежить значення моменту інерції тіла? Навести приклади.
4. Дайте визначення моменту імпульсу: відносно точки, відносно осі обертання.
5. Сформулювати основний закон динаміки обертального руху абсолютно твердого тіла.
6. Як описати довільний рух абсолютно твердого тіла?
7. Провести аналогію між рівняннями динаміки поступального руху матеріальної точки та обертального руху абсолютно твердого тіла.
8. Чому дорівнює момент сили  $\vec{F}$  відносно довільної точки  $O$  в випадках: а) вектор сили  $\vec{F}$  перпендикулярний до радіуса-вектора  $\vec{r}$ , що проведений від точки  $O$  до точки прикладання сили; б) вектор сили  $\vec{F}$  паралельний радіусу-вектору  $\vec{r}$ .

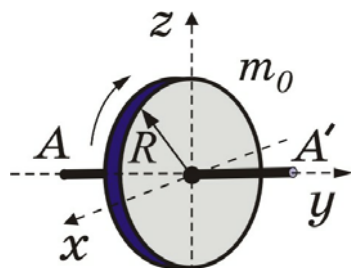


Рис. 4

На рисунку зображений диск, що обертається навколо невагомому валу  $AA'$ . Визначте момент інерції диску в позначеннях рисунка. Визначте напрямок вектора моменту імпульсу диску.

Приклад розв'язання типової задачі

**Задача 1.** Кут обертання валу змінюється за законом  $\varphi = 2t^2 + 5t + 2$  рад. Момент інерції валу дорівнює  $I = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Знайти обертальний момент.

**Розв'язання:**

Обертальний рух валу навколо довільної нерухомої осі  $x$  описується відомим рівнянням динаміки обертального руху твердого тіла, яке запишемо у вигляді

$$I\varepsilon = M_x,$$

де  $\varepsilon$  – кутове прискорення валу,  $M_x$  – невідомий обертальний момент. За визначенням кутове прискорення  $\varepsilon$  є друга похідна за часом від залежності  $\varphi(t)$ , тобто

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d}{dt}(4t + 5) = 4 \text{ рад/с}^2,$$

Підставивши (2) в (1), одержимо

$$M_x = 10 \cdot 4 = 40 \text{ Нм}.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2], 3.12. На барабан радіусом  $R = 0,5$  м намотаний шнур, до кінця якого прикріплений вантаж масою  $m = 10$  кг. Знайти момент інерції  $I$  барабана, якщо відомо, що вантаж опускається з прискоренням  $a = 2,04$  м/с<sup>2</sup>. Відповідь:  $I = 9,5$  кгм<sup>2</sup>.

[2], 3.44. Людина масою  $m_0 = 60$  кг знаходиться на нерухомій платформі масою  $m = 100$  кг. З якою частотою  $n$  буде обертатись платформа, якщо людина буде рухатись по колу радіусом  $r = 5$  м навколо осі обертання? Швидкість руху людини відносно платформи  $v_0 = 4$  км/год. Радіус платформи  $R = 10$  м. Вважати платформу однорідним диском, а людину матеріальною точкою. Відповідь:  $n = 0,49$  об/хв.

### **Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Робота та енергія. Закон збереження енергії”.**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

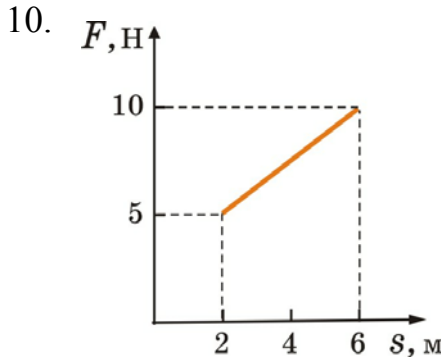
1. Робота та потужність.
2. Потенціальна та кінетична енергія.
3. Закон збереження механічної енергії.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 17-25, 33-34.

*Контрольні питання та вправи*

1. Які системи матеріальних точок називаються замкнутими, незамкнутими?
2. Дайте визначення: а) механічної роботи  $A$ ; б) потужності  $P$ . В яких одиницях вони вимірюються?
3. Який вид енергії має назву кінетичної?
4. Яке поле сил має назву потенціального? Наведіть приклади потенціальних сил.
5. Дайте визначення потенціальної енергії.

6. Які сили є не потенціальними? Наведіть приклади не потенціальних сил.
7. Дайте визначення механічної енергії.
8. Сформулюйте закон збереження енергії для системи матеріальних точок.
9. В чому відмінність роботи, коли: а) сила діє протилежно переміщенню; б) сила діє за напрямом переміщення; в) сила діє перпендикулярно переміщенню.



На рисунку зображений графік залежності змінної сили  $F$  від шляху  $s$ . Визначте величину роботи цієї сили.

**Рис.5**

*Приклад розв'язання типової задачі*

**Задача 1.** Знайти роботу, яку треба виконати, щоб збільшити швидкість руху тіла масою  $m = 1$  кг від  $v_1 = 2$  м/с до  $v_2 = 6$  м/с на шляху  $s = 10$  м. На всьому шляху діє стала сила тертя, що дорівнює  $F_{\text{тр}} = 2$  Н.

**Розв'язання:**

Рух тіла відбувається за наявності непотенціальних сил, тому робота, яку необхідно виконати витрачається не тільки на збільшення кінетичної енергії тіла, а ще і на роботу подолання сил тертя. Тому одержимо

$$A = \left( \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \right) + F_{\text{тр}} l = \left( \frac{1 \cdot 6^2}{2} - \frac{1 \cdot 2^2}{2} \right) + 2 \cdot 10 = 36 \text{ Дж}.$$

**Задача 2 ([2], 2.21).** В результаті зіткнення вагону масою  $m = 20$  т з нерухомою перешкодою кожний буфер вагону був стиснутий на  $l = 10$  см. Визначити швидкість з якою рухався вагон, якщо жорсткість пружини кожного буфера  $k = 1$  МН/м.

**Розв'язання:**

Можна вважати, що в системі діють лише потенціальні сили, тобто немає перетворення кінетичної енергії вагону на роботу подолання сил тертя, на пластичні деформації в перешкоді, тощо. Тоді, при зіткненні з перешкодою кінетична енергія руху вагону  $E_k = mv^2/2$  перетворюється в потенціальну енергію пружної деформації пружин двох буферів  $E_n = 2 \cdot kl^2/2$ , тобто має місце рівняння

$$\frac{mv^2}{2} = kl^2,$$

з якого одержимо

$$v = \sqrt{\frac{2kl^2}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6}{20 \cdot 10^3}} = 1 \text{ м/с}.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2], 2.67. Ковзаняр масою  $M = 70$  кг, стоячи на ковзанах, кидає в горизонтальному напрямі камінь масою  $m = 3$  кг зі швидкістю  $v = 8$  м/с. На яку відстань  $s$  відкотиться ковзаняр, якщо коефіцієнт тертя ковзання об лід  $k = 0,02$ ? Відповідь:  $s = 0,3$  м.

[2], 3.19. Куля масою  $m = 1$  кг, що котиться без ковзання, стикається зі стінкою і відкочується від неї. Швидкість кулі до зіткнення  $v_1 = 10$  м/с, після зіткнення  $v_2 = 8$  м/с. Знайти кількість теплоти, що виділиться при зіткненні зі стінкою. Відповідь:  $Q = 2,5$  мДж.

**Завдання на самостійну роботу до лабораторних занять**

**Лабораторна робота „Визначення моментів інерції тіл”**

*Питання, що виносяться на лабораторну роботу*

4. Рівняння динаміки поступального і обертального рухів.
5. Момент інерції тіл.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

**Лабораторна робота „Вивчення закону збереження моменту імпульсу”.**

*Питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Закон збереження моменту імпульсу.
2. Момент інерції тіл.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

**Лабораторна робота „Вимірювання швидкості тіла за допомогою балістичного маятника”.**

*Питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Закон збереження імпульсу.
2. Закон збереження енергії.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

**Завдання на самостійну роботу до тестового завдання за модулем 1.**

Ретельно повторити теоретичний матеріал за всім навчальними питаннями теми 1 ”Кінематика” і теми 2 „Динаміка”, повторити відповіді на контрольні питання практичних та лабораторних занять за цими темами. Необхідно також детально проаналізувати розв'язування типових задач і вправ до практичних занять, задачі, що розв'язувались на всіх практичних заняттях і які були задані для самостійного розв'язування до тем даного модулю.

## МОДУЛЬ 2. СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА. АГРЕГАТНІ СТАНИ РЕЧОВИНИ

### Тема 3. Основи молекулярно-кінетичної теорії.

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

Вступ. Термодинамічний та статистичний методи дослідження макросистем.

3.1. Положення молекулярно-кінетичної теорії. Модель ідеального газу. 3.2. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії. 3.3. Молекулярно — кінетичне тлумачення температури. 3.4. Рівняння стану ідеального газу.

3.5. Розподіл молекул в полі сил тяжіння. Розподіл Больцмана. 3.6. Поняття про розподіл Максвелла.

3.7. Явища переносу. Середня довжина вільного пробігу молекул та середня кількість їх зіткнень. 3.8. Дифузія, теплопровідність, внутрішнє тертя.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 59-64, 73-76, 78-80.

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття "Молекулярно-кінетична теорія і явища перенесення".**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Основи молекулярно-кінетичної теорії.
2. Статистичні розподіли.
3. Явища переносу.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 59-64, 73-76, 78-80.

*Контрольні питання та вправи*

1. Дайте визначення стану макроскопічної системи.
2. Сформулюйте основні положення молекулярно – кінетичної теорії.
3. Дайте визначення ідеального газу.
4. Запишіть та проаналізуйте основне рівняння молекулярно – кінетичної теорії.
5. Вкажіть зв'язок середньої кінетичної енергії молекули газу та абсолютної температури?
6. Вкажіть зв'язок між тиском і температурою ідеального газу.
7. Запишіть вираз для барометричної формули та проаналізуйте його.
8. Запишіть розподіл Больцмана та поясніть його фізичний зміст.
9. Запишіть розподіл Максвелла та поясніть його фізичний зміст.
10. За яких умов виникають явища перенесення?
11. За яких умов виникає явище внутрішнього тертя і за яким виразом визначається сила внутрішнього тертя?
12. За яких умов виникає явище теплопровідності і за яким виразом визначається кількість теплоти, що переноситься?
13. За яких умов виникає явище дифузії і за яким виразом визначається кількість речовини, що переноситься?

14. Знайдіть масу молекули азоту (молярна маса азоту  $\mu = 0,028$  кг/моль).

15. В посудині знаходиться 64 г розрідженого газу – кисню. Визначити: — яку кількості молів містить газ; — скільки молекул кисню знаходиться в посудині.

*Приклад розв'язання типової задачі*

**Задача 1 ([2], 5.62).** Енергія поступального руху молекул азоту, що знаходяться в балоні об'ємом  $V = 20$  л дорівнює  $\bar{\varepsilon} = 5$  кДж, а середня квадратична швидкість його молекул  $\sqrt{\overline{v^2}} = 2 \cdot 10^3$  м/с. Знайти: а) масу  $m$  азоту в балоні; б) тиск  $p$ , під яким він знаходиться.

**Розв'язання:**

а) Середня кінетична енергія поступального руху всіх молекул азоту в об'ємі

$$\bar{\varepsilon} = \frac{m\overline{v^2}}{2},$$

звідки

$$m = \frac{2\bar{\varepsilon}}{\overline{v^2}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^6} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

б) Згідно з основним рівнянням молекулярно – кінетичної теорії тиск газу виражається через середню кінетичну енергію однієї молекули

$$P = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2},$$

де  $m_0$  є маса однієї молекули газу, а добуток  $nm_0$  є густина газу. Якщо помножити обидві частини рівняння на об'єм  $V$ , то одержимо

$$PV = \frac{2}{3} nm_0 V \frac{\overline{v^2}}{2}.$$

Добуток  $nm_0 V = m$  і є маса всього об'єму газу, а добуток  $\frac{m\overline{v^2}}{2}$  є кінетична енергія всіх молекул об'єму. Тому одержимо для тиску

$$P = \frac{2\bar{\varepsilon}}{3V} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^3}{3 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 167 \text{ кПа}.$$

Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття):

[2], 5.55. Середня квадратична швидкість молекул ідеального газу  $\sqrt{v^2} = 450$  м/с. Тиск газу  $p = 50$  кПа. Знайти густину  $\rho$  газу за таких умов.

Відповідь:  $\rho = 0,74$  кг/м<sup>3</sup>.

[2], 5.93. Знайти середню арифметичну  $\bar{v}$ , середню квадратичну  $\sqrt{v^2}$  і найбільш імовірну  $v_i$  швидкості молекул газу, який за тиску  $p = 40$  кПа має густину  $\rho = 0,3$  кг/м<sup>3</sup>. Відповідь:  $\bar{v} = 579$  м/с,  $\sqrt{v^2} = 628$  м/с,  $v_i = 513$  м/с.

[2], 5.108, 5.109. Пасажирський літак виконує політ на висоті  $h_1 = 8300$  м. Для того, щоб не використовувати кисневі маски для пасажирів, в салоні за допомогою компресора підтримується тиск, що відповідає висоті  $h_2 = 2700$  м. Знайти:

а) різницю тисків  $\Delta P$  в середині літака та ззовні літака. Температуру навколишнього повітря вважати постійною і рівною  $t = 0^\circ \text{C}$ ;

б) в скільки разів густина повітря в літаку буде більше густини повітря за ним, якщо температура повітря ззовні літака  $t_1 = -20^\circ \text{C}$ , а в літаку –  $t_2 = 20^\circ \text{C}$ . Відповідь:  $\Delta P = 36$  кПа,  $\rho_2 / \rho_1 = 1,7$ .

## Тема 4. Основи термодинаміки.

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

4.1. Основні поняття термодинаміки. Стани і процеси. 4.2 Внутрішня енергія макросистеми та ідеального газу. 4.3. Робота та кількість теплоти. 4.4. Перший закон термодинаміки та його застосування до ізопроцесів. 4.5. Теплоємність ідеального газу. 4.6. Рівняння політропи та адіабатний процес. 4.7. Колові процеси (цикли). Теплова машина. ККД теплової машини. 4.8. Цикл Карно та його ККД. 4.9. Поняття про ентропію. Другий закон термодинаміки.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 65-72, 81-86.

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття "Перший закон термодинаміки. Процеси і цикли."**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Термодинамічні параметри. Функція процесу та функція стану.
2. Перший закон термодинаміки.
3. Ізопроцеси та адіабатний процес.
4. Колові процеси та теплові машини. ККД теплової машини і циклу Карно.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 65-72, 81-86.

*Контрольні питання та вправи*

1. Дайте визначення внутрішньої енергії. Як визначити внутрішню енергію ідеального газу?
2. Дайте визначення роботи, що виконується при зміні об'єму та кількості теплоти.
3. Які з даних вище визначень відносяться до функцій стану, а які – до функцій процесу?
4. Сформулюйте перший закон термодинаміки.
5. Дайте визначення процесів: ізотермічного, ізохорного, ізобарного, адіабатного.
6. Запишіть вираз першого закону термодинаміки для цих процесів.
7. Дайте визначення теплоємності тіла, молярної і питомої теплоємностей.
8. Чому для розріджених газів завжди  $c_p > c_v$ ?
9. Який процес має назву політропного, адіабатного? Запишіть рівняння цих процесів.
10. За яким виразом визначається показник політропи, адіабати?
11. Як змінюється температура газу при адіабатичному стисненні, розширенні?
12. Який процес має назву колового (циклу)?
13. Яка машина має назву теплової? Як визначити ККД теплової машини?



14. Який цикл має назву циклу Карно? Як визначити ККД циклу Карно?

*Приклад розв'язання типової задачі*

**Задача 1.** Внаслідок ізотермічного розширення маси  $m = 10$  г азоту з  $t = 17^{\circ}\text{C}$  була виконана робота  $A = 575$  Дж. В скільки разів зміниться тиск в результаті розширення?

**Розв'язання:**

Робота в ізотермічному процесі

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Співвідношення параметрів в ізотермічному процесі

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \text{або} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}.$$

Тому вираз для роботи приймає вигляд

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

Перетворимо останнє співвідношення

$$\frac{A}{\frac{m}{M} RT} = \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

В результаті одержимо

$$\frac{P_1}{P_2} = e^{\frac{A}{\frac{m}{M} RT}} = e^{\frac{575 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{0,01 \cdot 8,3 \cdot 290}} = 2,72.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2], 5.164. При ізобарному розширенні двохатомного газу була виконана робота  $A = 156,8$  Дж. Яку кількість теплоти  $Q$  було надано газу?

Відповідь:  $Q = 550$  Дж.

[2], 5.282. Знайти ККД карбюраторного двигуна внутрішнього згоряння, якщо показник політропи  $n = 1,33$  і ступінь стиснення: а)  $\frac{V_1}{V_2} = 4$ ; б)

$\frac{V_1}{V_2} = 6$ ; в)  $\frac{V_1}{V_2} = 8$ . Відповідь: а)  $\eta = 36,7\%$ ; б)  $\eta = 44,6\%$ ; в)  $\eta = 49,6\%$ .

**Завдання на самопідготовку до лабораторних занять**

**Лабораторна робота „Визначення показника адіапати повітря”.**

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Ізопроееси. Адіабатний процес.
2. Теплоємність ідеального газу в різних процесах.
3. Визначення показника адіабати повітря методом Клемана і Дезор-ма.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

**Лабораторна робота** „Вимірювання коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса”.

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Явища перенесення. В'язкість.
2. Вимірювання в'язкості рідини або газу методом Стокса.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

**Лабораторна робота** „Вимірювання коефіцієнта теплопровідності повітря”.

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Явища перенесення. Теплопровідність.
2. Метод вимірювання коефіцієнта теплопровідності повітря.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

## Тема 5. Агрегатні стани речовини

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

5.1. Взаємодія молекул та агрегатний стан речовини. 5.2. Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Критичний стан речовини. 5.3. Перехід в рідинний стан.

5.4. Рідинний стан речовини. Поверхневий шар рідини. Коефіцієнт поверхневого натягу. Сила поверхневого натягу. 5.5. Змочування. Меніск. Формула Лапласа.

5.6. Кристалічні та аморфні тіла. Тверде тіло. Дефекти кристалічної структури. Міцність.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.1, §§ 65-72, 87-94.

*Контрольні питання та вправи*

1. Проаналізуйте причини зміни агрегатного стану речовини.
2. Поясніть причини відхилення поведінки в різних процесах реальних газів від законів ідеального газу.
3. Проаналізуйте хід ізотерм для реального газу. Дайте визначення критичного стану речовини.
4. Поясніть механізм виникнення поверхневого натягу рідини.
5. Дайте визначення коефіцієнта поверхневого натягу. Яка його розмірність?
6. Запишіть формулу Лапласа і поясніть її фізичний зміст.
7. Які явища мають назву капілярних?
8. Чим відрізняються кристалічні тверді тіла від аморфних?
9. Які типи дефектів існують в реальних кристалах?

### **Завдання на самопідготовку до тестового завдання за модулем 2.**

Ретельно повторити теоретичний матеріал за всіма навчальними питаннями теми 3 ” Основи молекулярно-кінетичної теорії ”, теми 4 „ Основи термодинаміки ” і теми 5 „ Агрегатні стани речовини ”, повторити відповіді на контрольні питання практичних та лабораторних занять за цими темами. Детально проаналізувати розв’язування типових задач і вправ до практичних занять, задачі, що розв’язувались на всіх практичних заняттях і які були задані для самостійного розв’язування до тем даного модулю.

## МОДУЛЬ 3. ЕЛЕКТРОСТАТИКА

### Тема 6. Електричне поле. Електростатика

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

6.1. Електричний заряд та його властивості. Закон збереження електричного заряду. 6.2. Закон Кулона. 6.3. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції.

6.4. Робота сил електростатичного поля. Потенціальний характер електричного поля, потенціал. 6.5. Зв'язок між напруженістю та потенціалом електричного поля. 6.6. Диполь.

6.7. Потік вектора напруженості електростатичного поля. 6.8. Теорема Остроградського – Гауса для потоку вектора напруженості електричного поля. 6.9. Застосування теореми Остроградського – Гауса для розрахунків напруженості електростатичного поля.

6.10. Провідники та ізолятори (діелектрики). 6.11. Діелектрики в електричному полі. Поляризація діелектриків. Поле у діелектриках, діелектрична проникність. 6.12. Заряди та поле у провіднику. Напруженість поля та потенціал в області поблизу провідника. 6.13. Електроємність провідника. Конденсатори. 6.14. Енергія та густина енергії електростатичного поля.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т. 2, §§ 1-15, 18-23.

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття "Електричне поле у вакуумі".**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Закон Кулона.
2. Характеристики електростатичного поля в вакуумі.
3. Теорема Остроградського-Гауса для вектора напруженості електричного поля в вакуумі та її використання для розрахунку полів.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.2, §§ 1-11.

*Контрольні питання та вправи*

1. Сформулюйте закон збереження електричного заряду.
2. Сформулюйте та запишіть в скалярній та векторній формі закон Кулона.
3. Дайте визначення напруженості електричного поля. Сформулюйте принцип суперпозиції електричних полів.
4. Як визначається робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду?
5. Дайте визначення потенціалу електростатичного поля. Дайте визначення градієнту потенціалу електростатичного поля.
6. Вкажіть на зв'язок між напруженістю та потенціалом електростатичного поля.
7. Дайте визначення потоку вектора напруженості електричного поля.
8. Сформулюйте теорему Остроградського-Гауса для вектора напруженості електричного поля в вакуумі.

9. Наведіть приклади використання теореми Остроградського-Гауса для розрахунку полів.

10.

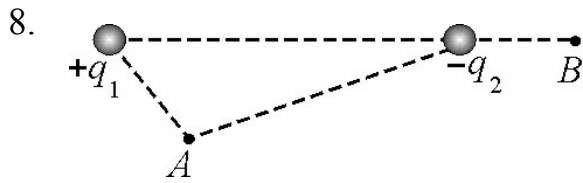


Рис. 6

На рис.6 два точкових заряди  $+q_1$  і  $-q_2$  створюють в навколишньому просторі електростатичне поле. Визначте напрямок напруженості електростатичного поля, що створюється обома зарядами в точках  $A$  та  $B$ .

9.

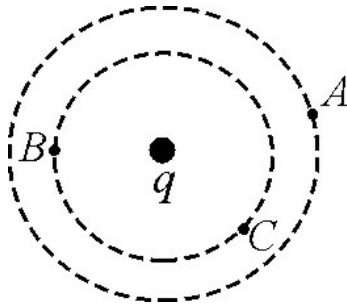


Рис. 7

На рис.7 точковий заряд  $q$  створює в навколишньому просторі електростатичне поле. Порівняйте роботи переміщення пробного заряду в полі точкового заряду  $q$  з точки  $A$  в точки  $B$  і  $C$ .

10. Який знак буде мати потік вектора напруженості електричного поля через замкнуту поверхню, що оточує два заряди  $+q_1$  та  $-q_2$ , якщо  $|q_1| < |q_2|$ ?

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача 1.** Дві однакові залізні кульки об'ємом  $V = 25 \text{ мм}^3$  підвішені в одній точці на тонких нитках довжиною  $l = 0,5 \text{ м}$  кожна. Одержавши однаковий заряд, вони, відштовхнувшись, розійшлись на відстань  $r = 5 \text{ см}$  між їх центрами. Визначити заряд кожної кульки.

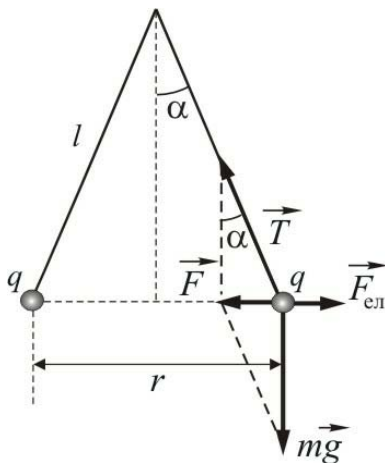


Рис. 8

**Розв'язання:**

На заряджену кульку діють сила тяжіння  $m\vec{g}$ , сила натягу нитки  $\vec{T}$  і сила електростатичної взаємодії  $\vec{F}_{\text{ел}}$ . Сила електростатичної взаємодії

$$F_{\text{ел}} = k \frac{q^2}{r^2},$$

де коефіцієнт  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ . Рівнодійна  $\vec{F}$  сил натягу  $\vec{T}$  і сили тяжіння  $m\vec{g}$ , згідно з рис. 8, дорівнює

$$F = mg \operatorname{tg} \alpha.$$

В стані рівноваги  $\vec{F}_{\text{ен}}$  компенсує рівнодійну  $\vec{F}$ , тому виконується рівність

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

Врахувавши, що маса кульки  $m = \rho V$  (густина заліза =  $7,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) і те, що

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha = \frac{r}{2l} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0,5},$$

з останнього рівняння одержимо

$$\begin{aligned} q &= \sqrt{mg \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^2 \cdot \frac{1}{k}} = \sqrt{\rho V g \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^2 \cdot \frac{1}{k}} = \\ &= \sqrt{\frac{7,9 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-9} \cdot 9,8 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,05}{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 0,5}} = \sqrt{269 \cdot 10^{-22}} = 16,4 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}. \end{aligned}$$

**Задача 2. ([2], 9.114).** Різниця потенціалів між пластинами плоского конденсатора  $U = 280$  В. Площа пластин  $S = 0,01$  м<sup>2</sup>, поверхнева густина заряду на пластинах  $\sigma = 495$  нКл/м<sup>2</sup>. Знайти: а) напруженість  $E$  електричного поля всередині конденсатора; б) відстань  $d$  між пластинами; в) швидкість  $v$ , яку одержить електрон, пройшовши в конденсаторі шлях від одної пластини до іншої; г) енергію  $W$  конденсатора; д) ємність  $C$  конденсатора; е) силу  $F$  притягання пластин.

**Розв'язання:**

а) Напруженість електричного поля між двома нескінченними різнойменно зарядженими пластинами з однаковою за модулем поверхневою густиною заряду  $\sigma$  визначається за виразом

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0},$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність речовини між пластинами конденсатора;  $\varepsilon_0$  – електрична стала. Підставивши числові значення маємо

$$E = \frac{495 \cdot 10^{-9}}{1,8,85 \cdot 10^{-12}} = 55,93 \cdot 10^3 \approx 56 \text{ кВ/м}.$$

б) Оскільки електричне поле між пластинами однорідне, то різниця потенціалів між ними  $U = Ed$ , звідки одержимо

$$d = \frac{U}{E} = \frac{280}{56 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \text{ мм}.$$

в) При русі електрона від однієї пластини до іншої робота електричного поля  $A$  перетворюється в кінетичну енергію  $W_k$  електрона, тому можна записати  $A = W_k$ , тобто

$$\frac{mv^2}{2} = eU$$

звідки

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 280}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 9,92 \cdot 10^6 \approx 10^7 \text{ м/с.}$$

г) Оскільки густина енергії електричного поля (енергія поля в одиниці об'єму) визначається за виразом  $w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 / 2$ , а об'єм між пластинами конденсатора  $V = Sd$ , то енергія електричного поля конденсатора дорівнює

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \sigma^2}{2(\varepsilon\varepsilon_0)^2} Sd = \frac{\sigma^2 Sd}{2\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Підставивши числові дані, одержимо

$$W = \frac{\sigma^2 Sd}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{495^2 \cdot 10^{-18} \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 692,1 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \approx 692 \text{ нДж}$$

д) Електроємність плоского конденсатора визначається за виразом

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,77 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

е) Напруженість електричного поля створеного однією пластиною конденсатора  $E = \sigma / 2\varepsilon\varepsilon_0$ . На кожний елементарний заряд  $dq$  іншої пластини конденсатора діє сила  $dF = Edq$  і оскільки всі  $d\vec{F}$  будуть однакові за напрямком і величиною, то повна сила, що діє на пластину дорівнює  $\vec{F} = \vec{E}q$ . Заряд пластини  $q = \sigma S$ , тому одержимо

$$F = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} \sigma S = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{495^2 \cdot 10^{-18} \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 138,43 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \approx 138 \text{ мкН.}$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2] 9.72. Електрон влітає в плоский горизонтально розміщений, конденсатор паралельно його обкладинкам зі швидкістю  $v_0 = 10^7$  м/с. Напруженість електричного поля в конденсаторі  $E = 10$  кВ/м, довжина конденсатора  $l = 5$  см. Знайти модуль і напрямок швидкості електрона при вильоті його з конденсатора.

Відповідь:  $v = 1,33 \cdot 10^7$  м/с;  $\alpha = 41^\circ$ .

[2] 9.79. Вісім заряджених крапель радіусом  $r = 1\text{ см}$  і зарядом  $q = 0,1\text{ нКл}$  кожна зливаються в одну загальну водяну краплю. Знайти потенціал  $\varphi$  великої краплі. Відповідь:  $\varphi = 3,6\text{ кВ}$ .

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття "Електричне поле в речовині. Енергія електричного поля".**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Провідники в електричному полі. Розподіл зарядів у провідниках. Напруженість поля та потенціал поблизу провідників.

2. Діелектрики в електростатичному полі. Поляризація діелектриків.

3. Енергія та густина енергії електричного поля.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.2, §§ 12-15, 18-23.

*Контрольні питання та вправи*

1. Які заряди мають назву вільних і зв'язаних?

2. В чому полягає явище поляризації діелектриків? Дайте визначення вектора поляризації.

3. Вкажіть зв'язок нормальної складової вектора поляризації з поверхневою густиною зв'язаних зарядів.

4. Дайте визначення діелектричної проникності.

5. Як пов'язані між собою діелектрична сприйнятливість та проникність?

6. Дайте визначення електричного зміщення і сформулюйте теорему Гауса для електричного зміщення.

7. Дайте визначення електроємності провідника, електроємності конденсатора.

8. Від яких параметрів залежить електроємність конденсаторів різної геометричної форми?

9. Як і від чого залежить енергія взаємодії системи точкових зарядів?

10. Як і від чого залежить енергія зарядженого конденсатора?

11. Дайте визначення густини енергії електричного поля. Як і від чого вона залежить?

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача.** Простір між пластинами плоского конденсатора повністю заповнено двома шарами діелектриків з діелектричними проникностями  $\varepsilon_1 = 6$  та  $\varepsilon_2 = 2$ , товщиною  $d_1 = 0,5\text{ мм}$  і  $d_2 = 1,5\text{ мм}$  відповідно. Площа пластин  $S = 0,2\text{ м}^2$ . Розрахувати ємність конденсатора. За якої напруги на обкладинках конденсатора відбудеться пробій, якщо напруженість пробою кожного з діелектриків дорівнюють відповідно  $E_{1\text{пр}} = 3 \cdot 10^5\text{ В/см}$  і  $E_{2\text{пр}} = 6 \cdot 10^5\text{ В/см}$ ? За якої напруги відбудеться пробій конденсатора, якщо між пластинами помістити тільки один з діелектриків?



**Розв'язання:**

I. 1) За визначенням електроємність

$$C = \frac{Q}{\Delta\varphi} = \frac{Q}{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}$$

Різниця потенціалів в області кожного діелектрика

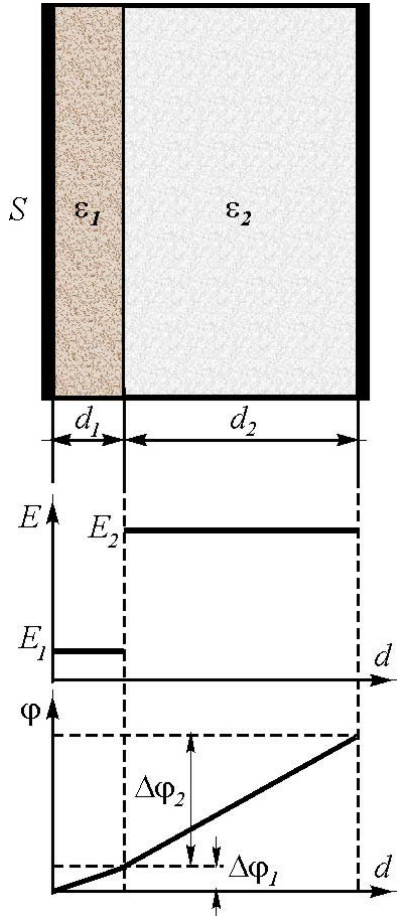


Рис. 9

$$\Delta\varphi_1 = E_1 d_1, \quad \Delta\varphi_2 = E_2 d_2,$$

де напруженості електричного поля

$$E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_1 \varepsilon_0} \quad \text{і} \quad E_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_2 \varepsilon_0}$$

відповідно.

Отже, електроємність конденсатора дорівнює

$$C = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma d_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_0} + \frac{\sigma d_2}{\varepsilon_2 \varepsilon_0}} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1} = 2,12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

2) Якщо конденсатор містить тільки діелектрик з проникністю  $\varepsilon_1$ , який його повністю заповнює, то електроємність конденсатора дорівнює

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d} = 5,31 \cdot 10^{-10} \text{ Ф.}$$

3) Якщо конденсатор містить тільки діелектрик з проникністю  $\varepsilon_2$ , який його повністю заповнює, його електроємність дорівнює

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d} = 1,77 \cdot 10^{-10} \text{ Ф.}$$

II. 1) Згідно з граничними умовами

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad \text{звідки} \quad E_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} E_2.$$

При збільшенні  $\Delta\varphi$  збільшуються  $E_1$  і  $E_2$  і, при деякому значенні  $\Delta\varphi'$ , значення  $E_2'$  досягне  $E_{2\text{пр}}$ . При цьому значення напруженості в першому діелектрику

$$E_1' = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} E_{2\text{пр}} = \frac{2}{6} \cdot 6 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 2 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

що менше  $E_{1пр}$ . Отже, за напруги  $\Delta\varphi'$  буде пробитий другий діелектрик і після цього вся напруга

$$\Delta\varphi' = E_{2пр}d_2 + E_1'd_1 = (6 \cdot 10^5 \cdot 1,5 + 2 \cdot 10^5 \cdot 0,5) \text{ В} = 10^6 \text{ В}$$

буде подана на перший діелектрик. Тому напруженість поля в першому діелектрику збільшиться до значення

$$E_1'' = \frac{\Delta\varphi'}{d_1} = \frac{10^6 \text{ В}}{0,5 \text{ см}} = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

що більше  $E_{1пр}$ . Це означає, що і перший діелектрик буде пробитий. Отже, напруга  $\Delta\varphi' = 10^6 \text{ В} = \Delta\varphi_{пр}$  є пробивною напругою за наявності в конденсаторі двох шарів діелектриків заданих розмірів.

2) Якщо конденсатор містить тільки діелектрик з проникністю  $\epsilon_1$ , що повністю його заповнює, то напруга пробою дорівнює

$$\Delta\varphi_{пр1} = E_{1пр}'d = 3 \cdot 10^5 \cdot 2 = 6 \cdot 10^5 \text{ В}.$$

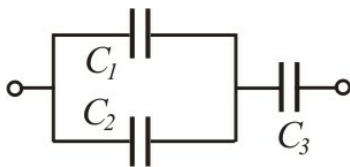
3) Якщо конденсатор містить тільки діелектрик з проникністю  $\epsilon_2$ , що повністю його заповнює, то напруга пробою дорівнює

$$\Delta\varphi_{пр2} = E_{2пр}d = 6 \cdot 10^5 \cdot 2 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ В}.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2], 9.76. Між пластинами плоского конденсатора, які знаходяться на відстані  $d = 5$  мм одна від одної, прикладена різниця потенціалів  $U = 150$  В. До однієї з пластин прилягає плоско паралельна пластинка фарфору товщиною  $d_1 = 3$  мм. Знайти напруженість електричного поля  $E_1$  в фарфорі та  $E_2$  в повітряному проміжку. Діелектрична проникність фарфору  $\epsilon_1 = 6$ .

Відповідь:  $E_1 = 10$  кВ/м;  $E_2 = 60$  кВ/м



[2], 9.100. Знайти загальну електроємність системи конденсаторів (рис.10). Електроємність кожного конденсатора дорівнює  $C_1 = C_2 = C_3 = 5$  мкФ.

Відповідь:  $C = 0,33$  мкФ

Рис. 10 [2], 9.115. Площа пластин плоского повітряного конденсатора  $S = 100 \text{ см}^2$  і відстань між ними  $d = 5$  мм. Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена до пластин конденсатора, якщо відомо, що при розряді конденсатора виділилась кількість тепла  $Q = 4,19 \cdot 10^{-3}$  Дж.

Відповідь:  $U = 21,7$  кВ.

## Тема 7. Постійний електричний струм

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

7.1. Електричний струм. Густина та сила струму.

7.2. Сторонні сили, електрорушійна сила, різниця потенціалів у колі постійного струму.

7.3. Закон Ома в диференціальній та інтегральній формах.

7.4. Паралельне, послідовне та змішане з'єднання електроопорів.

7.5. Правила Кірхгофа.

7.6. Класична теорія електропровідності металів. Залежність електроопору від температури. Надпровідність. 7.7. Розряд в газах. Поняття про плазму.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.2, §§ 24-34.

### **Завдання на самопідготовку до практичного заняття „Постійний струм. Закони Ома. Правила Кірхгофа.”**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Електричний струм та його характеристики.

2. Закони Ома та правила Кірхгофа.

3. Електропровідність металів.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.2, §§ 24-30.

*Контрольні питання та вправи*

1. Дайте визначення електричного струму.

2. Дайте визначення сили струму, густини струму.

3. Які сили мають назву сторонніх?

4. Дайте визначення електрорушійної сили і напруги.

5. Дайте визначення питомого опору та питомої електропровідності.

6. Запишіть закон Ома в диференціальній та інтегральній формі.

7. Як визначається електричний опір ділянки кола в випадку послідовного та паралельного з'єднань?

8. Сформулюйте перше та друге правила Кірхгофа.

9. Як залежить електричний опір металів від температури і яка фізична природа такої залежності?

10. Дайте визначення температурного коефіцієнта опору.

*Приклади розв'язання типових задач*

Задача 1. На кінцях мідного провідника довжиною  $l = 10$  м підтримується різниця потенціалів  $\Delta\varphi = 5$  В. Визначити середню швидкість  $v$  упорядкованого руху електронів. Вважати, що на кожний атом міді припадає по два вільних електрона.

### Розв'язання:

Згідно з законом Ома в диференціальній формі густина струму  $j = \sigma E$ , з іншого боку вона зв'язана з швидкістю  $v$  упорядкованого руху ривнянням  $j = nev$ . З цих двох рівнянь випливає, що

$$v = \frac{\sigma E}{en}.$$

Як відомо, питома електропровідність міді  $\sigma$  зв'язана з питомим електричним опором  $\rho$  обернено пропорційною залежністю, тобто  $\sigma = 1/\rho$ , а напруженість електричного поля в провіднику можна знайти за виразом  $E = \Delta\phi/l$ , тому вираз для швидкості руху набуває вигляду

$$v = \frac{\Delta\phi}{\rho enl}.$$

Концентрація вільних електронів у провіднику  $n = N_e/V$ , де  $N_e$  – їх загальна кількість, а  $V$  – об'єм провідника. Об'єм провідника  $V = Sl$ , де  $S$  – площа його поперечного перерізу, а загальна кількість вільних електронів  $N_e = 2N$ , де  $N$  – загальна кількість атомів міді в провіднику. Загальна кількість атомів міді дорівнює добутку числа молів  $\nu$  на число Авогадро  $N_A$ , тобто  $N = \nu N_A$ . Оскільки число молів  $\nu = m/\mu = \rho_m Sl/\mu$ , де  $m$  – маса провідника,  $\mu$  – молярна маса,  $\rho_m$  – густина міді, то враховуючи попередні міркування одержимо, що

$$N_e = 2 \frac{\rho_m Sl}{\mu} N_A,$$

а концентрація вільних електронів дорівнює

$$n = \frac{N_e}{Sl} = 2 \frac{\rho_m}{\mu} N_A.$$

Підставивши одержаний результат у вираз для швидкості, маємо

$$v = \frac{\Delta\phi \mu}{2\rho\rho_m e l N_A}.$$

За таблицями метрологічних даних і таблицями фізичних констант знайдемо: питомий опір міді  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, густина провідника (міді)  $\rho_m = 8,93 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, заряд електрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, молярна маса міді  $\mu = 63,54 \cdot 10^3$  кг/моль, число Авогадро  $N_A = 6,0 \cdot 10^{23}$  кг/моль. Отже, величина швидкості упорядкованого руху вільних електронів дорівнює

$$v = \frac{5 \cdot 63,54}{2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 8,93 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 6,0 \cdot 10^{23}} = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} .$$

**Задача 2.** На схемі, що зображена на рис. 11, джерела струму мають електрорушійні сили (ЕРС)  $\varepsilon_1 = 2 \text{ В}$  і

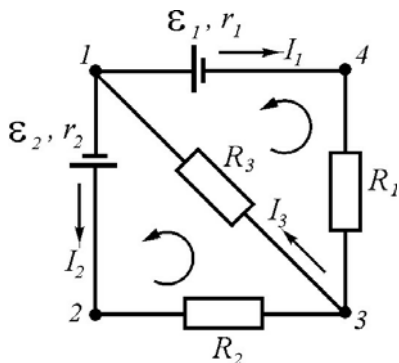


Рис. 11

$\varepsilon_2 = 1,9 \text{ В}$  та внутрішні опори  $r_1 = 1 \text{ Ом}$  і  $r_2 = 0,8 \text{ Ом}$  відповідно. Зовнішні опори  $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$  та  $R_3 = 45 \text{ Ом}$ . Знайти сили струмів  $I_1, I_2, I_3$  на кожній ділянці електричного кола.

**Розв'язання:**

Оскільки за умовою необхідно визначити три невідомі величини, то користуючись правилами Кірхгофа, запишемо три нееквівалентних рівняння, в які ці величини входять. Для цього, на вибраних замкнених контурах, наприклад 1341 та 1231, вкажемо довільно (рис.11) напрямки струмів і напрямки обходу контурів. При складанні рівнянь будемо керуватись наступними правилами: 1) силу струму, який виходить з вузла вважати додатною, силу струму, який входить до вузла – від'ємною; 2) якщо напрямок струму збігається з напрямком обходу контуру, то добуток  $IR$  в рівнянні записується зі знаком плюс, якщо не збігається – зі знаком мінус; 3) якщо при вибраному напрямку обходу контуру джерело струму проходиться в напрямку від мінуса до плюса, то відповідна електрорушійна сила джерела записується в рівнянні зі знаком плюс, в протилежному випадку – зі знаком мінус.

Тоді, згідно з першим правилом Кірхгофа для вузла 1 (рис.11) маємо

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 .$$

Згідно з другим правилом Кірхгофа для контуру 1341 одержимо

$$-I_3 R_3 + I_1 R_1 - I_1 r_1 = -\varepsilon_1 ,$$

а для контуру 1231

$$I_3 R_3 + I_2 R_2 + I_2 r_2 = \varepsilon_2 .$$

Підставивши в ці рівняння числові значення ЕРС та опорів, маємо

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 ,$$

$$45 I_3 + 11 I_1 = 2 ,$$

$$45 I_3 + 10,8 I_2 = 1,9 .$$

Розв'язавши ці рівняння, знайдемо, що  $I_1 = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ А}$ ,  $I_2 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ А}$ ,  $I_3 = 3,9 \cdot 10^{-2} \text{ А}$ .

Позитивні значення струмів свідчать, що їх напрямки були вибрані вірно. Якби деякий з одержаних струмів мав би від'ємний знак, то це означало б, що в дійсності його напрямок протилежний тому, який довільно було вибрано.

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

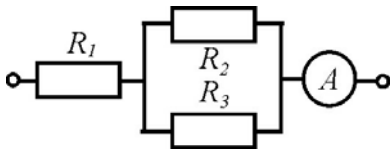


Рис. 12

[2], 10.11. Знайти падіння потенціалу  $U$  в опорах  $R_1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$  і  $R_3 = 4 \text{ Ом}$  (рис. 12), якщо амперметр показує силу струму  $I = 3 \text{ А}$ . Знайти силу струму  $I_2$  в опорі  $R_2$  і силу струму  $I_3$  в опорі  $R_3$ .

Відповідь:  $U_1 = 12 \text{ В}$ ;  $U_2 = U_3 = 4 \text{ В}$ ;  $I_2 = 2 \text{ А}$ ;  $I_3 = 1 \text{ А}$ .

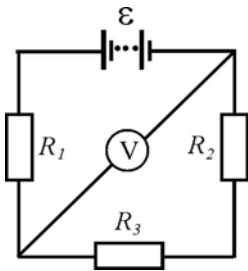


Рис. 13

[2], 10.31. ЕРС батареї (рис.13)  $\varepsilon = 100 \text{ В}$ , опори  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 200 \text{ Ом}$  та  $R_3 = 300 \text{ Ом}$ , опір вольтметра  $R_v = 2 \text{ кОм}$ . Яку різницю потенціалів показує вольтметр.

Відповідь:  $U = 80 \text{ В}$ .

### Завдання на самостійну роботу до лабораторних занять

**Лабораторна робота** „Вивчення електричного поля постійного струму”.

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Електричне поле та його характеристики.
2. Стаціонарне поле струму та методика експериментального визначення його характеристик.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

**Лабораторна робота** „ Вивчення процесів зарядження та розрядження конденсатора ”.

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Квазістаціонарні електричні процеси.
2. Експериментальне вивчення процесів зарядження та розрядження конденсатора.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

### Завдання на самостійну роботу до тестового завдання за модулем 3.

Ретельно повторити теоретичний матеріал за всім навчальними питаннями теми 6 ”Електричне поле. Електростатика” і теми 7 „Постійний електричний струм”, повторити відповіді на контрольні питання практичних та лабораторних занять за цими темами. Необхідно також детально проаналізувати розв'язування типових задач і вправ до практичних занять, задачі, що розв'язувались на всіх практичних заняттях і які були задані для самостійного розв'язування до тем даного модулю.

## МОДУЛЬ 4. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.

### Тема 8. Магнітне поле. Магнітостатика. Електромагнетизм.

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

8.1. Сили взаємодії зарядів при їх русі. Релятивістська природа магнетизму 8.2. Вектор магнітної індукції. Принцип суперпозиції 8.3. Закон Біо–Савара–Лапласа. Магнітні поля найпростіших систем. 8.4. Теорема про циркуляцію індукції магнітного поля. Магнітне поле соленоїда.

8.5. Сила Лоренца. Рух зарядженої частинки у магнітному полі. 8.6. Закон Ампера. Взаємодія провідників зі струмом. 8.7. Контур із струмом у магнітному полі. 8.8. Магнітний потік. 8.9. Магнітне поле в речовині. Напруженість магнітного поля. Поля в магнетиках та класи магнетиків

8.10. Явище електромагнітної індукції. Закон Фарадея. 8.11. Вихрове електричне поле та вихрові струми. 8.12. Самоіндукція та взаємоіндукція. Індуктивність. 8.13. Густина енергії магнітного поля.

*Література:* конспект лекцій, [1] – §§ 35-40, 42, 47-48, 51-58, 60.

### **Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Характеристики магнітного поля. Сила Лоренца та сила Ампера. Електромагнітна індукція.”**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Закон Біо-Савара-Лапласа і його застосування для розрахунку магнітних полів.

2. Сила Лоренца і сила Ампера.

3. Електромагнітна індукція. Закон Фарадея.

4. Енергія магнітного поля.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.2, §§ 35-40, 42, 47-48, 51-58, 60.

*Контрольні питання та вправи*

1. Дайте визначення магнітної індукції.

2. Сформулюйте закон Біо-Савара-Лапласа.

3. Вкажіть величину та напрямок магнітного поля прямого та кругового струму.

4. В яких випадках діє сила Лоренца? Як визначити її величину і напрямок?

5. По якій траєкторії рухається заряджена частинка, що влітає в магнітне поле перпендикулярно його напрямку? Як і від чого залежать параметри даної траєкторії?

6. В яких випадках діє сила Ампера? Як визначити її величину і напрямок?

7. Дайте визначення магнітного потоку.

8. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.

9. Сформулюйте правило Ленца.

10. Дайте визначення індуктивності. Як і від яких параметрів залежить індуктивність соленоїда?

11. Дайте визначення густини енергії магнітного поля. Від яких характеристик магнітного поля вона залежить?

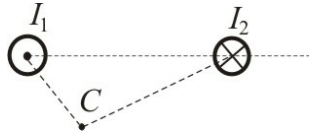


Рис. 14

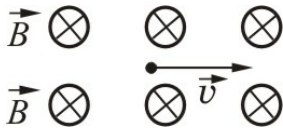


Рис. 15

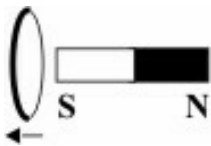


Рис. 16

12. На рис. 14 наведені перерізи двох нескінченно довгих провідників з струмом. Вкажіть напрямок вектора індукції  $\vec{B}$  магнітного поля, що створюється струмами  $I_1$  та  $I_2$  в точках А і С.

13. Вкажіть напрямок сили Лоренца, що діє на електрон (рис.15), якщо його швидкість  $\vec{v}$  перпендикулярна вектору магнітної індукції  $\vec{B}$ .

14. Вкажіть напрямок індукційного струму в провідному контурі, при переміщенні цього контуру в полі постійного магніту за напрямом вказаним стрілкою (рис. 16).

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача 1.** Струм силою  $I = 20$  А, спрямований по довгому провіднику, що зігнутий під прямим кутом (рис. 17). Знайти індукцію магнітного поля в точці А, що лежить на бісектрисі прямого кута. Відстань від вершини кута до точки А дорівнює  $r = 10$  см.

Розв'язання:

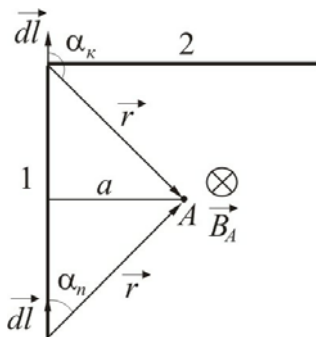


Рис. 17

Якщо розділяти провідник на вертикальну та горизонтальну частини, магнітна індукція поля в довільній точці може бути знайдена, як суперпозиція (векторна сума) магнітних індукцій полів, що створені ділянками 1 ( $\vec{B}_1$ ) і 2 ( $\vec{B}_2$ ) провідника, тобто  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ . Оскільки вони напівнескінченні, то, очевидно, необхідно використати вираз для магнітної індукції поля, створеного скінченним провідником

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_n - \cos \alpha_k),$$

де  $a$  – відстань від розглядуваної точки поля до провідника з струмом;  $\alpha_n$  і  $\alpha_k$  – кути, що створені радіус-векторами, спрямованими, відповідно, з початку та кінця провідника до цієї точки і відповідним елементом струму.

Для ділянки 1  $\alpha_{1пд} = 0$ , а  $\alpha_{1кд} = 135^\circ$ , для ділянки 2  $\alpha_{2пд} = 45^\circ$ , а  $\alpha_{2кд} = 180^\circ = \pi$ . Відстань від точки А до кожної з ділянок  $a = r \cos 45^\circ = r/\sqrt{2}$ . Підставивши дані в попередню формулу для магнітної індукції, одержимо



$$B_{1A} = \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{4\pi r} (\cos 0^\circ - \cos 135^\circ) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r \sqrt{2}} \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right),$$

$$B_{2A} = \frac{\mu_0 I \sqrt{2}}{4\pi r} (\cos 45^\circ - \cos 180^\circ) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r \sqrt{2}} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right).$$

Оскільки  $|\vec{B}_1| = |\vec{B}_2|$ , а напрямок магнітних індукцій полів (згідно з правилом правого гвинта), що створюються ділянками 1 і 2 в точці  $A$  однаковий (за малюнок "від нас"), то результуюча магнітна індукція в точці  $A$  дорівнює

$$B_A = B_{1A} + B_{2A} = \frac{\mu_0 I}{\pi r \sqrt{2}} \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

**Задача 2.** Котушку з індуктивністю  $L = 3 \text{ Гн}$  з'єднали з джерелом струму, електрорушійна сила якого дорівнює  $\mathcal{E} = 15 \text{ В}$ . Через який проміжок часу  $t$  сила струму в котушці досягне значення  $I = 5 \text{ А}$ . Опором котушки і джерела струму знехтувати.

Розв'язання:

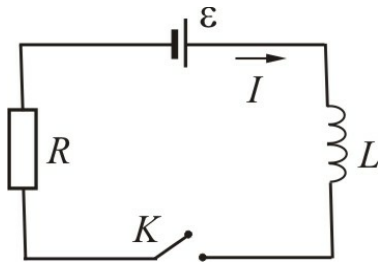


Рис. 18

При наростанні струму в колі (рис. 18) виникає ЕРС самоіндукції, тому згідно з другим правилом Кірхгофа  $\mathcal{E} + \mathcal{E}_c = 0$ , де  $\mathcal{E}_c$  – ЕРС самоіндукції. ЕРС самоіндукції протидіє зростанню сили струму в колі і дорівнює

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}.$$

З цього рівняння, враховуючи що  $\mathcal{E}_c = -\mathcal{E}$ , одержимо

$$dI = \frac{\mathcal{E}}{L} dt,$$

Після інтегрування маємо

$$I = \frac{\mathcal{E}}{L} t.$$

Отже, з останнього знайдемо необхідний час

$$t = \frac{IL}{e} = \frac{5 \cdot 3}{15} = 1 \text{ с.}$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2], 11. 26. Нескінченно довгий дріт утворює кругову петлю, дотичну до дроту. Дротом іде струм силою  $I = 5 \text{ А}$ . Знайти радіус  $R$  петлі, якщо відомо, що напруженість магнітного поля в центрі петлі  $H = 41 \text{ А/м}$ .

Відповідь:  $R = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

[2], 11. 70. Електрон прискорюється різницею потенціалів  $U = 300 \text{ В}$  і рухається паралельно прямолінійному довгому дроту на відстані  $r = 4 \text{ мм}$  від нього. Яка сила діє на електрон, якщо дротом тече струм силою  $I = 5 \text{ А}$ ?  
Відповідь:  $F = 4 \cdot 10^{-16} \text{ Н}$ .

[2], 11. 94. Котушка діаметром  $d = 10 \text{ см}$  має  $N = 500$  витків і розташована в магнітному полі так, що площина витків перпендикулярна напрямку поля. Чому дорівнює середнє значення ЕРС індукції  $\varepsilon_i$  в цій котушці, якщо магнітна індукція поля збільшується на протязі часу  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$  від початкового значення  $B_0 = 0$  до кінцевого значення  $B_k = 2 \text{ Тл}$ ?

Відповідь:  $\varepsilon_i = 78,5 \text{ В}$ .

[2], 11. 112. Соленоїд довжиною  $l = 50 \text{ см}$  і площею поперечного перерізу  $S = 2 \text{ см}^2$  має індуктивність  $L = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$ . При якій силі струму  $I$  об'ємна густина енергії магнітного поля всередині соленоїда  $w = 10^{-3} \text{ Дж/м}^3$ ?

Відповідь:  $I = 1 \text{ А}$ .

### **Завдання на самостійну роботу до лабораторного заняття**

*Лабораторна робота „Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі”.*

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

3. Магнітне поле Землі та елементи земного магнетизму.

4. Метод визначення горизонтальної складової магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи, [3].

### **Завдання на самостійну роботу до тестового завдання за модулем 4.**

Ретельно повторити теоретичний матеріал за всіма навчальними питаннями теми 8 „Магнітне поле. Магнітостатика. Електромагнетизм”, повторити відповіді на контрольні питання практичних та лабораторних занять за цією темою. Необхідно також детально проаналізувати розв'язування типових задач і вправ до практичних занять, задач, що розв'язувались на всіх практичних заняттях і які були задані для самостійного розв'язування до теми даного модулю.

## МОДУЛЬ 5. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ. ОПТИКА

### Тема 9. Коливання

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

9.1. Типи коливальних систем та види коливань. 9.2. Гармонічні коливання, амплітуда, частота та фаза гармонічних коливань. 9.3. Додавання коливань.

9.4. Поняття про гармонічний осцилятор. 9.5. Власні незгасаючі та згасаючі коливання. Маятники. 9.6. Енергія коливань. 9.7. Вимушені коливання.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т. 2, §§ 63-71.

**Завдання на самопідготовку до практичного заняття „Кінематика та динаміка коливань”.**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Гармонічні коливання.
2. Додавання коливань.
3. Власні (вільні) коливання.
4. Вимушені коливання.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т. 2, §§ 63-71.

*Контрольні питання та вправи*

2. Які коливання мають назву гармонічних? Запишіть рівняння гармонічного коливання і поясніть фізичний зміст величин, що входять до нього (амплітуда, період, частота, циклічна частота, фаза).

3. Як зображати гармонічні коливання за допомогою векторних діаграм?

4. Як знайти амплітуду та початкову фазу коливання, що є результатом додавання двох гармонічних коливань одного напрямку та однакової частоти?

5. Який результат додавання двох гармонічних коливань одного напрямку та різної (близької) частоти?

6. Який результат додавання двох взаємно перпендикулярних коливань однакової частоти?

7. Яка сила має назву зворотної?

8. Які коливання мають назву вільних? Запишіть диференціальне рівняння вільних незгасаючих коливань та поясніть фізичний зміст величин, що входять до нього.

9. Запишіть диференціальне рівняння згасаючих коливань та поясніть фізичний зміст величин, що входять до нього.

10. Дайте визначення таких характеристик згасаючих коливань як: а) логарифмічний декремент згасання; б) час релаксації; в) добротність.

11. Які коливання мають назву вимушених?

12. Запишіть диференціальне рівняння вимушених коливань та поясніть фізичний зміст величин, що входять до нього.

13. Знайдіть максимальну швидкість та максимальне прискорення матеріальної точки, якщо рівняння її коливань має вигляд  $y = 3 \cos(5\pi t + \pi/2)$ .

14. Яка амплітуда результуючого коливання, якщо рівняння складових коливань одного напрямку мають вигляд  $x_1 = 3 \cos \pi t$ ,  $x_2 = 5 \cos \pi t$ .

15. Визначте амплітуду результуючого коливання, яке одержане додаванням коливань однакового напрямку, рівняння яких має вигляд  $x_1 = 5 \sin \pi t$  і  $x_2 = 3 \sin(\pi t + \pi/2)$ , де  $x_1$  і  $x_2$  вимірюються в метрах.

16. Точка приймає участь в двох взаємно перпендикулярних коливаннях, рівняння яких має вигляд  $y = 3 \cos(\pi t + \pi/2)$ ,  $x = 2 \cos \pi t$ . Знайти траєкторію результуючого коливання.

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача.** Через який час після початку руху точка, що виконує синусоїдальні гармонічні коливання, зміститься з положення рівноваги на половину амплітуди. Період коливань дорівнює 24 с, початкова фаза дорівнює нулю.

Розв'язання:

Оскільки початкова фаза  $\varphi_0 = 0$ , рівняння гармонічних коливань має вигляд

$$x = A \sin \omega t.$$

Згідно з умовою задачі, в невідомий момент часу  $t_1$  зміщення з положення рівноваги  $x = A/2$ , тому

$$\frac{A}{2} = A \sin \omega t_1,$$

звідки

$$\sin \omega t_1 = \frac{1}{2}.$$

Циклічна частота коливань зв'язана з періодом коливань співвідношенням  $\omega = 2\pi / T$ . Тому маємо

$$\omega t_1 = \frac{2\pi}{T} t_1 = \pi/6.$$

Отже

$$t_1 = \frac{T}{12} = \frac{24}{12} = 2 \text{ с}.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2], 12. 20. Повна механічна енергія тіла, що гармонічно коливається,  $W = 3 \cdot 10^{-5}$  Дж; максимальна сила, що діє на тіло,  $F_{\max} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Н. Запишіть рівняння гармонічних коливань тіла, якщо період коливань  $T = 2$  с і початкова фаза  $\varphi_0 = 60^\circ$ . Відповідь:  $x(t) = 0,04 \left( \pi t + \frac{\pi}{3} \right)$  м.

[2], 12. 38. Точка приймає участь в двох гармонічних коливаннях з однаковими періодами і однаковими початковими фазами. Амплітуди коливань  $A_1 = 3$  см і  $A_2 = 4$  см. Знайти амплітуду результуючого коливання, якщо: 1) коливання відбуваються в одному напрямку; 2) коливання взаємно перпендикулярні. Відповідь: 1)  $A_{p1} = 0,07$  м; 2)  $A_{p2} = 0,05$  м.

[2], 14. 10 (п.1-3). Електроємність конденсатора коливального контуру  $C = 7$  мкФ, індуктивність котушки  $L = 0,23$  Гн і опір  $R = 40$  Ом. Конденсатор заряджений, величина заряду  $q = 5,6 \cdot 10^{-4}$  Кл. 1) Знайдіть період коливань контуру. 2) Знайдіть логарифмічний декремент згасання. 3) Запишіть рівняння залежності різниці потенціалів на обкладинках конденсатора від часу.

Відповідь: 1)  $T = 8 \cdot 10^{-3}$  с; 2)  $\lambda = 87$ ; 3)  $U(t) = 80e^{-87t} \cos 250\pi t$  В.

**Завдання на самостійну роботу до лабораторного заняття**

**Лабораторна робота „Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного та фізичного маятників”.**

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Математичний та фізичний маятники.
2. Метод визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного та фізичного маятників.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи.

## **Тема 10. Хвильові процеси. Оптика.**

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

10.1. Поняття про хвилі, види хвиль. Характеристики хвиль. 10.2. Рівняння біжучої хвилі. 10.3. Пружні хвилі. 10.4. Електромагнітні хвилі.

10.5. Поняття про когерентність та інтерференція хвиль. 10.6. Стоячі хвилі. 10.7. Інтерференція у тонких плівках. 10.8. Явище дифракції. Принцип Гюйгенса – Френеля і метод зон Френеля. 10.9. Дифракція на отворі і щілині. Дифракційна решітка.

10.10. Поляризоване і природне світло. Поляризація світла при заломленні і відбиванні. 10.11. Подвійне заломлення променів. Призма Ніколя. 10.12. Поширення світла в речовині. Поняття про дисперсію, поглинання і розсіяння світла.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.2, §§ 72, 73, 75-78, 80, 81, 84–87, 90–94, 98–103.

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Хвильові процеси”.**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Рівняння біжучої хвилі. Основні характеристики хвиль.
2. Пружні та електромагнітні хвилі.
3. Інтерференція хвиль. Інтерференція у тонких плівках. Просвітлення оптики.
4. Явище дифракції. Дифракція на щілині.
5. Природне і поляризоване світло. Подвійне заломлення променів.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.2, §§ 72, 73, 75-78, 80, 81, 84–87, 90–94, 98–103.

*Контрольні питання та вправи*

1. Дайте визначення хвильового процесу (хвилі), фронту хвилі, хвильової поверхні.
2. Запишіть рівняння біжучої хвилі. Дайте визначення довжини хвилі та вкажіть її зв'язок з швидкістю хвилі.
3. Які хвилі мають назву пружних? Які з них відносяться до звукових, від чого і як залежить швидкість їх розповсюдження? 4. Сформулюйте основні властивості електромагнітних хвиль.
5. Дайте визначення потоку та інтенсивності хвилі, як і від чого вони залежать для пружних та електромагнітних хвиль?
6. В чому полягає акустичний ефект Доплера?
7. В чому полягає явище інтерференції хвиль? За якої різниці ходу та різниці фаз спостерігаються максимуми (мінімуми) інтерференційної картини? 8. Від яких параметрів залежить інтерференційна картина в тонких плівках?
9. В чому полягає явище дифракції хвиль? Сформулюйте принцип Гюйгенса – Френеля.

10. За яких умов можливе спостереження максимумів (мінімумів) при дифракції Фраунгофера на щілині?

11. За яких умов виникає поляризація світла та подвійне заломлення променів? Яке призначення і будова призми Ніколя?

12. Знайти різницю фаз коливань двох точок, що лежать на одному промені і розташовані на відстані  $\ell = 2\text{ м}$  одна від одної, якщо довжина хвилі  $\lambda = 1\text{ м}$ .

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача 1.** Рівняння незгасаючих коливань джерела хвиль має вигляд:  $\xi(t) = 10 \sin 0,5\pi t$  (см). Знайдіть: а) рівняння плоскої біжучої хвилі, якщо швидкість її розповсюдження  $300\text{ м/с}$ ; б) період коливань, довжину хвилі, хвильове число; в) рівняння коливань точки, що знаходиться на відстані  $600\text{ м}$  від джерела коливань; г) рівняння коливань для точок хвилі через  $4\text{ с}$  після початку коливань.

Розв'язання:

а) Якщо швидкість хвилі відома, то рівняння плоскої біжучої хвилі можна записати в вигляді

$$\xi(x,t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \quad \text{або} \quad \xi(x,t) = 0,1 \sin 0,5\pi \left( t - \frac{x}{300} \right) \text{ м.}$$

б) Оскільки з рівняння коливань циклічна частота  $\omega = 0,5\pi$  а період  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , то одержимо  $T = 4\text{ с}$ . Довжина хвилі  $\lambda = vT = 300 \cdot 4 = 1200\text{ м}$ . Модуль

хвильового вектора  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{1200} = \frac{\pi}{600}$ . Знаючи ці параметри, рівняння хвилі можна записати в вигляді

$$\xi(x,t) = A \sin(\omega t - kx) \quad \text{або} \quad \xi(x,t) = 0,1 \sin \left( 0,5\pi t - \frac{\pi}{600} x \right) \text{ м.}$$

в) Рівняння коливань для точки, що знаходиться на відстані  $x_1 = 600\text{ м}$  від джерела коливань має вигляд

$$\xi(x_1,t) = A \sin(\omega t - kx_1) \quad \text{або} \quad \xi(x_1,t) = 0,1 \sin(0,5\pi t - \pi) \text{ м.}$$

г) Рівняння коливань для точок хвилі через  $t_1 = 4\text{ с}$  після початку коливань має вигляд

$$\xi(x,t_1) = A \sin(\omega t_1 - kx) \quad \text{або} \quad \xi(x,t_1) = 0,1 \sin \left( 2\pi - \frac{\pi}{600} x \right) \text{ м.}$$

**Задача 2.** Два когерентних точкових джерела розміщені на відстані  $d = 5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$  один від одного і на відстані  $L = 6\text{ м}$  від екрану. Довжина хвилі світла, що випромінюється кожним джерелом у вакуумі дорівнює  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}\text{ м}$ , а амплітуди коливань однакові. Визначити: а) залежність інтенсивності світла від відстані до центру екрану і зобразити її графічно; б) координату п'ятого максимуму на екрані; в) ширину інтерференційної смуги.

### Розв'язання:

Як відомо, при додаванні коливань однакового напрямку і частоти результуюча амплітуда  $E_p^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \Delta\varphi$ , де  $E_1$  і  $E_2$  – амплітуди коливань, а  $\Delta\varphi$  різниця фаз. За умовою  $E_1 = E_2 = E_0$ , тому маємо  $E_p^2 = 2E_0^2(1 + \cos \Delta\varphi) = 4E_0^2 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2}$ . Оскільки  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$ , де  $\Delta$  – різниця ходу, то за умови  $d \ll L$  різниця ходу  $\Delta = \frac{d}{L} x$ . Інтенсивність світла на екрані пропорційна  $E_p^2$  і визначається за виразом

$$J = 2J_0 \left[ 1 + \cos \frac{2\pi d}{\lambda L} x \right].$$

Графік залежності  $J(x)$  зображений на рис.19

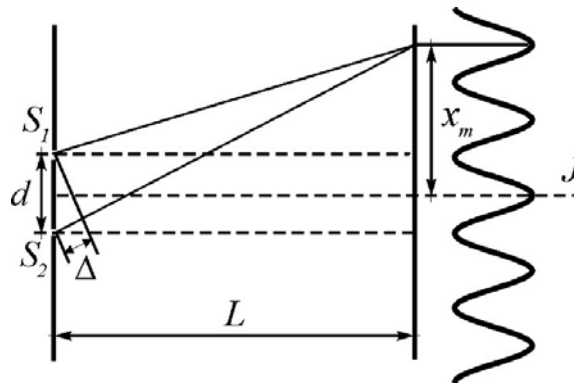


Рис.19

З виразу для інтенсивності випливає, що максимум спостерігається коли  $J = J_{max} = 2J_0$ , тобто коли

$$\frac{2\pi d}{\lambda L} x_m = 2\pi m; \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

звідки координати максимумів дорівнюють

$$x_m = \frac{L}{d} m \lambda.$$

З останнього можна знайти координату п'ятого максимуму

$$x_{5max} = \frac{L}{d} 5\lambda = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

а також ширину інтерференційної смуги

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{L}{d} \lambda \quad \text{або} \quad \Delta x = \frac{6 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10^{-3}} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$



*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

[2], 13. 8. В скільки разів швидкість розповсюдження звуку в повітрі літом (температура  $t_1 = 27^\circ \text{C}$ ) більша від швидкості розповсюдження звуку зимою (температура  $t_2 = -33^\circ \text{C}$ ).

Відповідь: в 1,12 рази.

[2], 16. 9. На тонку плівку ( $n = 1,33$ ) падає паралельний пучок білого світла під кутом  $\alpha = 45^\circ$ . За якої найменшої товщини плівки відбите світло буде жовтого кольору ( $\lambda = 600 \text{ нм}$ )?

Відповідь:  $d = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

[2], 16. 36. На щілину падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Ширина щілини дорівнює  $6\lambda$ . Під яким кутом  $\varphi$  буде спостерігатись третій дифракційний мінімум світла?

Відповідь:  $\varphi = 30^\circ$ .

[2], 16. 64. Чому дорівнює кут  $\alpha$  між головними площинами поляризатора і аналізатора, якщо інтенсивність природного світла після проходження через поляризатор і аналізатор зменшилась в чотири рази? Поглинанням і відбиттям світла знехтувати.

Відповідь:  $\alpha = 45^\circ$ .

**Завдання на самостійну роботу до лабораторного заняття**

**Лабораторна робота „Вимірювання швидкості звуку в повітрі методом інтерференції”.**

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Швидкість розповсюдження хвиль в газі.
2. Стоячі хвилі. Утворення стоячих хвиль в трубі.
3. Вимірювання швидкості хвилі в повітрі методом інтерференції.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи.

**Завдання на самостійну роботу до лабораторного заняття**

**Лабораторна робота „Вивчення явища дифракції за допомогою дифракційної решітки”.**

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Явище дифракції. Дифракція Фраунгофера на щілині.
2. Дифракційна решітка.
3. Визначення довжини хвилі випромінювання лазера за допомогою дифракційної решітки.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи.

**Завдання на самостійну роботу до тестового завдання за модулем 5.**

Ретельно повторити теоретичний матеріал за всіма навчальними питаннями теми 9 „Коливання” і теми 10 „Хвильові процеси. Оптика.”, повторити відповіді на контрольні питання практичних та лабораторних занять за цими темами. Необхідно також детально проаналізувати розв'язування типових задач і вправ до практичних занять, задач, що розв'язувались на всіх практичних заняттях і які були задані для самостійного розв'язування до тем даного модулю.

## МОДУЛЬ 6. КВАНТОВА МЕХАНІКА. ФІЗИКА АТОМА ТА АТОМНОГО ЯДРА.

### Тема 11. Елементи квантової механіки

*Навчальні питання, що розглядаються на лекціях*

11.1. Теплове випромінювання та люмінесценція. 11.2. Абсолютно чорне тіло. Закон Кірхгофа. 11.3. Квантова гіпотеза та формула Планка. Закони Стефана – Больцмана та Віна. 11.4. Фотоелектричний ефект і закони фотоелекту. Рівняння Ейнштейна.

11.5. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла. Гіпотеза де Бройля. 11.6. Співвідношення невизначеностей. 11.7. Хвильова функція та її статистичне тлумачення. 11.8. Стаціонарне рівняння Шредінгера та частинка в потенціальній ямі.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.3, §§ 1- 6, 8, 9,11-15, 17.

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Теплове випромінювання і фотоелект”.**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Властивості і характеристики теплового випромінювання.
2. Гіпотеза і формула Планка. Закони теплового випромінювання.
3. Фотоелектричний ефект та рівняння Ейнштейна.
4. Хвилі де-Бройля і співвідношення невизначеностей Гейзенберга?

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.3, §§ 1- 6, 8, 11-13.

*Контрольні питання та вправи*

1. Яке випромінювання є тепловим і які його властивості?
2. Дайте визначення основних кількісних характеристик теплового випромінювання: енергетичної світності і спектральної густини енергетичної світності. Який зв'язок між цими величинами.
3. Що розуміють під спектральною поглинальною здатністю? Які тіла називаються абсолютно чорними і сірими?
4. В чому полягає закон Кірхгофа для теплового випромінювання? Які наслідки з нього випливають?
5. На якій гіпотезі базується формула Планка для теплового випромінювання?
6. Сформулюйте закони Стефана – Больцмана та Віна для теплового випромінювання абсолютно чорного тіла.

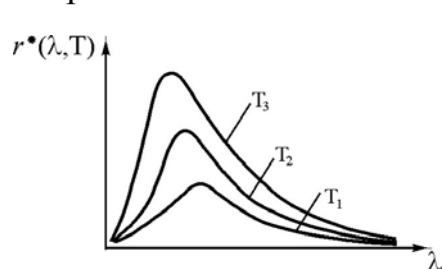


Рис. 20

7. Вкажіть, яка з залежностей для температур  $T_1, T_2, T_3$ , зображених на рисунку, відповідає розподілу енергії в спектрі абсолютно чорного тіла за найбільш високої температури. Відповідь обґрунтуйте.

8. В чому полягає явище зовнішнього фото-електу і які його основні закономірності?

9. Яке пояснення закономірностей зовнішнього фотоелектричного ефекту запропоновано Ейнштейном?

10. Як і від чого залежить максимальна кінетична енергія фотоелектронів?

11. Як і від чого залежить червона границя зовнішнього фотоелектричного ефекту?

12. Що розуміють під гальмівною напругою? Поясніть хід вольтамперної характеристики при зовнішньому фотоелектричному ефекті.

13. Сформулюйте гіпотезу де-Бройля. Як і від чого залежить довжина хвилі де-Бройля? В яких випадках хвильовими властивостями частинки можна знехтувати?

14. Які експерименти підтверджують наявність хвильових властивостей мікрочастинок?

15. Поясніть сутність співвідношення невизначеностей Гейзенберга для координати і імпульсу; для енергії і часу. В яких випадках співвідношення невизначеностей можна не враховувати?

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача 1.** Знайти кількість енергії, що випромінюється з  $1 \text{ см}^2$  поверхні абсолютно чорного тіла за  $1 \text{ с}$ , якщо відомо, що максимум спектральної густини його енергетичної світності приходить на довжину хвилі  $4840 \text{ \AA}$ .

Розв'язання:

Згідно з законом Віна, довжина хвилі, яка відповідає максимуму густини енергетичної світності, знаходиться за законом Віна

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

де  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – стала Віна,  $T$  – температура абсолютно чорного тіла. Із закону Віна маємо

$$T = \frac{b}{\lambda_m}.$$

Визначивши температуру, можна знайти енергетичну світність випромінювання абсолютно чорного тіла  $R^*$  за законом Стефана – Больцмана

$$R^* = \sigma T^4,$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – стала Стефана – Больцмана.

З другого боку, за визначенням енергетична світність дорівнює

$$R^* = \frac{W}{St}.$$

З останнього рівняння, використавши закон Стефана – Больцмана, знаходимо кількість енергії  $W$ , що випромінюється з площі  $S$  за час  $t$

$$W = R^* St = \sigma T^4 St = \sigma \frac{b^4}{\lambda_m^4} St = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{2,9^4 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-4}}{4,84^4 \cdot 10^{-28}} = 7,3 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

**Задача 2.** Визначити сталу Планка  $h$ , якщо відомо, що фотоелектрони, вибиті з поверхні метала світлом з частотою  $\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, повністю затримуються гальмівною напругою  $U_1 = 6,6$  В, а вибиті світлом з частотою  $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$  Гц – напругою  $U_2 = 16,5$  В.

Розв'язання:

Струм у фотоелементі припиняється, коли фотоелектрони з максимальною кінетичною енергією не в змозі здолати гальмуюче їх електричне поле, що існує між катодом і анодом, тобто при умові

$$\frac{mv^2}{2} \leq eU_r.$$

З урахуванням цього рівняння Ейнштейна для двох частот опромінювання можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} h\nu_1 &= A + eU_1, \\ h\nu_2 &= A + eU_2. \end{aligned}$$

Віднявши від другого рівняння перше, одержимо

$$h(\nu_2 - \nu_1) = e(U_2 - U_1),$$

звідки

$$h = \frac{e(U_2 - U_1)}{\nu_2 - \nu_1} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} (16,5 - 6,6)}{(4,6 - 2,2) \cdot 10^{15}} = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

**[2]. 18.15.** При нагріванні абсолютно чорного тіла довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності змінилася від 690 до 500 нм. В скільки разів збільшилась при цьому енергетична світність тіла? Відповідь: В 3,6 рази.

**[2]. 19.16.** Знайти гальмівну напругу для фотоелектронів, що випромінюються при освітленні калію (робота виходу 2 еВ) світлом з довжиною хвилі 330 нм. Відповідь:  $U = 1,75$  В.

**Завдання на самостійну роботу до лабораторного заняття**

**Лабораторна робота „Визначення температури випромінюючого тіла за допомогою оптичного пірометра”.**

*Навчальні питання, що виносяться на лабораторну роботу*

1. Характеристики і закони теплового випромінювання.
2. Методика вимірювання температури нагрітих тіл за допомогою оптичного пірометра.

*Література:* методичні вказівки до лабораторної роботи.

## Тема 12. Атомна та ядерна фізика

12.1. Квантовомеханічний опис атома водню.

12.2. Спектр атома водню.

12.3. Спін електрона. Багатоелектронний атом.

12.4. Атомне ядро, нуклони. Взаємодія нуклонів, уявлення про ядерну взаємодію. Моделі ядра.

12.5. Стійкість ядер. Дефект мас та енергія зв'язку ядра.

12.6. Залежність питомої енергії зв'язку від масового числа. Ланцюгова реакція поділу та реакція синтезу.

12.7. Радіоактивність.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.3, §§ 22, 23 (до с.108), 27, 48-51, 53, 54.

**Завдання на самостійну роботу до практичного заняття „Атом водню і елементи ядерної фізики”.**

*Питання, що виносяться на практичне заняття*

1. Спектр атома водню.

2. Стійкість ядер та енергія зв'язку ядра.

3. Радіоактивність.

*Література:* конспект лекцій, [1] – т.3, §§ 22, 23 (до с.108), 27, 48-51, 53, 54.

*Контрольні питання та вправи*

1. З якою метою в квантовій механіці введено поняття хвильової функції? Яке її статистичне тлумачення? Яким вимогам вона повинна задовольняти?

2. Яка функція і роль рівняння Шредінгера для стаціонарних станів у квантовій механіці?

3. Які основні відмінності в закономірностях руху класичної частинки і мікрочастинки в нескінченно глибокій прямокутній потенціальній ямі?

4. Яка модель будови атома була запропонована Резерфордом? Чому вона не витримує критики навіть з погляду законів класичної фізики?

5. Які результати впливають відносно закономірностей руху електрона в атомі водню із розв'язання рівняння Шредінгера:

а) відносно можливих значень енергії електрона в атомі; б) відносно можливих значень моменту імпульсу і його магнітного моменту; в) відносно можливих значень проєкцій моменту імпульсу і магнітного моменту на вибраний напрямок; г) відносно імовірності перебування електрона в просторі навколо ядра атома?

6. Які стани електрона в атомі мають назву вироджених? Що розуміють під кратністю виродження?

7. Що розуміють під спіновим моментом імпульсу і спіновим магнітним моментом? Чому дорівнюють ці величини для електрона?

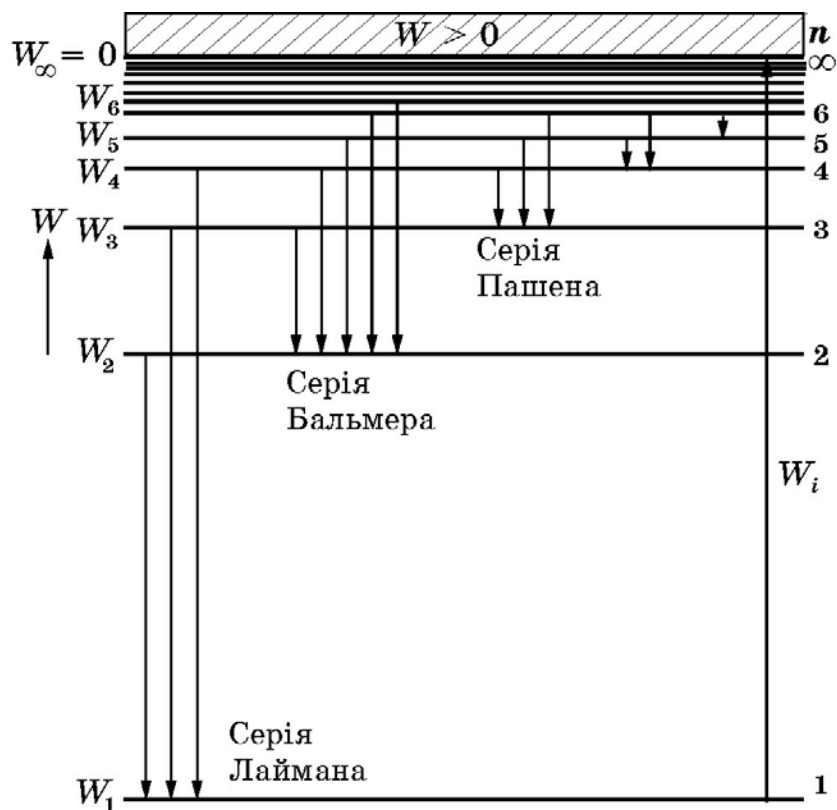
8. Як розраховуються теоретичні значення частот (довжин хвиль) випромінювання атома водню?
9. За якими ознаками частоти випромінювання атома водню групуються в серії? Частоти якої із серій найбільші?
10. Якими закономірностями регулюється розподіл електронів по станах в багато електронному атомі?
11. За якими ознаками електрони в багато електронних атомах відносять до одного шару, до одного підшару? Якою символікою користуються для запису розподілу електронів атома по шарам і підшарам?
12. Які частинки входять до складу ядра атома? Які їх електричні заряди і маси (в атомних одиницях маси)?
13. Що розуміють під зарядовим числом і масовим числом? Як визначити ці числа для ядра певного хімічного елементу?
14. Яка символіка прийнята для запису ядер різних хімічних елементів?
15. Опишіть основні властивості ядерних сил.
16. Що розуміють під дефектом маси ядра? Як визначити дефект маси ядра певного елементу таблиці Д.І. Менделєєва?
17. Дайте визначення питомої енергії зв'язку ядра. Як вона залежить від масового числа?
18. При яких перетвореннях ядра можливе виділення ядерної енергії? Як ці перетворення реалізуються на практиці?
19. Що розуміють під радіоактивністю? Яку радіоактивність називають природною, яку штучною?
20. Які види радіоактивності існують в природі?
21. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду. Дайте визначення періоду напіврозпаду.
22. Що розуміють під активністю радіоактивного препарату? В яких одиницях вимірюється активність?
23. Дайте визначення одиниці вимірювання експозиційної дози радіоактивного випромінювання – рентгену.
24. Визначте довжину хвилі де-Бройля для частинки, яка рухається із швидкістю  $v = 10^3$  м/с і має масу  $m = 10^{-5}$  кг. Чи є необхідність враховувати хвильові властивості цієї частинки?
25. Чому дорівнює кратність виродження стану електрона в атомі водню із значенням головного квантового числа  $n = 2$ ?
26. Визначте частоту випромінювання атомів водню при переході в них електронів із стану з значенням головного квантового числа  $n = 3$  в стан, де  $n = 2$ .
27. Запишіть розподіл електронів за станами в атомі хлору ( $Z = 17$ ).
28. Визначте сталу розподілу радіоактивного елементу, якщо період напіврозпаду у нього становить 138 суток.

*Приклади розв'язання типових задач*

**Задача 1.** Визначте енергію іонізації атома водню.

Розв'язання:

Для іонізації атома водню необхідно електрон із основного (не збудженого) стану із значенням головного квантового числа  $n_1 = 1$  і енергією  $W_1$  (рис. 21) перевести в збуджений стан з квантовим числом  $n_\infty = \infty$  в якому енергія електрона  $W_\infty = 0$ . Це означає, що при всіх енергіях  $W < 0$  (рис. 21) рух електрона є зв'язаним – з точки зору класичної фізики він знаходиться всередині „потенціальної ями”, тобто він рухається навколо ядра. При всіх  $W > 0$  рух електрона є вільним, що відповідає (з точки зору класичної фізики) знаходженню електрона на безкінечній відстані від ядра, тобто віддаленню його за межі атома. Вільний електрон має неперервний спектр енергії (заштрихована область на рис. 21) який відповідає руху іонізованого атома.



**Рис. 21**

Отже, для іонізації атома необхідно енергію електрона в основному стані збільшити на величину  $W_i$  (енергія іонізації), тобто

$$W_1 + W_i = W_\infty = 0.$$

З останнього енергія іонізації дорівнює

$$W_i = -W_1 = -\left(-\frac{1}{n_1^2} \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\right) = \frac{1}{n_1^2} \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}.$$

Підставляючи числові дані, маємо

**Задача 2.** Деякий радіоактивний ізотоп має сталу розпаду

$$W_i = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{1^2 \cdot 8 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 (6,626 \cdot 10^{-34})^2} = 21,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 13,6 \text{ еВ.}$$

$\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ . Через який час розпадеться 75 % початкової маси ізоотопу?

Розв'язання:

Відповідно із законом радіоактивного розпаду число  $N$  ядер, що не розпалися через час  $t$  дорівнює

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

де  $N_0$  – число ядер в початковий момент часу  $t_0 = 0$ . Тоді, число ядер, що розпалися за час  $t$  дорівнює

$$N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}).$$

Якщо позначити масу атома ізоотопу  $m_a$ , то маса ізоотопу в довільний момент часу  $t$  дорівнює  $m = Nm_a$ , маса ізоотопу в початковий момент часу  $m_0 = N_0 m_a$ , а розпалася маса ізоотопу  $\Delta m = (N_0 - N)m_a$ . Тоді з відношення

$$\frac{\Delta m}{m_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} = \frac{N_0 (1 - e^{-\lambda t})}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}.$$

одержимо

$$e^{-\lambda t} = 1 - \frac{\Delta m}{m_0}.$$

Після логарифмування обох частин рівняння знайдемо необхідний час розпаду



$$t = -\frac{\ln\left(1 - \frac{\Delta m}{m_0}\right)}{\lambda} = -\frac{\ln(1 - 0,75)}{1,44 \cdot 10^{-3}} = 962,7 \text{ год.}$$

*Розв'язати задачі (на наступне практичне заняття)*

**[2]. 20.11.** Яку найменшу кінетичну енергію  $W_{\min}$  (в електронвольтах) повинні мати електрони, щоб при збудженні атомів водню ударами цих електронів спектр атомів водню мав три спектральні лінії. Знайти довжини хвиль  $\lambda$  цих ліній.

Відповідь:  $W_{\min} = 12,03 \text{ eV}$ ,  $\lambda_1 = 102,6 \text{ нм}$ ,  $\lambda_2 = 121,5 \text{ нм}$ ,  
 $\lambda_3 = 656,3 \text{ нм}$ .

**[2]. 21.4.** Знайти масу радону, активність якого дорівнює 1 Кюрі. Період напіврозпаду радону  $T = 3,82$  доби, масове число – 222.

Відповідь:  $m = 6,5 \cdot 10^{-9} \text{ кг}$ .

**[2]. 21.6.** Знайти сталу розпаду радону, якщо відомо, що число атомів радону зменшується за час  $t = 1$  доба на 18,2 %.

Відповідь:  $\lambda = 2,33 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ .

**Завдання на самостійну роботу до тестового завдання за модулем 6.**

Ретельно повторити теоретичний матеріал за всім навчальними питаннями теми 11 „Елементи квантової механіки” і теми 12 „Атомна та ядерна фізика”, повторити відповіді на контрольні питання практичних та лабораторних занять за цими темами. Необхідно також детально проаналізувати розв'язування типових задач і вправ до практичних занять, задачі, що розв'язувались на всіх практичних заняттях і які були задані для самостійного розв'язування до тем даного модулю.





Підп. до друк 18.01.11 Формат 60x84 1/16  
Папір 80г/м<sup>2</sup> Друк ризограф Умовн. — друк. арк. 3,6  
Тираж прим. Вид. № 40/10 Зам. №  
Відділення редакційно-видавничої діяльності  
Національного університету цивільного захисту України  
61023 м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

