

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

В.В. БОЙКО, А.П. ВІДЬМАЧЕНКО, Я.О. ГУМЕНЮК,
І.А.ЗАЛОЇЛО, П.П. ІЛЬІН, М.В. МАЛЮТА, В.П. ЧОРНИЙ

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Методичні вказівки до виконання лабораторних
робіт в змішаному та дистанційному режимі

ВИДАВНИЧИЙ ЦЕНТР НУБіП України

КИЇВ - 2022

УДК 53 (07)

Наведено основи теорії та опис лабораторних робіт з фізики.

Навчальне видання є допоміжним засобом для повноцінного виконання лабораторних робіт з фізики в змішаному та дистанційному режимі.

Рекомендовано Вченою радою навчально-наукового інституту енергетики, автоматики та енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України

(протокол № 6 від 17 червня 2022 року).

Рецензенти:

доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій ,
канд. техн. наук, доцент **Синявський О.Ю.**

доцент кафедри теплоенергетики, канд. техн. наук, доцент **Міщенко А.В.**

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт в змішаному та дистанційному режимі

(навчальне видання)

**Бойко В.В., Відьмаченко А.П., Гуменюк Я.О., Залоїло І.А., Ільїн П.П.,
Малюта М.В., Чорній В.П. Фізичний практикум. Методичні вказівки до
виконання лабораторних робіт в змішаному та дистанційному режимі: К.:
Видавничий центр НУБіП України, 2022. – с.**

© Бойко В.В., Відьмаченко А.П., Гуменюк Я.О., Залоїло І.А.,

Ільїн П.П., Малюта М.В., Чорній В.П. 2022.

© Видавничий центр НУБіП України. 2022

Мета та завдання навчальної дисципліни “ФІЗИКА”

Дисципліна „фізика” разом з курсом вищої математики, хімії, інформатики являє собою основу теоретичної підготовки спеціалістів інженерного профілю, тобто ту фундаментальну базу, без якої неможливе повноцінне вивчення дисциплін циклу професійної та практичної підготовки таких фахівців. Потреба вивчення фізики студентами цих спеціальностей обумовлена все більшим застосуванням фізичних методів та приладів у різних галузях народного господарства, саме тому сучасному фахівцю необхідно мати належну фізико-технічну підготовку.

Таким чином, *основною метою* дисципліни “*Фізика*” є послідовне вивчення студентами основних законів і положень фізики для пізнання загальних закономірностей явищ природи; використання даних законів в оперативному розв’язанні проблем; освітлення можливих прикладних застосувань фізичних методів і приладів у практичній діяльності.

Завдання навчальної дисципліни “Фізика” наступні:

Створення у студентів достатньо широкої підготовки в галузі фізики, володіння фундаментальними поняттями та теоріями класичної та сучасної фізики, що забезпечує їм ефективне опанування спеціальних предметів й подальшу можливість використання фізичних принципів. Сюди відносяться також навчання студентів методам та навичкам розв’язання конкретних задач та ознайомлення їх із сучасною науковою апаратурою, в тому числі електронно-обчислювальною.

Формування у студентів наукового світогляду та сучасного фізичного мислення. Це завдання слід також розглядати як істотну частину гуманітарної підготовки майбутнього спеціаліста, бо більшість питань історії науки, філософії і навіть естетики можна продемонструвати під час викладання курсу фізики, при чому на прикладах, що найбільш близькі до схильностей студентів.

При вивченні фізики необхідно виходити з єдності фізики як науки та глибокого зв’язку різних її розділів, головну увагу приділяючи вивченню основних принципів фізики. Такий підхід закладає міцну основу фундаментальних знань, чим сприяє засвоєнню в подальшому різноманітних спеціалізацій.

У всіх випадках, коли це можливо, закони фізики треба виводити з основних принципів і всюди підкреслювати різницю між основними принципами і висновками з них. Необхідно прагнути показати взаємозв’язок різних галузей

У результаті вивчення навчальної дисципліни «Фізика» студент повинен

знати:

- основні фізичні величини, одиниці їх вимірювань, основи теорії похибок та правила оброблення результатів вимірювань;
- фундаментальні поняття й теорії класичної та сучасної фізики з тим, щоб ефективно опанувати спеціальні навчальні дисципліни та використати знання фізичних закономірностей у майбутній роботі;
- методи розв'язування практичних фізичних задач та проблем;
- принципи дії приладів, в тому числі електронно-обчислювальної апаратури;

вміти:

- проводити математичну і статистичну обробку результатів вимірювань;
- користуючись фізичними положеннями, законами і теоріями, застосовувати набуті теоретичні та практичні знання внаслідок вивчення спеціальних дисциплін в майбутній роботі із спеціальності;
- пояснювати фізичні процеси та явища, які відбуваються під час роботи різного роду механізмів, що використовуються в практичній діяльності;
- застосовувати сучасні фізичні методи і прилади на практиці.

Вивчення дисципліни передбачає такі види занять: лекції, лабораторні роботи, самостійну роботу та написання рефератів на запропоновані теми.

Вивчення дисципліни „Фізика” передбачає використання інформаційно - комп'ютерних технологій (глобальна система Інтернет, електронні підручники, візуалізація фізичних явищ та процесів, оцінювання знань, обробка результатів фізичного експерименту в Mathcad, Excel) та результатів сучасних досліджень в галузях фізики.

Матеріал інформаційного характеру, який в достатній мірі висвітлений в навчальній літературі, студенти опановують самостійно.

З метою інтенсифікації процесу навчання застосовується модульний принцип вивчення тем дисципліни з проміжною атестацією студентів. Формою підсумкового контрольного заходу є залік та екзамен.

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Вступ

Предмет фізики. Матерія і рух. Форми руху матерії. Методи фізичних досліджень. Фізика та інші науки. Зв'язок фізики і техніки, їх взаємний вплив. Важливість вивчення фізики для майбутніх фахівців у галузі енергетики агропромислового виробництва. Математичний апарат, як засіб дослідження та відкриття фізичних явищ.

МОДУЛЬ 1. МЕХАНІКА

Кінематика та динаміка поступального руху

Параметри руху (радіус-вектор, переміщення, швидкість, прискорення). Прямолінійний і криволінійний рух. Траєкторія. Кінематика поступального руху.

Динаміка поступального руху. Сила, маса. Закон збереження кількості руху. Робота, енергія, потужність. Закон збереження енергії.

Кінематика та динаміка обертального руху

Параметри руху. Кінематика обертального руху. Момент сили. Момент інерції. Момент інерції матеріальної точки та твердого тіла. Теорема Штейнера. Момент інерції диска, циліндра, стержня відносно різних осей.

Робота, енергія, потужність при обертальному русі. Закон збереження моменту кількості руху.

Кінематика та динаміка коливального руху

Маятники. Диференціальні та кінематичні рівняння коливань. Параметри коливань. Вільні коливання. Швидкість, прискорення та енергія коливального руху. Складання коливань. Загасаючі коливання. Диференціальне та кінематичне рівняння коливань. Параметри коливань. Декремент загасання. Коефіцієнт загасання. Час релаксації. Аперіодичні коливання.

Вимушені коливання. Параметри коливань. Резонанс. Автоколивання.

Хвилі, механізм їх утворення. Рівняння хвилі. Довжина хвилі. Хвильовий вектор. Акустичні хвилі, їх характеристики. Ефект Доплера. Звук, його характеристики.

Сили

Консервативні системи. Сила тяжіння. Закон всесвітнього тяжіння. Прискорення вільного падіння. Робота сили тяжіння. Космічні швидкості.

Сили пружності. Закон Гука в двох формах запису. Модуль Юнга. Деформації реальних тіл.

Сила тертя. Види тертя. Коефіцієнт тертя. Залежність сили тертя від швидкості руху та інших факторів. Внутрішнє тертя. Закон Ньютона для внутрішнього тертя.

Рух під дією сил тяжіння, тертя, пружності. Рух штучних супутників, рух по параболі, на поворотах, по коловій траєкторії у вертикальній або горизонтальній площинах, по похилій площині. Момент сили. Умова рівноваги.

МОДУЛЬ 2

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА

Молекулярно-кінетична теорія ідеальних газів

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеальних газів. Молекулярно-кінетична інтерпретація температури. Середня кінетична енергія молекули. Закон рівномірного розподілу енергії за ступенями вільності.

Закон Максвелла про розподіл молекул газу за швидкостями. Дослід Штерна. Розподіл Больцмана. Барометрична формула.

Явища переносу

Середнє число зіткнень і середня довжина вільного пробігу молекул.

Гradient фізичної величини. Дифузія, закон Фіка. Внутрішнє тертя, закон Ньютона. Теплопровідність. Закон Фур'є. Загальна характеристика явищ переносу.

Основи термодинаміки

Робота газу при зміні об'єму. Внутрішня енергія термодинамічної системи. Перший закон термодинаміки, його застосування до різних ізопроесів у газах.

Теплоємності ідеального газу C_p і C_v . Робота газу в різних ізопроесах. Адіабатичний процес. Рівняння Пуасона.

Направленість процесів природи. Другий закон термодинаміки. Зворотній і незворотній процеси. Цикл Карно. ККД циклу Карно. Фізична причина незворотності процесів природи. Ентропія та її фізичний зміст. Принцип зростання ентропії.

Випаровування і конденсація. Насичена і ненасичена пара. Кипіння. Залежність температури кипіння рідини в тиску. Питома теплота пароутворення. Вологість повітря. Вимірювання вологості повітря за допомогою психрометра.

Поверхневий натяг рідини. Сила поверхневого натягу. Змочування. Капілярні явища.

Кристалічні та аморфні тіла. Плавлення твердих тіл. Питома теплота плавлення. Механічні властивості твердих тіл. Пружинна деформація. Модуль Юнга.

МОДУЛЬ 3

ЕЛЕКТРИКА

Електричне поле

Електричний заряд. Взаємодія заряджених тіл. Закон Кулона. Закон збереження електричного заряду. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції полів. Провідники в електричному полі. Електростатичний захист.

Робота електростатичного поля під час переміщення електричного заряду. Потенціал. Різниця потенціалів. Напруга. Зв'язок напруженості електричного поля з напругою.

Електроємність. Конденсатор. Види конденсаторів. Ємність плоского конденсатора. З'єднання конденсаторів.

Енергія електричного поля. Діелектрики в електричному полі. Діелектрична проникність речовин.

Електричний струм

Електричний струм. Умови, необхідні для існування електричного струму. Сила струму. Закон Ома для однорідної ділянки кола. Опір провідників. Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Робота і потужність електричного струму. Електрорушійна сила джерела струму. Залежність опору провідника від його довжини і площі поперечного перерізу. Закон Ома для повного кола. Робота і потужність електричного струму.

Електричний струм у провідниках. Електронна провідність металів. Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів. Закон електролізу. Стала Фарадея.

Електричний струм у газах. Самостійний і несамостійний розряди. Поняття про плазму. Електричний струм у вакуумі. Термоелектронна емісія. Електронно-променева трубка.

Напівпровідники. Власна і домішкова провідність напівпровідників. Залежність провідності напівпровідників від температури та освітлення. Напівпровідниковий транзистор. Використання напівпровідникових приладів в електронній техніці.

МОДУЛЬ 4

ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Магнітне поле

Матеріальність магнітного поля. Дія магнітного поля на провідник із струмом. Закон Ампера. Магнітна індукція. Магнітні силові лінії.

Закон Біо – Савара - Лапласа та його застосування до розрахунку магнітних полів прямолінійного та кільцевого струмів. Напруженість магнітного поля.

Рух заряджених частинок у магнітному полі. Сила Лоренца. Ефект Холла.

Електромагнітна індукція

Самоіндукція та взаємоіндукція. Основний закон електромагнітної індукції. Закон Фарадея, правило Ленца.

Електронний механізм електромагнітної індукції. Магнітний потік. Індуктивність. Енергія магнітного поля, об'ємна густина енергії.

Електромагнітні коливання і хвилі

Коливання в електричному контурі. Диференціальне та кінематичне рівняння коливань. Параметри коливань. Вільні коливання. Додавання коливань.

Загасаючі коливання. Змушені коливання. Резонанс. Автоколивання. Відкритий електричний контур. Вібратор.

Рівняння Максвелла. Інтегральні та диференціальні форми запису рівнянь Максвелла.

Електромагнітні хвилі, їх характеристики. Довжина хвилі. заломлення. Вектор Пойнтінга.

Принцип Гюйгенса. Вторинні хвилі. Фронтальні поверхні та промені. Шкала електромагнітних хвиль. Джерела електромагнітних хвиль. Видиме світло.

МОДУЛЬ 5

ОПТИКА

Геометрична оптика

Закони відбивання та заломлення світла. Повне внутрішнє відбивання. Пояснення законів геометричної оптики за допомогою принципу Гюйгенса.

Хвильова оптика

Інтерференція хвиль. Інтерференція світла, її особливості. Метод одержання когерентних джерел світла. Інтерференційні схеми. Інтерференція в тонких плівках. Застосування явища інтерференції світла.

Дифракція хвиль, її пояснення за допомогою принципу Гюйгенса. Принцип Гюйгенса - Френеля. Дифракція від точкового джерела та в паралельних променях. Дифракція на отворі, диску, щілині. Дифракційна решітка (гратка), її застосування.

Поляризація світла. Подвійне променезаломлення. Закон Малюса. Поляризація при відбиванні та заломленні світла на границі двох діелектриків. Призма Ніколя. Штучна анізотропія, ефект Керра. Явище обертання площини коливань.

Дисперсія світла. Нормальна та аномальна дисперсія. Поглинання світла. Закон Бугера - Ламберта. Коефіцієнт поглинання.

Квантова оптика

Особливості теплового випромінювання. Модель абсолютно чорного тіла. Закон Кірхгофа. Розподіл енергії в спектрі абсолютно чорного тіла. Закони Стефана-Больцмана і Віна. Гіпотеза Планка. Кванти. Оптична пірометрія.

Закони зовнішнього фотоефекту. Рівняння Ейнштейна для фотоефекту. Пояснення законів фотоефекту за допомогою квантових уявлень про світло. Застосування фотоефекту.

Досліди Лебедева. Тиск світла. Квантове пояснення тиску світла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм.

МОДУЛЬ 6.

ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ АТОМА ТА ЯДРА

Хвильові властивості частинок

Гіпотеза де Бройля. Дифракція електронів, досліди Девісона і Джермера. Хвильові властивості електрона, їх застосування. Хвильові властивості частинок.

Атом

Лінійчасті спектри як ключ для розгадування будови атома. Закономірності в спектрі атомарного водню. Планетарна модель атома.

Постулати Бора. Радіуси стаціонарних орбіт. Енергетичний спектр атома водню. Природа спектральних ліній. Багатоелектронні атоми. Головне, орбітальне і магнітне квантові числа. Спін електрона. Спінове квантове число. Принцип Паулі і розподіл електронів за стаціонарними станами. Спектри атомів і молекул.

Структура атомного ядра

Розміри та склад ядер. Нуклони. Зарядове та масове числа. Ізотопи. Взаємодія нуклонів. Енергія зв'язку. Дефект маси.

Закон радіоактивного розпаду. Активність, стала розпаду, період напіврозпаду.

Штучна радіоактивність. Поділ важких ядер, коефіцієнт розмноження нейтронів. Ланцюгова реакція. Критична маса. Розрахунок величини енергії, що виділяється при поділі ядра.

Ізотопи, їх використання. Реакції термоядерного синтезу. Елементарні частинки. Кварки.

ТЕМАТИКА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ МОДУЛІ:

Орієнтовний перелік лабораторних робіт

I семестр

Модуль 1. Механіка

- 1.1 Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника.
- 1.2 Вивчення законів обертового руху за допомогою маятника Обербека.
- 1.3 Визначення моменту інерції тіла методом крутильних коливань.
- 1.4 Перевірка основного рівняння динаміки обертового руху за допомогою маятника Максвелла.
- 1.6. Визначення модуля Юнга.
- 1.10. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника
- 1.11. Визначення прискорення вільного падіння з кривої залежності періоду коливань фізичного маятника від положення точки підвісу.

Модуль 2. Основи молекулярної фізики і термодинаміки.

- 2.1. Визначення коефіцієнту лінійного розширення твердих тіл.
- 2.2. Визначення відношення питомих теплоємностей C_p/C_v методом Клемана-Дезорма.
- 2.3. Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя за Стоксом.
- 2.4. Визначення коефіцієнту теплопровідності твердих тіл.
- 2.5. Визначення зміни ентропії при плавленні олова.

Модуль 3. Електрика

- 3.1. Дослідження електростатичного поля.
- 3.2. Визначення омичного опору методом містка Уїтстона.
- 3.3. Дослідження температурної залежності опору металу.
- 3.4. Визначення ϵ , ρ , c гальванічного елемента методом компенсації.

Модуль 4. Електромагнетизм

- 4.1. Вивчення магнітного поля тонкої котушки.
- 4.2. Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.
- 4.3. Вимірювання циркуляції напруженості магнітного поля соленоїда.
- 4.4. Визначення магнітної індукції поля соленоїда балістичним методом.
- 4.5. Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.
- 4.6. Визначення логарифмічного декременту загасання коливань фізичного маятника.
- 4.7. Вивчення електронного осцилографа та дослідження з його допомогою складання взаємно-перпендикулярних коливань.

II семестр

Модуль 5. Оптика

- 5.1. Визначення довжини хвилі світла за допомогою кілець Ньютона.
- 5.2. Визначення довжини хвилі світла за допомогою біпризми Френеля.
- 5.3. Визначення довжини хвилі світла за допомогою дифракційної ґратки.
- 5.4. Перевірка закону Малюса.
- 5.5. Визначення концентрації оптично-активних речовин поляриметром.
- 5.6. Визначення сталої Стефана-Больцмана та сталої Планка за допомогою оптичного пірометра.
- 5.7. Дослідження залежності фотоструму насичення від інтенсивності світла.
- 5.8. Визначення сталої Планка методом Лукірського.

Модуль 6. Елементи квантової механіки, фізики атома та ядра

- 6.1. Вивчення спектрів випромінювання газів.
- 6.2. Вивчення оптичного квантового генератора.

- 6.3. Вивчення залежності опору напівпровідників від температури і визначення енергії активації.
- 6.4. Визначення концентрації і рухливості носіїв струму в напівпровідниках.
- 6.5. Дослідження напівпровідникового тріоду.
- 7.1. Визначення активності радіонукліду.
- 7.2. Визначення коефіцієнту поглинання γ – променів.
- 7.3. Визначення періоду напіврозпаду радіоактивного ізотопу

ТИПОВІ РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ ТА ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Самостійну роботу студентів поділяють на дві складові – підготовку до навчальних занять і виконання індивідуальних завдань (описові завдання, реферати, розрахункові завдання, розрахунково-графічні завдання тощо).

З кожного модуля з першої складової визначають літературні джерела, які потрібно опрацювати, а з другої – назву виду індивідуальних завдань та орієнтовний перелік їх тем.

МОДУЛЬ 1

1.1. Матеріальна точка рухається вздовж прямої. Рівняння руху точки $X = A + B t + C t^2 + D t^3$.

1.1.1. Проаналізувати, при яких значеннях параметрів A, B, C, D матеріальна точка рухатиметься: 1). рівномірно; 2). рівноприскорено; 3). так, що її прискорення зростає по лінійному закону.

1.1.2. Знайти значення швидкості та прискорення точки в довільний момент часу (миттєва швидкість та прискорення).

1.2. Матеріальна точка рухається по колу радіусом R . Рівняння руху точки $\varphi = A + B t + C t^2 + D t^3$.

1.2.1. Проаналізувати, при яких значеннях параметрів A, B, C, D матеріальна точка рухатиметься: 1). рівномірно по колу; 2). рівно прискорено по колу; 3). так, що її кутове прискорення зростає по лінійному закону.

1.2.2. Визначити значення кутової швидкості в довільний момент часу

1.2.3. Знайти лінійну швидкість точки в довільний момент часу.

1.2.4. Визначити значення тангенціального прискорення в довільний момент часу.

1.2.5. Визначити значення нормального прискорення в довільний момент часу

1.2.6. Знайти повне прискорення точки в довільний момент часу та визначити кут між векторами швидкості та повного прискорення в довільний момент часу.

1.3. Через нерухомий блок перекинута тонка нерозтяжна нитка, на кінцях якої підвішені два тягарці масами $m_1 = 0,1$ кг та $m_2 = 0,2$ кг. Визначити, з яким прискоренням почнуть рухатись тягарці після того, як їх відпустили? Який шлях пройде кожен із них за першу секунду руху? Масою блока та тертям у блоці знехтувати.

1.4. Проаналізувати результат співударяння двох кульок у випадку 1). абсолютно пружного, прямого, центрального удару та 2). абсолютно непружного удару. Визначити швидкість руху кульок після зіткнення та знайти, яка частина механічної енергії при цьому перетворилась у теплову.

1.5. Маховик у вигляді суцільного диска, маса якого m , а діаметр основи D , обертається згідно з рівнянням $\varphi = At + Bt^2 + Ct^3$.

1.5.1. Визначити значення швидкості та прискорення точки на відстані $D/2$ від осі (на поверхні диска) у довільний момент часу (миттєва швидкість та прискорення).

1.5.2. Знайти кінетичну енергію маховика в довільний момент часу.

1.5.3. Визначити обертальний момент сили, що діє на маховик у довільний момент часу.

1.6. Визначити максимальне прискорення матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання з амплітудою $0,1$ м, якщо максимальна швидкість точки 10 м/с. Написати рівняння коливань та зобразити графічно залежності зміщення, швидкості, прискорення точки від часу.

1.7. Знайти максимальну швидкість матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання з амплітудою $0,3$ м, якщо максимальне прискорення точки дорівнює $1,2$ м/с². Дослідити рівняння коливань та зобразити графічно залежності зміщення, швидкості, прискорення точки від часу.

1.8. Точка здійснює одночасно два коливання однієї частоти, що відбуваються в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Рівняння цих коливань мають вигляд: $x = A_1 \sin \omega t$ та $y = A_2 \cos \omega t$, де $A_1 = 0,01$ м; $A_2 = 0,03$ м; $\omega = 1$ рад/с. Дослідити рівняння траєкторії, побудувати її з врахуванням масштабу, показати напрямок руху точки та вказати положення точки в початковий момент.

1.9. Матеріальна точка бере участь у двох коливаннях, що проходять вздовж однієї прямої і описуються рівняннями: $x_1 = A_1 \sin \omega_1 t$, $x_2 = A_2 \sin \omega_2 t$, де $A_1 = 3$ см; $A_2 = 4$ см; $\omega_1 = \omega_2 = 2$ с⁻¹. Знайти амплітуду складного руху, його частоту, початкову фазу, написати рівняння руху. Побудувати векторну діаграму для моменту часу $t = 0$.

МОДУЛЬ 2

- 2.1.** Визначити кількість речовини та число молекул газу: а) кисню, б) азоту, в) водяної пари масою 1 кг.
- 2.2.** Проаналізувати, скільки атомів містить водяна пара: а) у кількості речовини 0,1 моль; 2) у масі 0,1 кг?
- 2.3.** Визначити молярну масу та масу однієї молекули кухонної солі, вуглекислого газу, кисню, азоту.
- 2.4.** Проаналізувати, при якій масі кожної з названих речовин в одному кубічному метрі повітря з'являється небезпека отруєння. Гранично допустима концентрація молекул парів ртуті (Hg) в повітрі дорівнює $3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, а отруйного газу хлору (Cl_2) – $8,5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.
- 2.5.** Сучасна техніка дає змогу створити вакуум до 10^{-12} Па. Визначити, скільки молекул газу залишається при такому вакуумі в 1 м^3 при температурі 300К?
- 2.6.** У балоні об'ємом 3 л міститься азот масою 10 г. Розрахувати концентрацію молекул газу.
- 2.7.** Визначити середню кінетичну енергію молекули двохатомного газу і концентрацію молекул при температурі 300 К і при тиску 0,5 Мпа.
- 2.8.** Розрахувати, як зміниться внутрішня енергія 100г а) гелію та б) кисню при збільшення температури на 50°C ?
- 2.9.** Знайти внутрішню енергію трьохатомного газу, що займає об'єм V , при температурі T , якщо концентрація його молекул n ?
- 2.10.** Проаналізувати зміну внутрішньої енергії одноатомного газу під час ізобарного охолодження, ізохорного охолодження та ізотермічного розширення?
- 2.11.** Знайти роботу ізотермічного стиснення газу, що працює за циклом Карно, коефіцієнт корисної дії якого дорівнює 0,5, якщо робота ізотермічного розширення дорівнює 10 кДж.
- 2.12.** Газ, що здійснює цикл Карно, одержує від нагрівача кількість теплоти 30 кДж. Визначити роботу газу в циклі, якщо температура нагрівача втричі вища за температуру холодильника.
- 2.13.** Розрахувати к. к. д. теплової машини, кількість теплоти, що забирає холодильник за 1 секунду, та потужність ідеальної теплової машини, якщо температура нагрівника 127°C , а холодильника 23°C . Кількість теплоти, що отримує машина від нагрівника дорівнює 50 Дж за кожну секунду.

МОДУЛЬ 3

3.1. Три однакових точкових заряди по 5 нКл кожний знаходяться в вершинах рівностороннього трикутника зі стороною 1 см. Визначити модуль і напрямок сили, що діє на один із зарядів зі сторони двох інших.

3.2. Відстань між двома точковими однойменними зарядами 0,9 нКл та 1,6 нКл дорівнює 50 см. Визначити точку, в яку треба помістити третій заряд так, щоб система зарядів знаходилась в рівновазі. Визначити розмір і знак заряду. Проаналізувати, стійка чи нестійка буде рівновага?

3.3. Визначити, на якій відстані один від одного потрібно розмістити два однойменні точкові заряди в воді, щоб вони відштовхувались з такою ж силою, з якою вони відштовхуються в вакуумі на відстані 9 см. Відносна діелектрична проникність води 81.

3.4. В теорії атома водню прийнято, що електрон обертається навколо протона (ядра) по коловій орбіті радіусу $0,53 \cdot 10^{-10}$ м. Проаналізувати, чому буде дорівнювати лінійна швидкість електрона при такому обертанні? Визначити силу взаємодії між електроном та протоном.

3.5. Визначити, який заряд треба помістити на пластини конденсатора площею 200 см, щоб вони притягуються з силою 0,5 м? Електричне поле рахувати однорідним, а між пластинами діелектрик слюда.

3.6. Розрахувати потенціальну енергію системи двох точкових зарядів 2 нКл та 5 нКл, що знаходяться на відстані 10 см один від одного. Проаналізувати, як зміниться потенціальна енергія, якщо знак одного із зарядів поміняти на негативний.

3.7. Електрон влітає в однорідне електричне поле з напруженістю 100 В/м з початковою швидкістю 10^6 м/с так, що вектор швидкості перпендикулярний до ліній напруженості електричного поля. Визначити: а) силу, що діє на електрон; б) прискорення руху електрона; в) швидкість електрона через 10^{-7} с.

3.8. Проаналізувати, яку прискорюючу різницю потенціалів повинен пройти електрон, що має швидкість 10^6 м/с, щоб його швидкість зростає втричі?

3.9. Знайти відношення швидкостей іонів Cu^{2+} та K^+ , що пройшли однакову різницю потенціалів.

3.10. Визначити напругу на клеммах джерела струму, якщо електрорушійна сила джерела струму 12 В, а внутрішній опір менший зовнішнього в 5 разів.

3.11. Акумулятор дає струм 2 А при замиканні на опір 4 Ом та 1А- при замиканні на 10 Ом. Визначити електрорушійну силу, внутрішній опір елемента та струм короткого замикання.

3.12. Визначити струм короткого замикання, якщо гальванічний елемент з електрорушійною силою 1,5 В дає струм 0,1 А при замиканні його на опір 14 Ом.

МОДУЛЬ 4

4.1. По контуру, що має форму рівностороннього трикутника проходить струм силою 10 А. Сторона трикутника дорівнює 5 см. Визначити індукцію та напруженість магнітного поля в центрі трикутника.

4.2. По двох паралельних, тонких, достатньо довгих провідниках в вакуумі протікають однакові струми силою 10 А. Відстань між провідниками 5 см. Визначити силу взаємодії розраховану на кожний метр довжини провідників. Проаналізувати, яким чином направлені сили взаємодії в залежності від напрямку струмів в провідниках?

4.3. Знайти магнітний момент рамки радіусом 5 см, якщо при проходженні через її витки струму в центрі рамки створюється індукція магнітного поля 0,5 Тл.

4.4. Напруженість магнітного поля в центрі колового витка рівна 100 А/м. Магнітний момент витка $5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Розрахувати радіус витка та силу струму в витку.

4.5. Електрон рухається по колу в однорідному магнітному полі з напруженістю $5 \cdot 10^3 \text{ А/м}$. Визначити частоту та період обертання електрона по орбіті.

4.6. Протон і альфа-частинка, що прискорені однаковою різницею потенціалів, влітають в однорідне магнітне поле. Розрахувати, в скільки разів радіус кривизни траєкторії протона буде більшим, чим радіус кривизни траєкторії альфа-частинки?

4.7. Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Визначити силу, що діє на електрон з боку поля, якщо індукція поля 0,5 Тл, а радіус кривизни траєкторії 1 см.

4.8. Електрон рухається в магнітному полі з індукцією 5 мТл по колу радіусом 1 см. Визначити кінетичну енергію електрона (в Дж та еВ).

4.9. Заряджена частинка пройшла прискорюючу різницю потенціалів і влетіла в схрещене під прямим кутом електричне (з напруженістю 10^4 В/м) і магнітне (з індукцією 0,5 Тл) поля. Визначити різницю потенціалів, якщо, рухаючись перпендикулярно полям, частинка не відхиляється від прямолінійної траєкторії.

4.10. Всередині соленоїда, що містить 10 витків на один см, помістили коловий виток діаметром 5 см. Площина витка розташована під кутом 60° до осі соленоїда. Розрахувати магнітний потік, що пронизує виток, якщо по обмотці соленоїда протікає струм, силою 1 А.

4.11. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,5 Тл рівномірно обертається з частотою 10 с^{-1} рамка, що містить 500 витків, які щільно

прилягають один до одного. Площа рамки рівна 200 см^2 . Визначити миттєве значення е. р. с. індукції для кута повороту рамки 30° та 60° .

4.12. Коливальний контур містить котушку індуктивності L , конденсатор ємністю C та резистор з опором R . Конденсатор заряджений кількістю електрики Q . Визначити: 1) період коливань контуру; 2) логарифмічний декремент затухання контуру; 3) рівняння залежності зміни напруги на обкладках конденсатора від часу (миттєве значення напруги); 4) рівняння залежності зміни струму через котушку індуктивності від часу (миттєве значення сили струму).

МОДУЛЬ 5

5.1. На тонку плівку в напрямку нормалі до її поверхні падає монохроматичне світло з довжиною хвилі $0,5 \text{ мкм}$. Відбите від плівки світло максимально підсилене внаслідок інтерференції. Визначити мінімальну товщину плівки, якщо показник заломлення матеріалу плівки дорівнює $1,4$.

5.2. На дифракційну решітку, яка має 430 штрихів на 1 мм , нормально падає пучок світла від натрієвої лампи з довжиною хвилі $0,589 \text{ мкм}$. Визначити кут відхилення променів світла, при якому спостерігається останній дифракційний максимум. Розрахувати порядок цього максимуму?

5.3. Кут падіння променя на поверхню скла дорівнює 60° . При цьому відбитий пучок світла виявився максимально поляризованим. Визначити кут заломлення променя.

5.4. Визначити, в скільки разів буде ослаблений промінь природного світла, якщо пропустити його через два ніколі, площини поляризації яких становлять кут $\varphi = 45^\circ$. Вважати, що при проходженні через кожний ніколь інтенсивність світла внаслідок відбивання і поглинання зменшується на 10% .

5.5. Оцінити роботу виходу електрона з металу, якщо фотоефект спостерігається, починаючи з довжини хвилі світла $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$.

5.6. Визначити, чи буде мати місце фотоефект, якщо метал, робота виходу якого $A = 2 \text{ еВ}$, освітлюється світлом з довжиною хвилі $\lambda = 500 \text{ нм}$.

5.7. Вирахувати енергію, яку випромінює 1 м^2 поверхні Сонця за 1 хвилину, якщо прийняти температуру його поверхні рівною 5800 К . Рахувати, що Сонце випромінює, як абсолютно чорне тіло.

5.8. Визначити концентрацію фотонів на відстані 1 м від точкового монохроматичного джерела потужністю 10 Вт , що випромінює хвилі довжиною $0,76 \text{ мкм}$.

5.9. Червона межа фотоефекту для заліза дорівнює 262 нм . Знайти

роботу виходу електронів з заліза (в джоулях та електрон-вольтах).

МОДУЛЬ 6

6.1. Використовуючи теорію Бора визначити: радіуси двох перших орбіт електрона в атомі водню; швидкості електрона на цих орбітах; прискорення на них.

6.2. Визначити максимальну енергію фотона, який випромінюється атомом водню в ультрафіолетовій серії.

6.3. Найбільша довжина хвилі спектральної лінії водню серії Лаймана дорівнює 121,6 нм. Розрахуйте найбільшу довжину хвилі в серії Бальмера.

6.4. Обчислити довжину хвилі де Бройля для протона з кінетичною енергією в 100 еВ.

6.5. Проаналізувати, яка енергія зв'язана з масою електрона, який знаходиться у спокої?

6.6. Визначити енергію, масу та імпульс (кількість руху) фотона рентгенівського проміння з довжиною хвилі 10^{-10} м.

6.7. Визначити довжини хвиль де Бройля α -частинки та протона, що пройшли однакову різницю потенціалів 1 кВ.

6.8. Оцінити довжини хвиль де Бройля електрона, що рухається на першій та другій борівській орбіті в атомі водню.

6.9. Визначити максимальну енергію фотона серії Бальмера в спектрі випромінювання атомарного водню.

6.10. Розрахувати енергію фотона, який був випущений атомом водню при переході електрона з третьої орбіти на другу.

6.11. Визначити, яку енергію треба затратити, щоб ядро гелію ${}^2_4\text{He}$ розділити на нуклони?

6.12. Атомний реактор потужністю $P=25 \cdot 10^6$ Вт (25 МВт) має к. к. д. рівне 25%. Визначити, яка маса урану-235 витрачається у реакторі за добу, якщо при одному акті поділу ядра цього ізотопу урану виділяється енергія рівна 200 МеВ?

6.13. Розрахуйте енергію зв'язку ядра атома бора ${}^{10}_5\text{B}$.

6.14. В установках для γ – опромінювання у сільському господарстві використовують β – радіоактивний ізотоп цезію ${}^{137}_{55}\text{Cs}$. Написати реакцію β - розпаду. Визначити максимальну частоту γ - випромінювання, якщо найбільша енергія γ – квантів дорівнює 0,66 МеВ. Обчислити релятивістську швидкість β – частинок, якщо вони мають енергію 1,18 МеВ.

ТИПОВІ ТЕМИ ДЛЯ РЕФЕРАТІ

МОДУЛЬ 1

- 1.1. Інерціальні та неінерціальні системи відліку. Принцип інерції.
- 1.2. Принцип відносності Галілея та Ейнштейна.
- 1.3. Імпульс тіла в класичній механіці та механіці теорії відносності.
- 1.4. Центр мас системи та теорема про рух центру мас.
- 1.5. Центр мас симетричних однорідних тіл та систем матеріальних точок
- 1.6. Реактивний рух. Рівняння Мещерського та Ціолковського.
- 1.7. Консервативні сили в механіці.
- 1.8. Потенціальні силові поля.
- 1.9. Гравітаційна стала та її експериментальне визначення.
- 1.10. Теорема про зміну кінетичної енергії системи.
- 1.11. Графічне зображення величини роботи змінної сили.
- 1.12. Визначення моменту імпульсу системи тіл та умови виконання закону збереження моменту імпульсу
- 1.13. Зміст поняття “енергія” в механіці. Поясніть, як зв’язані поняття “робота” і “енергія”.
- 1.14. Модуль Юнга. Пластичні та пружні деформації реальних тіл.
- 1.15. Умова нерозривності течії рідини. Рівняння Бернуллі.

МОДУЛЬ 2

- 2.1. Температурні шкали Цельсія, Кельвіна, Фаренгейта, Реомюра.
- 2.2. Число ступенів свободи тіла (системи).
- 2.3. Закони Фіка, Фур’є та Ньютона для явищ перенесення. Градієнт фізичної величини.

- 2.4. Коефіцієнти дифузії, теплопровідності та внутрішнього тертя (в'язкості) і їх зв'язок.
- 2.5. Вічний двигун першого та другого роду.
- 2.6. Ентропія та термодинамічна імовірність. Принцип зростання ентропії.
- 2.7. Ентропія та приведена теплота.
- 2.8. Рівняння Ван – дер – Ваальса для реальних газів.

МОДУЛЬ 3

- 3.1. Елементарний електричний заряд та методи його визначення.
- 3.2. Електроємність Землі.
- 3.3. Розрахунок поля диполя.
- 3.4. Сегнетоелектрики.
- 3.5. П'єзоелектричний ефект.
- 3.6. Отримання ультразвуку.
- 3.7. Закони (правила) Кірхгофа для розрахунку складних електромереж.

МОДУЛЬ 4

- 4.1. Постійні магніти та їх поле. Досліди Ерстеда.
- 4.2. Взаємодія паралельних струмів. Одиниця сили струму – 1А.
- 4.3. Відносна магнітна проникливість середовища. Діа-та парамагнетики.
- 4.4. Принцип роботи електромашинного генератора.
- 4.5. Рівняння Максвелла.
- 4.6. Вектор Пойнтінга.
- 4.7. Хвильове рівняння. Оператор Лапласа.
- 4.8. Вихрове електричне поле. Струми Фуко. Індукційні печі.

- 4.9.** Принцип дії циклотрона та МГД- генератора.
- 4.10.** Метод векторних діаграм зображення гармонічних коливань. Биття.
- 4.11.** Аперіодичні процеси. Час релаксації, коефіцієнт загасання, логарифмічний декремент та добротність електричного коливального контуру.
- 4.12.**Складання двох взаємно перпендикулярних коливань. Фігури Ліссажу.
- 4.13.** Резонанс струму та напруги в електричних коливальних контурах.
- 4.14.** Отримання радіохвиль різного діапазону, інфрачервоних хвиль, видимого світла, ультрафіолетових хвиль, рентгенівських та γ – променів.

МОДУЛЬ 5

- 5.1.** Явище повного внутрішнього відбивання. Волоконна оптика.
- 5.2.** Природа випромінювання світла атомами. Хвильовий цуг.
- 5.3.** Смуги рівної товщини та рівного нахилу.
- 5.4.** Дифракція Фраунгофера.
- 5.5.** Спектральні прилади (призмові та дифракційні).
- 5.6.** Рентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналіз.
- 5.7.** Методи отримання поляризованого світла?
- 5.8.** Призма Ніколя
- 5.9.** Дихроїзму. Поляріди.
- 5.10.** Ефекти Зеебека та Керра.
- 5.11.** Цукрометрія.
- 5.12.** Закон Бугера – Ламберта – Бера. Природа поглинання світла.
- 5.13.** В чому суть так званої ультрафіолетової катастрофи?

5.14. Ефект Комптона.**МОДУЛЬ 6**

6.1. Перетворення Галілея та Лоренца. Лоренцеве скорочення лінійних розмірів та проміжків часу.

6.2. Постулати спеціальної теорії відносності Ейнштейна.

6.3. Класичний та релятивістський закони складення швидкостей.

6.4. Залежність маси від швидкості руху. Релятивістський імпульс. Основний закон релятивістської динаміки.

6.5. Взаємозв'язок маси та енергії. Енергія спокою. Енергія зв'язку.

6.6. Еквівалентність гравітаційної та інерціальної мас.

6.7. Гіпотеза де- Бройля

6.8. Співвідношення Гейзенберга.

6.9. Фізичний зміст хвильової функції.

6.10. Рівняння Шредінгера.

6.11. Орбітальне, магнітне та спінове квантове число.

6.12. Принцип роботи лазера.

6.13. Діелектрики і напівпровідники. Валентна зона, зона провідності, ширина забороненої зони.

6.14. Власні та домішкові напівпровідники. Провідність n -типу та p -типу.

6.15. Ефект Холла.

6.16. Природна радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду. Активність, стала розпаду, період напіврозпаду.

6.17. Основні характеристики альфа та бета розпадів. Взаємодія з речовиною. Захист від дії випромінювання.

6.18. Гама-випромінювання та нейтронне випромінювання, їх природа та характеристики. Взаємодія з речовиною. Захист від дії випромінювань.

6.19. Дозиметрія радіоактивних випромінювань. Одиниці активності і дози випромінювання.

6.20. Методи реєстрації випромінювань.

Все методичне забезпечення – лекційний матеріал, опис лабораторних робіт та завдання для самостійної роботи є на електронних носіях. Вся інформація надається студентам викладачем. Ця інформація може бути розміщена на сайті кафедри.

Матеріал інформаційного характеру, який в достатній мірі висвітлений в навчальній літературі, студенти опановують самостійно. **Рекомендована література є в достатній кількості в бібліотеці НУБіП України.**

1. МОДУЛЬ 1 „МЕХАНІКА”

1.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ

Основи кінематики

Параметри руху (радіус-вектор, переміщення, швидкість, прискорення).

Положення матеріальної точки (МТ) у системі координат (та в системі відліку) можна дати двома еквівалентними способами: вказати значення всіх трьох координат x , y , z МТ, або вказати значення її радіус - вектора \vec{r} , тобто вектора, що проведений у МТ з початку координат $(0,0,0)$. Координати x , y , z МТ є при цьому проєкціями радіус-вектора \vec{r} на осі x , y , z . Використовуючи одиничні вектори $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ можна виразити радіус - вектор через його проєкції:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}.$$

При русі точки її координати та радіус-вектор змінюються з часом. Функціональні залежності координат точки або її радіус - вектора від часу називаються **кінематичними рівняннями руху** матеріальної точки :

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1)$$

або

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (2)$$

Три рівняння (1) є скалярними, а рівняння (2) – векторним.

Траєкторією МТ називається сукупність всіх точок, які проходить точка в процесі руху. Це і є та крива лінія, вздовж якої проходить рух матеріальної точки. Залежно від форми траєкторії говорять про прямолінійний та криволінійний рух, а серед криволінійних - виділяють рух по колу. Механічний рух є відносним: його характер та траєкторія залежить від вибору системи відліку.

Вектор, що з'єднує початкове та кінцеве положення радіус-вектора називається вектором **переміщення** (рис. 1). Вектор переміщення, таким чином, є зміною радіус-вектора чи **приростом радіус-вектора**. Довжина відрізка траєкторії (довжина дуги) з точки 1 в точку 2 називається **шляхом**. Шлях – скалярна величина, на відміну від

переміщення, що є векторною величиною. Модуль вектора переміщення завжди за величиною менший або рівний величині шляху. При прямолінійному русі модуль вектора переміщення рівний пройденому шляху.

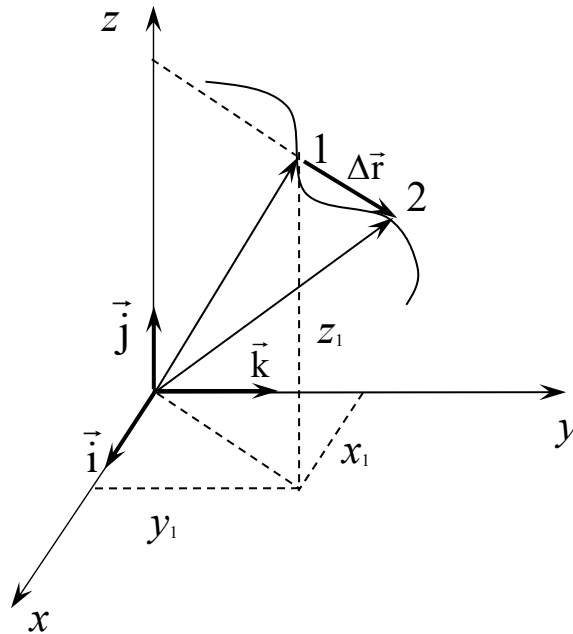


Рис. 1.

Кінематичне рівняння руху матеріальної точки (центра мас твердого тіла) при русі вздовж однієї осі x :

$$x = f(t),$$

де $f(t)$ – деяка функція часу.

Середня шляхова швидкість:

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

де Δs – шлях, який пройшла точка за інтервал часу Δt . Шлях Δs на відміну від різниці координат не може зменшуватись і приймати від'ємні значення, тобто $\Delta s \geq 0$.

Миттєва швидкість – це похідна радіус-вектора за часом:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}, \quad \text{при } \Delta t \rightarrow 0; \quad \text{або} \quad \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Значення проекції швидкості на одну з осей, наприклад, на вісь x :

$$v_x = \frac{dx}{dt}.$$

Вектор швидкості направлений у кожній точці траєкторії по дотичній, а вираз через проекції вздовж осей має вигляд:

$$\mathbf{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}.$$

Середнє прискорення:

$$\langle a_x \rangle = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}.$$

Миттєве прискорення:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Кінематичне рівняння руху матеріальної точки по колу:

$$\varphi = f(t), \quad r = R = \text{const}.$$

Кутова швидкість:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Кутове прискорення:

$$\beta = \frac{d\omega}{dt}.$$

Зв'язок між лінійними та кутовими величинами, які характеризують рух точки по колу:

$$v = \omega \cdot R, \quad a_\tau = \beta \cdot R, \quad a_n = \omega^2 \cdot R,$$

де v – лінійна швидкість; a_τ та a_n – тангенціальне та нормальне прискорення; ω – кутова швидкість; β – кутове прискорення; R – радіус кола.

Повне прискорення \vec{a} точки, що рухається по криволінійній траєкторії, може бути знайдено як геометрична сума тангенціального прискорення \vec{a}_τ , що направлено за дотичною до траєкторії, та нормального прискорення \vec{a}_n , що направлено до центра кривизни траєкторії (рис. 2):

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n.$$

Оскільки вектори \vec{a}_τ та \vec{a}_n взаємно перпендикулярні, то модуль повного прискорення

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

Враховуючи, що тангенціальне та нормальне прискорення точки рівні, відповідно:

$$a_\tau = \beta R, \quad a_n = \omega^2 R,$$

де ω – кутова швидкість тіла; β – його кутове прискорення, отримуємо:

$$a = \sqrt{\beta^2 R^2 + (\omega^2 R)^2} = R\sqrt{\beta^2 + \omega^4}.$$

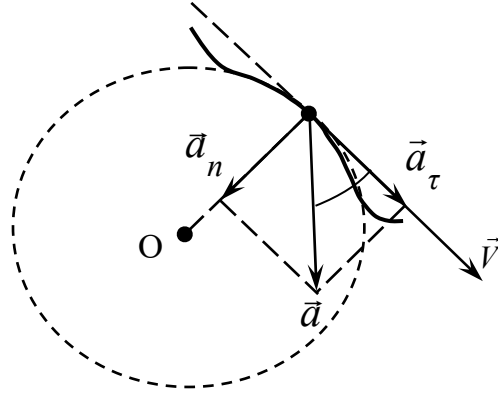


Рис. 2

Кут між повним \vec{a} та нормальним \vec{a}_n прискореннями (рис. 3):

$$\varphi = \arccos(a_n / a).$$

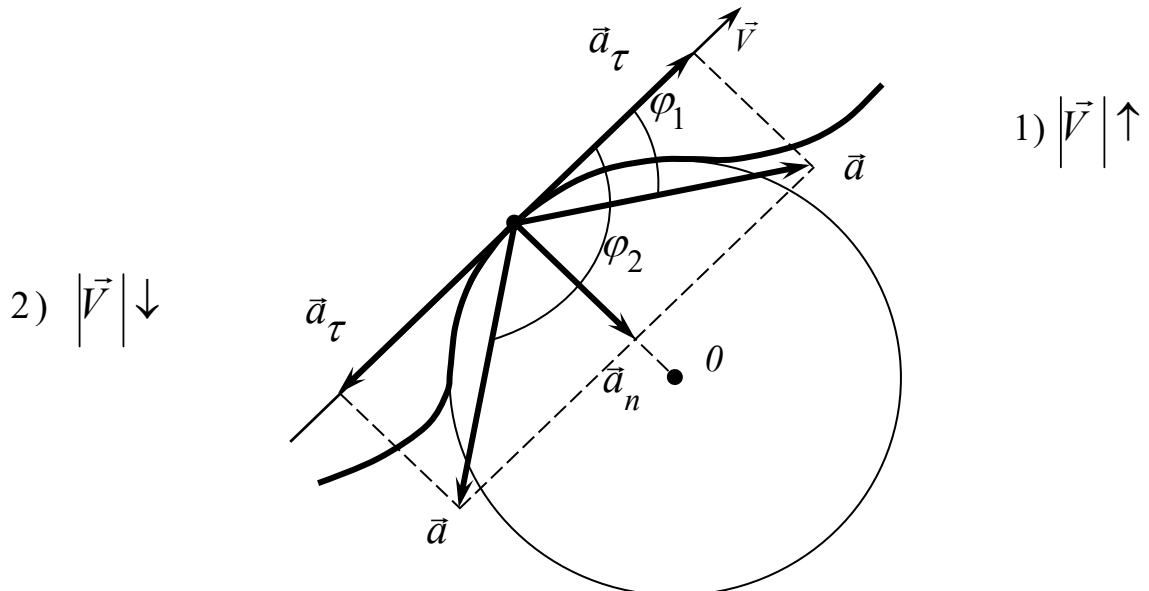


Рис. 3

Кінематичне рівняння гармонічних коливань матеріальної точки:

$$x = x_m \sin(\omega t + \varphi),$$

де x —зміщення; x_m (або A)—амплітуда коливань; ω —колова чи циклічна частота; φ —початкова фаза.

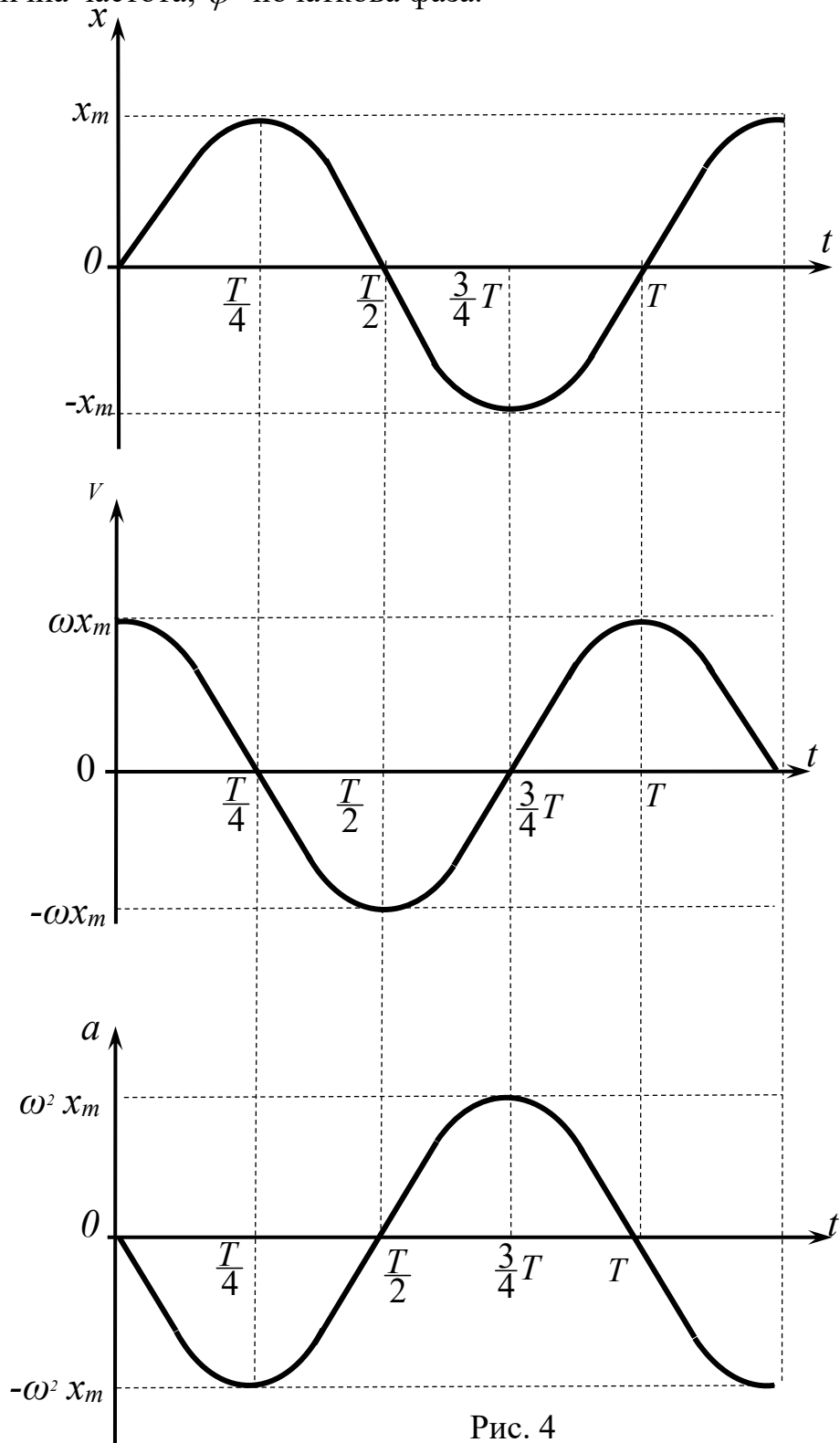


Рис. 4

Швидкість та прискорення матеріальної точки, що бере участь у гармонічних коливаннях (рис. 4):

$$v = x_m \omega \cos(\omega t + \varphi);$$

$$a = -x_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi).$$

Додавання гармонічних коливань одного напрямку та однакової частоти з амплітудами A_1 та A_2 :

а) амплітуда результуючого коливання

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)};$$

б) початкова фаза результуючого коливання

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Траєкторія точки, яка бере участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях $[x = A_1 \cos \omega t, y = A_2 \cos(\omega t + \varphi)]$:

а) $y = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)x$ – якщо різниця фаз $\varphi = 0$;

б) $y = -\left(\frac{A_2}{A_1}\right)x$ – якщо різниця фаз $\varphi = \pm\pi$;

в) $\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1$ – якщо різниця фаз $\varphi = \pm\pi/2$.

Рівняння плоскої біжучої хвилі :

$$y = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v}\right),$$

де y – зміщення будь-якої із точок середовища з координатою x у момент часу t ; v – швидкість розповсюдження коливань у середовищі.

Зв'язок різниці фаз $\Delta\varphi$ коливань з відстанню Δx між точками середовища, що відраховані в напрямку розповсюдження коливань:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta x,$$

де λ – довжина хвилі.

Основні закони динаміки

Перший закон Ньютона. Матеріальна точка (тіло) знаходиться в стані спокою або прямолінійного рівномірного руху, якщо на

нього не діють інші тіла, або їх дія скомпенсована. Цей стан – це рух за інерцією. Використовуючи поняття кінематики запишемо це так:

$$\vec{v} = \text{const}, \vec{a} = 0.$$

Механічний рух відносний, а отже його характер залежить від системи відліку. Перший закон Ньютона постулює існування інерціальних систем відліку (ІСВ). ІСВ повинна бути зв'язана з тілом відліку, що рухається рівномірно і прямолінійно, або знаходиться в спокої. Будь-яка інша система відліку, що рухається по відношенню до ІСВ рівномірно і прямолінійно, або знаходиться в спокої – теж ІСВ.

Всі можливі ІСВ можна одержати з даної ІСВ перенесенням її початку відліку, поворотами осей координат, або рівномірним поступальним рухом системи координат (перетворення Галілея). Усі ІСВ рівноправні та еквівалентні, в них виконуються всі закони динаміки Ньютона, закони збереження імпульсу, моменту імпульсу та механічної енергії (принцип відносності Галілея).

Неінерціальну систему відліку визначають як таку систему, що зв'язана з тілом відліку, яке рухається з прискоренням. ІСВ – це абстракція. Реальні системи відліку тим ближче наближаються до ІСВ, чим менше прискорення, з яким рухається тіло відліку реальної системи.

Найчастіше мають справу з такими системами відліку:

- 1) система відліку, зв'язана з поверхнею Землі – **геоцентрична (лабораторна) система відліку** – є наближено інерціальною для великого кола явищ, в яких можна знехтувати добовим обертанням Землі навколо власної осі та обертанням навколо Сонця.;
- 2) система відліку, зв'язана з центром Сонця, в якій осі координат направлені на три відомі зірки – **геліоцентрична система відліку** – є зі значно більшою точністю інерціальною системою відліку.

Масою (m) тіла називається скалярна фізична величина, яка є мірою інерційних властивостей тіла при його поступальному русі.

Імпульсом (\vec{p}) тіла називається векторна фізична величина, яка дорівнює добутку маси тіла на його швидкість. Імпульс матеріальної точки масою m , яка рухається поступально зі швидкістю \vec{v} :

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Другий закон Ньютона:

$$\begin{aligned} d\vec{p} &= \vec{F}dt, \text{ або} \\ \frac{d\vec{p}}{dt} &= \vec{F}, \end{aligned} \quad (3)$$

де \vec{F} – сила, що діє на тіло. Ця сила може бути і результируючою кількох прикладених до тіла сил. Таким чином, **швидкість зміни імпульсу матеріальної точки дорівнює прикладеній до неї силі:**

Якщо масу тіла вважати постійною, то другий закон Ньютона можна записати так: **прискорення матеріальної точки прямо пропорційне діючій на неї силі і обернено пропорційне її масі:**

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (4)$$

Форма запису другого закону Ньютона (3) є більш загальною, ніж форма (4), тому що при швидкостях руху близьких до швидкості світла у вакуумі ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с) маса тіла починає залежати від швидкості, і формула (4) втрачає силу, а формула (3) залишається справедливою. Відмітимо, що другий закон Ньютона виконується тільки в інерціальних системах відліку.

Третій закон Ньютона. Сили взаємодії між двома матеріальними точками рівні за величиною, протилежні за напрямком і направлені вздовж прямої, що з'єднує ці матеріальні точки.

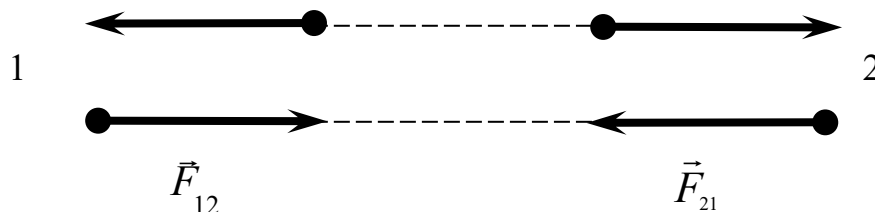


Рис. 5

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21},$$

де \vec{F}_{12} – сила, що діє на першу матеріальну точку зі сторони другої, \vec{F}_{21} – сила, що діє на другу матеріальну точку зі сторони першої.

Відмітимо, що сили, що діють за третім законом Ньютона, не можуть зрівноважити одна одну, тому що прикладені до різних матеріальних точок (див. рис. 5 для випадку відштовхування та притягання двох матеріальних точок).

Закон збереження імпульсу. Другий закон Ньютона можна записати та сформулювати так (закон зміни імпульсу): зміна імпульсу матеріальної точки $d\vec{p}$ за проміжок часу dt дорівнює імпульсу сили $\vec{F}dt$, що діє на точку протягом даного проміжку часу:

$$d\vec{p} = \vec{F} dt .$$

Сукупність матеріальних точок (тіл), що розглядається як єдине ціле, називається механічною системою. Механічна система тіл, на яку не діють зовнішні сили, називається **замкненою** (або ізольованою).

Закон збереження імпульсу замкнутої (ізольованої) системи:

$$\sum_{i=1}^N \vec{p}_i = \text{const} .$$

Імпульс замкненої системи є величина постійна:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 + \dots m_n \vec{v}_n = \text{const} ,$$

де n – кількість тіл, що утворюють замкнену систему.

Для двох тіл ($n = 2$):

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 ,$$

де \vec{v}_1, \vec{v}_2 – швидкості тіл у момент часу, який прийнятий за початковий (наприклад, до удару); \vec{u}_1, \vec{u}_2 – швидкості тих же тіл у момент часу, прийнятий за кінцевий (після удару).

Сили

Сили, які розглядаються в механіці:

а) сили гравітації (взаємодія за законом всесвітнього тяжіння).

Сила притягання між двома матеріальними точками прямо пропорційна добутку мас матеріальних точок і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} ,$$

де $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – гравітаційна стала; m_1 і m_2 – маси матеріальних точок; r – відстань між ними. Ця сила називається гравітаційною (або силою всесвітнього тяжіння). Гравітаційні сили завжди є силами притягання і направлені вздовж прямої, що проходить через ці дві матеріальні точки, тобто, є центральними. Наслідком дії таких сил є **сила тяжіння** – сила з якою Земля притягує до себе тіла, що знаходяться в полі сил гравітації Землі: $\vec{F} = m\vec{g}$, де \vec{g} – прискорення вільного падіння.

У випадку гравітаційної взаємодії силу можна виразити також через напруженість \vec{g} гравітаційного поля:

$$\vec{F} = m\vec{g} ;$$

б) сила пружності – виникає при пружних деформаціях і визначається законом Гука:

$$F = k\Delta l,$$

де k – коефіцієнт пружності (у випадку пружини – жорсткість);
 Δl – абсолютна деформація; пружна сила спрямована протилежно напрямку деформації. Цей закон записується також у вигляді:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

де $\sigma = \frac{F}{S}$ – механічне напруження; E – модуль Юнга (є деформаційною характеристикою даного матеріалу); $\varepsilon = \Delta l / l_0$ – відносна деформація;

в) сила тертя (зовнішнього) – сила, що виникає на поверхні двох твердих тіл, що контактують, і спрямована по дотичній до поверхні контакту в сторону, протилежну напрямку, чи можливому напрямку руху тіла. Зовнішнє (сухе) тертя виникає при відносному переміщенні двох поверхонь твердих тіл, що контактують (тертя ковзання, кочення) або при спробах викликати таке переміщення (тертя спокою). Внутрішнє тертя спостерігається при відносному переміщенні частин одного і того ж суцільного тіла (рідини або газу). Сили внутрішнього тертя виникають, наприклад, при русі твердого тіла в рідині чи газі.

Сила тертя ковзання рівна:

$$F = \mu N,$$

де μ – коефіцієнт тертя ковзання; N – сила нормального тиску.

Механічна робота та енергія Кінетична і потенціальна енергія.

Повна механічна енергія

Енергією називається скалярна фізична величина, яка є універсальною кількісною мірою різних форм руху матерії. Різним формам руху матерії відповідають різні види енергії. Так, механічній формі руху матерії відповідає механічна енергія, тепловій формі руху – теплова енергія тощо. Запас енергії характеризує здатність тіла виконувати роботу. Робота A , яка виконується зовнішніми силами, визначається як міра зміни енергії системи:

$$A = \Delta W = W_2 - W_1.$$

Робота, яку здійснює постійна за величиною та напрямком сила \vec{F} при переміщенні тіла на прямолінійній ділянці шляху s , визначається скалярним добутком вектора сили \vec{F} і вектора переміщення \vec{s} .

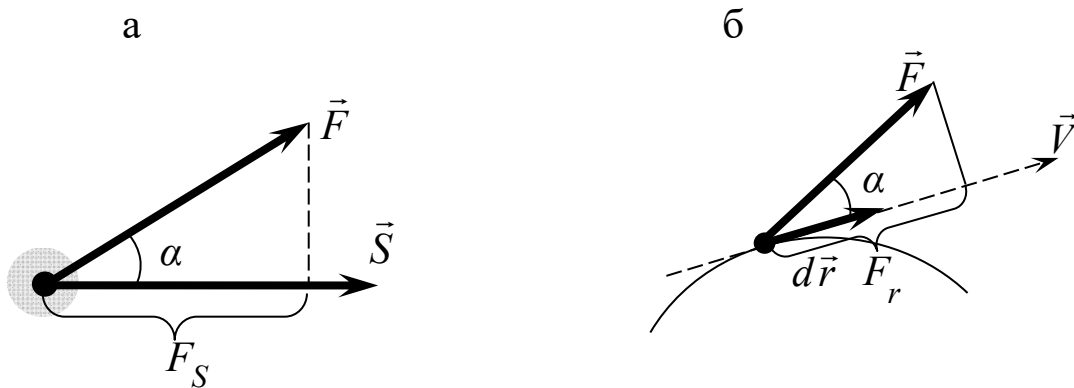


Рис. 6

$$A = (\vec{F} \vec{s}) = F s \cos \alpha = F_s s \quad , \quad (5)$$

де α – кут між векторами сили \vec{F} і переміщення \vec{s} ; $F_s = F \cos \alpha$ – проекція сили на напрямок переміщення (рис. 6, а).

Робота є скалярною величиною, вона може бути позитивною, від’ємною, чи рівною нулю.

У загальному випадку руху тіла по криволінійній траєкторії під дією **змінної сили** \vec{F} спочатку знаходять елементарну роботу dA на довільному елементарному переміщенні $d\vec{r}$ (рис.6, б). Елементарна робота дорівнює скалярному добутку вектора сили на вектор переміщення:

$$dA = \vec{F} d\vec{r} = F_r dr \quad (6)$$

Сумарну роботу A сили \vec{F} на ділянці траєкторії від точки 1 до точки 2 знаходять інтегруванням:

$$A = \int_1^2 dA = \int_1^2 F_r dr \quad (7)$$

Одиницею роботи в СІ є 1 джоуль (1 Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н м} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}.$$

Консервативною називають силу, робота якої визначається тільки початковим і кінцевим положенням тіла на траєкторії і не залежить від форми траєкторії. Робота консервативних сил по замкненій траєкторії дорівнює нулю. Прикладом консервативних сил є сили тяжіння, сили пружності. Прикладом неконсервативних сил (дисипативних) є сили тертя (сили опору).

Фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи dA до проміжку часу dt , за який ця робота виконується, називається **потужністю**:

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{d(\vec{F}d\vec{r})}{dt} = \vec{F}\vec{v} = Fv \cos \alpha. \quad (8)$$

Одиниця потужності в СІ– 1 ват (1 Вт):

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ кг м}^2 \text{ с}^{-3}.$$

Кінетична і потенціальна енергія. Повна механічна енергія.

У механіці розглядають два види енергії: **кінетичну** енергію W_k (енергію руху) і **потенціальну** енергію W_p (енергію взаємодії).

Повна механічна енергія тіла (системи тіл) W складається із суми кінетичної і потенціальної енергій:

$$W_k + W_p = W. \quad (9)$$

Кінетична енергія тіла масою m , яке рухається поступально з швидкістю v , визначається за формулою:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}. \quad (10)$$

Кінетична енергія тіла, що обертається навколо нерухомої осі, визначається за формулою:

$$W_k = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (11)$$

де J – момент інерції тіла відносно осі обертання; ω – його кутова швидкість.

Якщо тіло масою m одночасно рухається поступально і обертально, то

$$W_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (12)$$

де v – швидкість центра мас.

Потенціальна енергія – це енергія системи взаємодіючих тіл (тіло підняте над Землею в системі “Земля – тіло”), або системи взаємодіючих частинок окремого тіла (пружно–деформоване тіло).

Потенціальна енергія залежить від природи сил взаємодії і від конфігурації системи.

Різним видам взаємодії відповідають різні формули для потенціальної енергії. Приклади потенціальної енергії різних взаємодій у механіці:

а) потенціальна енергія гравітаційної взаємодії двох матеріальних

точок, що знаходяться на відстані r :

$$W_n = -G \frac{m_1 m_2}{r}; \quad (13)$$

б) потенціальна енергія тіла масою m , яке знаходиться в однорідному полі сили тяжіння Землі, тобто піднятого над поверхнею Землі на висоту h (формула дійсна за умови $h \ll R_3$, де R_3 —радіус Землі; поверхня Землі прийнята за нульовий рівень):

$$W_n = mgh;$$

в) потенціальна енергія пружно–деформованої пружини:

$$W_n = \frac{kx^2}{2},$$

де x —величина деформації, k —коефіцієнт пружності.

Закон збереження механічної енергії

Повна механічна енергія замкненої системи тіл, в якій діють тільки консервативні сили, є величина стала:

$$W = W_k + W_n = const.$$

Основний закон динаміки обертального руху

Обертання твердого тіла, при якому тільки одна точка залишається нерухомою, називається обертанням навколо нерухомої точки. Таке обертання тіла можна розглядати в будь–який момент часу як обертання тіла навколо миттєвої осі обертання.

Обертальну дію сили характеризують фізичною величиною—**моментом сили**. Момент сили—це вектор, напрямком якого в просторі зв'язаний з обертанням—аксіальний вектор.

Моментом сили відносно нерухомої точки O називається фізична величина, що визначається векторним добутком радіуса–вектора \vec{r} , проведеного з точки O в точку A прикладання сили, на вектор сили \vec{F} (рис. 7):

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]. \quad (14)$$

Вектор моменту сили \vec{M} направлений перпендикулярно до площини векторів \vec{r} і \vec{F} . Його напрямок визначається правилом

правого гвинта при його обертанні від \vec{r} до \vec{F} . Модуль моменту сили дорівнює добутку сили F на плече l :

$$M = Fr \sin \alpha = Fl, \quad (15)$$

де α – гострий кут між векторами \vec{r} і \vec{F} ; $l = r \sin \alpha$ – найкоротша відстань між лінією дії сили F і точкою O – *плече сили*.

Моментом сили відносно нерухомої осі Z називається скалярна величина M_z , яка дорівнює проекції на цю вісь вектора моменту сили \vec{M} , визначеного відносно довільної точки O , вибраної на цій осі (рис.8).

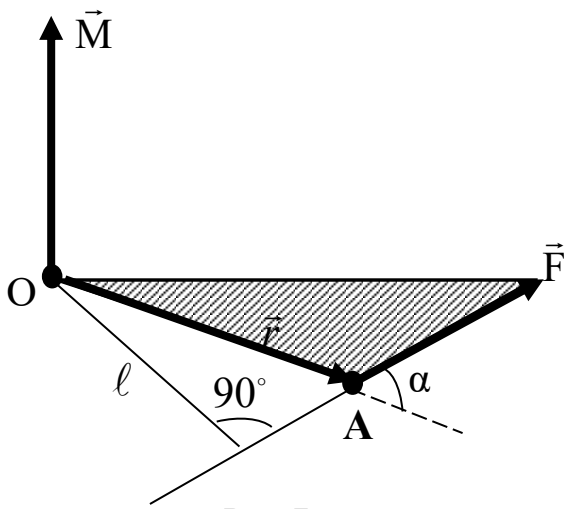


Рис.7

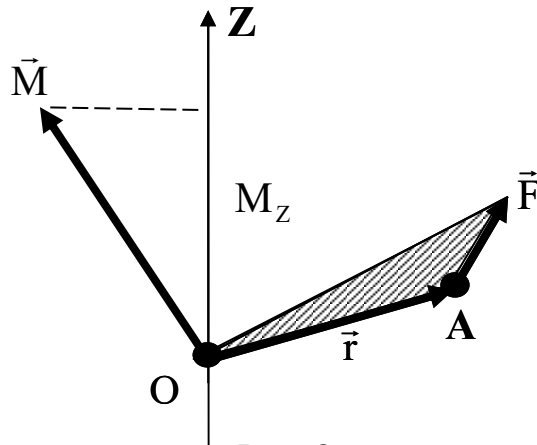


Рис. 8

Мірою інертності тіла при обертальному русі є динамічна характеристика обертання – **момент інерції J** .

Моментом інерції тіла (система матеріальних точок) відносно даної осі називається фізична скалярна величина, яка дорівнює сумі моментів інерції всіх матеріальних точок, з яких складається тіло:

$$J = \sum J_i = \sum_{i=1}^{i=n} m_i r_i^2, \quad (16)$$

де $J_i = m_i r_i^2$ – момент інерції матеріальної точки відносно даної осі.

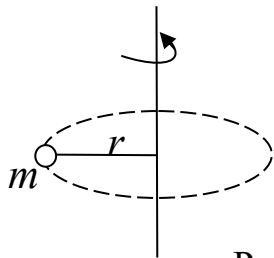
У випадку неперервного розподілу маси в тілі ця сума зводиться до інтеграла:

$$J = \int r^2 dm, \quad (17)$$

де інтегрування виконується по всьому об'єму тіла.

Наведемо приклади моментів інерції деяких однорідних тіл правильної геометричної форми (вісь обертання проходить через центр мас).

1. Момент інерції матеріальної точки (рис. 9):



$$J = m r^2 . \quad (18)$$

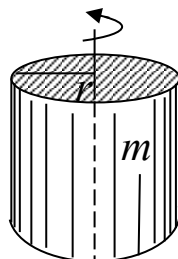
Рис. 9

2. Момент інерції обруча (тонкостінного циліндра) відносно осі, що проходить перпендикулярно площині обруча в центрі кола (вісь збігається з віссю циліндра):

$$J = m R^2 ;$$

де R —радіус обруча (циліндра);

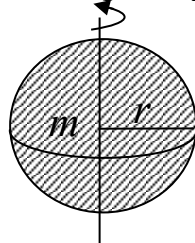
3. Момент інерції однорідного диска (або циліндра) радіусом R відносно осі, яка перпендикулярна площині диска (або циліндра)), та збігається з геометричною віссю (віссю симетрії) (рис. 10):



$$J = \frac{1}{2} m r^2 . \quad (19)$$

Рис. 10

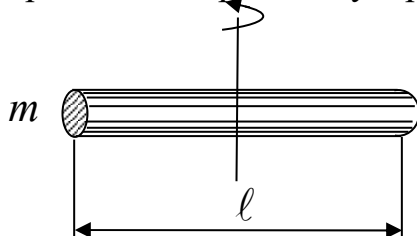
3. Момент інерції кулі (рис 11):



$$J = \frac{2}{5} m r^2 . \quad (20)$$

Рис. 11

4. Момент інерції стержня довжиною l відносно осі, що проходить перпендикулярно стержню, посередині його рис. 12:

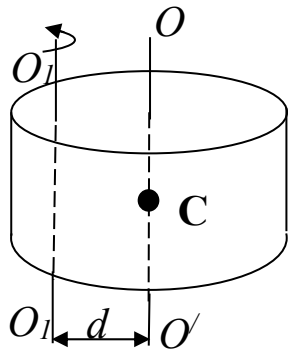


$$J = \frac{1}{12} ml^2 . \quad (21)$$

Рис. 12

Якщо відомий момент інерції тіла відносно осі, що проходить через його центр мас, то момент інерції відносно будь-якої паралельної осі визначається **теоремою Штейнера**:

момент інерції J тіла відносно довільної осі дорівнює його моменту інерції J_c відносно паралельної осі, що проходить через центр мас C тіла плюс добуток маси тіла на квадрат відстані d між осями (рис. 13)



$$J = J_c + md^2 . \quad (22)$$

Рис. 13

Основне рівняння динаміки обертального руху твердого тіла відносно нерухомої осі записується так:

$$M_z = J_z \beta , \quad (23)$$

де M_z – момент сили відносно осі z ; J_z – момент інерції тіла відносно осі z ; $\beta = d\omega/dt$ – кутове прискорення тіла.

Якщо вісь z збігається з головною віссю інерції тіла, яка проходить через центр мас, то має місце векторна рівність

$$\vec{M} = J\vec{\beta} . \quad (24)$$

Момент імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу

Момент імпульсу твердого тіла L_z відносно нерухомої осі Z – фізична величина, яка дорівнює добутку моменту інерції тіла на його кутову швидкість:

$$L_z = J_z \omega . \quad (25)$$

У випадку обертання тіла навколо нерухомої осі, що проходить через його центр мас, момент імпульсу обчислюється за формулою:

$$\vec{L} = J\vec{\omega} . \quad (26)$$

Введення вектора моменту імпульсу дозволяє записати **основне рівняння** динаміки обертального руху у більш загальній формі, подібній до рівняння Ньютона для поступального руху:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} . \quad (27)$$

Для замкненої системи момент зовнішніх сил $\vec{M} = 0$, тоді $\frac{d\vec{L}}{dt} = 0$, звідки

$$\vec{L} = J\vec{\omega} = const . \quad (28)$$

Цей вираз являє собою **закон збереження моменту імпульсу**: момент імпульсу замкненої системи є величина стала, тобто не змінюється з часом.

1.2. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 1. Рівняння руху матеріальної точки вздовж деякої осі має вигляд $x = A + B t + C t^2$, де $A=5$ м, $B=1$ м/с, $C= -0,5$ м/с³. Знайти координату x , швидкість V та прискорення a точки в довільний момент часу t та в момент часу $t_1=5$ с.

Розв'язання. Запишемо координату x з урахуванням числових значень коефіцієнтів A , B та C : $x = 5 + t - 0,5 t^2$, що для моменту часу $t = t_1=5$ с дасть $x(5)=5+5-0,5 (5)^2=-2,5$ м.

Миттєва швидкість є перша похідна від координати за часом:

$$v = dx/dt = 1 - t; \text{ а для } t = t_1=5 \text{ с швидкість буде рівна } v = 1 - 5 = -4 \text{ м/с.}$$

Прискорення точки знайдемо, якщо візьмемо першу похідну від швидкості за часом:

$a = dv/dt = -1$, тобто прискорення за величиною є постійним і дорівнює 1 м/с².

Рух цієї матеріальної точки буде починатись у точці з координатою 5 м від початку координат, початкова швидкість становить 1 м/с, а прискорення дорівнює -1 м/с². Знак “-“ для значення прискорення свідчить про те, що вектори швидкості та прискорення в початковий момент часу направлені в різні сторони. Подібним рівнянням буде описуватись рух тіла, що кинуте вертикально вгору з деякої висоти. При цьому вектор початкової швидкості теж буде направлений вертикально вгору, а вектор прискорення (прискорення вільного падіння g)—вертикально вниз. Спочатку рух при цьому буде рівноуповільнений, а після досягнення найбільшої висоти почнеться рівноприскорений рух вниз.

Приклад 2. Тіло обертається навколо нерухомої осі за законом $\varphi = A + Bt + Ct^2$, де $A = 10$ рад, $B = 20$ рад/с, $C = -2$ рад/с². Знайти

повне прискорення точки, яка знаходиться на відстані $r = 0,1$ м від осі обертання, для моменту часу $t = 4$ с.

Розв'язання. Повне прискорення \vec{a} точки, що рухається по кривій лінії, може бути знайдено, як геометрична сума тангенціального прискорення \vec{a}_τ , що направлене по дотичній до траєкторії, та нормального прискорення \vec{a}_n , що направлене до центра кривизни траєкторії:

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n.$$

Оскільки вектори \vec{a}_τ та \vec{a}_n взаємно перпендикулярні, то модуль прискорення

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1)$$

Тангенціальне та нормальне прискорення точки тіла, що обертається, виражаються формулами :

$$a_\tau = \beta r, a_n = \omega^2 r, \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість тіла; β – його кутове прискорення.

Підставивши вирази (2) у формулу (1), знаходимо:

$$a = \sqrt{\beta^2 r^2 + (\omega^2 r)^2} = r \sqrt{\beta^2 + \omega^4}. \quad (3)$$

Кутову швидкість ω знайдемо, взявши першу похідну кута повороту за часом:

$$\omega = d\varphi / dt = B + 2Ct.$$

У момент часу $t = 4$ с кутова швидкість:

$$\omega = 20 + 2(-2)4 \text{ рад/с} = 4 \text{ рад/с}.$$

Кутове прискорення знайдемо, якщо візьмемо похідну від кутової швидкості за часом:

$$\beta = d\omega / dt = 2C = -4 \text{ рад/с}^2.$$

Підставивши значення ω, β, r у формулу (3), отримаємо значення повного прискорення:

$$a = 0,1 \sqrt{(-4)^2 + 4^4} \text{ (м/с}^2\text{)} = 1,65 \text{ м/с}^2.$$

Приклад 3. Визначити силу натягу канату при підніманні вантажу масою 1,5 т, якщо за 2 с від початку руху швидкість зросла від 0 до 3,6 м/с.

Розв'язання. При підніманні вантажу з прискоренням на нього діють дві сили: сила тяжіння mg , яка направлена вертикально вниз, та сила натягу канату T , що діє вертикально вгору. Під дією результуючої цих сил вантаж буде рухатися прискорено. Якщо взяти

напрямок вгору за позитивний, то згідно з другим законом Ньютона можна записати:

$$T - mg = ma \text{ або } T = m(g + a). \quad (1)$$

Прискорення при рівноприскореному русі визначається із співвідношення:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}, \quad (2)$$

де v_0 – початкова швидкість; v_t – кінцева швидкість; t – час, за який пройшла зміна швидкості.

Якщо початкова швидкість дорівнює нулю, то

$$a = \frac{v_t}{t}. \quad (3)$$

Підставивши в формулу (1) вираз для a із (3), отримаємо:

$$T = m\left(g + \frac{v_t}{t}\right). \quad (4)$$

Виразимо числові значення величин у системі СІ:

$$m = 1,5 \text{ т} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг}, \quad v_t = 3,6 \text{ м/с}, \quad t = 2 \text{ с}:$$

Перевіряємо одиниці правої та лівої частин розрахункової формули (4), для того, щоб переконатись, що вони збігаються. Для цього підставляємо в формулу замість величин їх одиниці в системі СІ:

$$\text{Н} = \text{кг}(\text{м/с}^2 + \text{м/с} \cdot \text{с}) = (\text{кг} \cdot \text{м})/\text{с}^2 = \text{Н}.$$

Підставимо числові значення в розрахункову формулу (4) і підрахуємо:

$$T = 1,50 \cdot 10^3 (9,81 + 3,60/2) \text{ Н} = 1,74 \cdot 10^4 \text{ Н} = 17,4 \text{ кН}.$$

Приклад 4. Маховик у вигляді суцільного диска масою 80 кг та радіусом 50 см почав обертатися рівноприскорено під дією обертового моменту 20 Н·м. Визначити: 1) кутове прискорення; 2) кінетичну енергію, яку одержав маховик за час 10 с від початку обертання.

Розв’язання. 1.3 основного рівняння динаміки обертового руху:

$$M = J \cdot \beta,$$

де J – момент інерції маховика; β – кутове прискорення, отримуємо:

$$\beta = \frac{M}{J}. \quad (1)$$

Як відомо, момент інерції диска або циліндра відносно осі, яка збігається з геометричною віссю диска, визначається за формулою

$$J = \frac{1}{2} m R^2. \quad (2)$$

Якщо підставити вираз для J із (2) в (1), то одержимо:

$$\beta = \frac{2M}{mR^2}. \quad (3)$$

Виразимо величини в одиницях СІ: $M=20$ Н·м; $m= 80$ кг; $R = 50$ см = 0,5 м. Перевіримо одиниці правої та лівої частин розрахункової формули (3):

$$1/c^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{с}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2), \quad 1/c^2 = 1/c^2.$$

Проведемо обчислення:

$$\beta = \frac{2 \cdot 20}{80 \cdot 0,5^2} \text{ рад/с}^2.$$

2. Кінетична енергія тіла, що обертається, виражається формулою:

$$T = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (4)$$

де ω – кутова швидкість тіла.

При рівноприскореному обертанні кутова швидкість зв'язана з кутовим прискоренням співвідношенням

$$\beta = \frac{\omega_t - \omega_0}{t}, \quad (5)$$

де ω_t – кутова швидкість у момент часу t ; ω_0 – початкова кутова швидкість.

Оскільки за умовою задачі $\omega_0 = 0$, то з рівняння (5) отримаємо:

$$\omega_t = \beta t. \quad (6)$$

Підставляючи вираз для (6) та (2) в (4), маємо:

$$T = \frac{1}{2} m R^2 \frac{\beta^2 t^2}{2} = \frac{m}{4} (R\beta t)^2. \quad (7)$$

Перевіряємо одиниці правої та лівої частин формули (7):

$$\text{Дж} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2 / \text{с}^4 = \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м} / \text{с}^2 = \text{Н} \cdot \text{м}, \quad \text{Дж} = \text{Дж}.$$

Вирахуємо:

$$T = \frac{80 \cdot (0,5 \cdot 2 \cdot 10)^2}{4} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2 \text{ кДж}.$$

1.3. ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ №1 МОДУЛЬ 1 „МЕХАНІКА”

101-110. Матеріальна точка рухається вздовж прямої. Рівняння руху точки $X = A + B t + C t^2 + D t^3$, де A, B, C, D – параметри, які вказані нижче для кожного варіанта в таблиці для цієї задачі.

1. Знайти значення швидкості та прискорення точки в довільний момент часу (миттєва швидкість та прискорення).

2. Знайти значення швидкості та прискорення точки через t_1 секунд після початку руху. Значення моменту часу t_1 для кожного варіанта наведено в таблиці.

3. Дати графічне зображення в масштабі залежності координати швидкості та прискорення від часу. По осі часу відкладати значення від 0 до моменту часу t_1 , вказаного в таблиці для кожного варіанта.

Значення параметрів для задач № 101-110

Варіант	Задача	A, м	B, м /с	C, м /с ²	D, м /с ³	t_1 , с
1	101	0	-50	0,5	0,2	10
2	102	100	0	4	-1	6
3	103	150	10	0	-2	5
4	104	100	20	-5	0	10
5	105	100	5	2	-0,1	8
6	106	100	0	5	-2	5
7	107	20	10	0	-1	5
8	108	-50	-10	2	0	10
9	109	20	20	-5	0	10
0	110	200	2	2	-2	5

111-120. Матеріальна точка рухається по колу радіусом R . Рівняння руху точки $\varphi = A + B t + C t^2 + D t^3$, де A, B, C, D – параметри, які вказані нижче для кожного варіанта в таблиці.

1. Визначити значення кутової швидкості в довільний момент часу, а також для моменту часу t_1 , вказаного в таблиці для кожного варіанта.
2. Знайти лінійну швидкість точки в довільний момент часу, а також для моменту часу t_1 , вказаного в таблиці для кожного варіанта.
3. Визначити значення тангенціального прискорення в довільний момент часу, а також для моменту часу t_1 , вказаного в таблиці для кожного варіанта.
4. Визначити значення нормального прискорення в довільний момент часу, а також для моменту часу t_1 , вказаного в таблиці для кожного варіанта.
5. Знайти повне прискорення точки в довільний момент часу, а також для моменту часу t_1 , вказаного в таблиці для кожного варіанта.
6. Визначити кут між векторами швидкості та повного прискорення в момент часу t_1 .

7. Зобразити на рисунку в масштабі вектори швидкості та тангенціального, нормального і повного прискорення в момент часу t_1 .

Значення параметрів для задач № 111-120

Варіант	Задача	A , рад	B , рад/с	C , рад/с ²	D , рад/с ³	t_1 , с	R , м
1	111	$0,5\pi$	0	$0,5\pi$	$-0,1\pi$	3	1
2	112	$1,5\pi$	π	$-0,5\pi$	$0,2\pi$	2	2
3	113	$1,0\pi$	$0,5\pi$	$-\pi$	$0,1\pi$	5	1
4	114	$0,5\pi$	$1,5\pi$	$0,5\pi$	$-0,2\pi$	2	2
5	115	2π	$0,5\pi$	$-0,5\pi$	$-0,1\pi$	3	5
6	116	$0,5\pi$	$0,5\pi$	π	$0,1\pi$	2	2
7	117	2π	π	$-\pi$	$0,5\pi$	4	3
8	118	$0,5\pi$	$0,5\pi$	0π	$-0,1\pi$	2	2
9	119	2π	$0,5\pi$	$-0,5\pi$	$0,2\pi$	3	1
0	120	$0,5\pi$	π	$-\pi$	$-0,1\pi$	5	2

121. Чому дорівнює коефіцієнт тертя коліс трактора об ґрунтову дорогу, якщо при швидкості 36 км / год гальмівний шлях дорівнює 10 м?

122. Через нерухомий блок перекинута тонка нерозтяжна нитка, на кінцях якої підвішені два тягарці масами $m_1= 0,1$ кг та $m_2= 0,2$ кг. З яким прискоренням почнуть рухатись тягарці після того, як їх відпустили? Який шлях пройде кожен із них за першу секунду руху? Масою блока та тертям у блоці знехтувати.

123. З яким максимальним прискоренням може рухатись автомобіль при русі ввєрх по ділянці дороги з кутом нахилу 20° , якщо коефіцієнт зчєплення коліс з покриттям дороги 0,5? Який шлях пройде автомобіль за 10 с, якщо в момент початку підйому його швидкість дорівнювала 72 км/год ?

124. Вантажна машина масою 3 т їде зі швидкістю 36 км/год. Якої величини гальмівна сила може зупинити її на відстані 50 м? Чому дорівнює при цьому коефіцієнт опору руху?

125. Трактор масою 10 т рушає з місця і протягом 10 с. досягає швидкості 18 км/год. Яку силу тяги розвиває мотор трактора, якщо коефіцієнт опору 0,05, а рух рівноприскорений.

126. Якою має бути частота обертання диска (в обертах за секунду) в дисковому розкидачі добрив, щоб добриво, яке падає на відстані 10 см від осі, розкидалося по полю? Коефіцієнт тертя 0,83.

127. При будівництві ферми вантаж масою 200 кг було піднято за допомогою канату вертикально вгору протягом 5 с на висоту 25 м. Визначити силу натягу канату, якщо рух був рівноприскореним.

128. Автомобіль масою 2 т проїжджає зі швидкістю 36 км/год по опуклому мосту з радіусом кривизни 50 м. З якою силою тисне автомобіль у верхній точці моста? Прискорення вільного падіння взяти 10 м/с^2 .

129. Штучний супутник рухається по колу на орбіті навколо Землі на висоті 600 км. Визначити швидкість його руху. Прийняти радіус Землі $6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$, а масу Землі $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

130. З якою силою тисне на підлогу ліфта людина масою 80 кг, якщо ліфт почав рухатися з прискоренням 2 м/с^2 ; а) ввєрх б) вниз?

131. З висоти $h=3 \text{ м}$ на сталєну плиту вільно падає кулька масою $m=0,5 \text{ кг}$ і підстрибує на висоту $h_1=2 \text{ м}$. Визначити зміну імпульсу кульки при ударі. Чому дорівнювала б ця зміна при абсолютно пружному ударі ?

132. При горизонтальному польоті зі швидкістю 250 м/с снаряд масою 6 кг розірвався на дві частини. Більша частина масою 4 кг одержала швидкість 400 м/с у напрямку польоту снаряда. Визначити модуль і напрямок швидкості меншої частини снаряда.

133. Визначити імпульс, який отримає стінка при ударі об неї кульки масою 0,3 кг, якщо кулька рухалася зі швидкістю 10 м/с під кутом 60° до площини стінки. Удар об стінку вважати абсолютно пружним.

134. Кулька масою $m_1 = 0,1 \text{ кг}$ рухається зі швидкістю $V_1 = 4 \text{ м/с}$ і зіштовхується з кулькою масою $m_2=0,05\text{кг}$, що рухається назустріч їй зі швидкістю $V_2 = 3 \text{ м/с}$. Які швидкості u_1 і u_2 кульок після удару? Удар вважати абсолютно пружним, прямим, центральним.

135. Кулька масою $m_1 = 0,1 \text{ кг}$ зіштовхується з масивнішою кулькою, що знаходиться у стані спокою і при цьому втрачає 40 % кінетичної енергії. Визначити масу m_2 більшої кульки. Удар вважати абсолютно пружним, прямим, центральним.

136-140. Металева кулька масою m_1 , що рухалася зі швидкістю V_1 зіткнулася з пластиліною кулькою масою m_2 , яка рухалась зі швидкістю V_2 . Вважаючи удар абсолютно непружним (кульки в наступний момент після удару почали рухатись разом, тобто з однією швидкістю), прямим, центральним, необхідно:

- 1) визначити швидкість руху кульок після зіткнення;
- 2) знайти, яка частина механічної енергії при цьому перетворилась у теплову.

Розглянути задачу в загальному (в аналітичному) вигляді та для значень, що вказані в таблиці до цієї задачі. Від'ємне значення швидкості (алгебраїчне значення) V_2 свідчить про те, що друга кулька рухається назустріч першій, а позитивні значення швидкостей – про те, що одна з кульок наздоганяє іншу.

Значення параметрів для задач № 136-140

Варіант	Задача	m_1 , кг	m_2 , кг	V_1 , м/с	V_2 , м/с
6	136	0,2	0,05	10	4
7	137	0,5	0,03	5	1
8	138	0,3	0,1	5	-5
9	139	0,4	0,04	10	-4
0	140	0,1	0,02	8	0

141. Пружина жорсткістю 600 Н/м стиснута силою 100 Н. Визначити роботу зовнішньої сили, що додатково стисне цю пружину ще на 3 см.

142. Яку роботу треба виконати, щоб пружину жорсткістю 800 Н /м: а) стиснути на 8 см; б) додатково стиснути ще на 4 см?

143. Якщо на верхній кінець вертикально розміщеної спіральної пружини покласти вантаж, то пружина стиснеться на 3 см. Наскільки стисне пружину той же вантаж, якщо він впаде на кінець цієї пружини з висоти 8 см?

144. Налетівши на пружинний буфер, вагон масою 20 т, що рухався зі швидкістю 0,6 м/с, зупинився, стиснувши пружину на 8 см. Знайти жорсткість пружин буфера.

145. Якої маси віз може везти кінь, розвиваючи силу тяги 500 Н, якщо коефіцієнт опору руху дорівнює 0,05? Яку роботу треба виконати, щоб перевезти віз на відстань 10 м а) з постійною швидкістю 18 км/год; б) із прискоренням, збільшуючи швидкість на цьому шляху від 18 до 36 км/год?

146. Підйомник елеватора масою 1 т починає підніматися з прискоренням 2 м/с². Визначити роботу, що виконується за перші 5 с. підйому.

147. Визначити силу натягу канату при підніманні вантажу масою 103 кг, якщо за 5 с від початку руху швидкість зросла до 10 м/с. Яку роботу проти сил гравітації при цьому виконано?

148. Трактор масою 5 т, що рухається рівноуповільнено з початковою швидкістю 36 км/год під дією сили тертя 104Н зупиняється. Знайти шлях до зупинки та роботу сил тертя.

149. Яку потужність повинен розвинути трактор при переміщенні причепа масою 3 т ввєрх по схилу з кутом нахилу 30° зі швидкістю

1 м/с , якщо коефіцієнт тертя (опору руху) причепа рівний 0,4 ?

150. Знайти роботу, яку потрібно виконати при підніманні вантажу масою 100 кг по похилій площині з кутом нахилу 45° на відстань 16 м рівноприскорено, якщо час піднімання без початкової швидкості 4 с, а коефіцієнт тертя 0,1?

151. Визначити напруженість гравітаційного поля на довільній висоті та на висоті 10 км, 100 км і 1000 км над поверхнею Землі. Вважати відомими прискорення вільного падіння біля поверхні Землі та її радіус.

152. Яка робота буде виконана силами гравітаційного поля при падінні на Землю тіла масою 1 кг: а) з висоти $h = 1000$ км; б) з нескінченності?

153. З нескінченності на поверхню Землі падає метеорит масою 100 кг. Визначити роботу, що буде виконана силами гравітаційного поля Землі. Прискорення вільного падіння і радіус Землі вважати відомими.

154. З поверхні Землі вертикально вгору запущена ракета зі швидкістю 5 км/с. На яку висоту вона підніметься?

155. По орбіті навколо Землі обертається супутник з періодом обертання 65 хв. Визначити висоту знаходження супутника. Орбіту вважати близькою до кола. Прискорення вільного падіння та радіус Землі вважати відомими.

156. На якій відстані від центра Землі знаходиться точка, в якій напруженість сумарного гравітаційного поля Землі і Місяця дорівнює нулю? Прийняти, що маса Землі в 81 раз більше за масу Місяця, а відстань між центрами Землі та Місяця рівна 60 радіусам Землі.

157. Супутник обертається навколо Землі по коловій орбіті на висоті 520 км. Визначити період обертання супутника. Прискорення вільного падіння та радіус Землі вважати відомими.

158. Визначити лінійну та кутову швидкості супутника Землі, що обертається по коловій орбіті на висоті 1000 км. Прискорення вільного падіння та радіус Землі вважати відомими.

159. У скільки разів зменшиться сила притягання до Землі космічної ракети при віддаленні її від поверхні Землі на відстань, що дорівнює радіусу Землі ? Яка робота буде виконана проти сил гравітації при цьому?

160. Визначити масу Землі, якщо відомо, що штучний супутник Землі з періодом обертання 106 хв має радіус колової орбіти 1000 км?

161-165. Маховик у вигляді суцільного диска, маса якого m , а діаметр основи D , обертається згідно з рівнянням $\varphi = At + Bt^2 + Ct^3$, де значення всіх параметрів вказані для кожного варіанта в таблиці, що наведена нижче.

1. Знайти значення швидкості та прискорення точки на відстані $D/2$ від осі (на поверхні диска) у довільний момент часу (миттєва швидкість та прискорення) та в момент часу t_1 , що вказаний у таблиці.

2. Знайти кінетичну енергію маховика в довільний момент часу та в момент часу t_1 , що вказаний у таблиці.

3. Визначити обертальний момент сили, що діє на маховик у довільний момент часу t та в момент часу t_1 , що вказаний у таблиці.

Варіант	Задача	M , кг	D , м	A , рад/с	B , рад/с ²	C , рад/с ³	t_1 , с
1	161	0,1	0,05	$1,0\pi$	0	$0,2\pi$	10
2	162	0,5	0,1	0	$2,0\pi$	$0,1\pi$	10
3	163	0,2	0,04	$0,5\pi$	0	$0,1\pi$	5
4	164	0,3	0,09	0	$4,0\pi$	$0,25\pi$	5
5	165	0,4	0,2	$1,5\pi$	0	$0,25\pi$	5

166. На обід маховика радіусом 40 см намотаний шнур, до кінця якого прив'язаний тягарець масою 2 кг. Визначити момент інерції маховика, якщо він, обертаючись рівноприскорено під дією сили ваги тягарця за час 3 с від початку руху, набрав кутову швидкість 9 рад/с.

167. Нитка з прив'язаними до її кінців тягарцями масою 0,05 кг та 0,07 кг перекинута через блок діаметром 4 см. Визначити момент інерції блока, якщо під дією сили ваги тягарців він отримав кутове прискорення 2 рад/с².

168. Стержень обертається навколо осі, що проходить через його середину згідно з рівнянням $\varphi = At + Bt^3$, де $A = 2$ рад/с; $B = 0,2$ рад/с³. Визначити обертальний момент, що діє на стержень через 2 с після початку обертання, якщо момент інерції стержня 0,1 кг·м².

169. Блок, що має форму диска масою 0,4 кг, обертається під дією сили натягу нитки, до кінців якої підвішені тягарці масами 0,3 кг та 0,7 кг. Визначити сили натягу нитки по обидві сторони блока.

170. На краю платформи у вигляді диска, що обертається по інерції навколо вертикальної осі з частотою 8 хв⁻¹, стоїть людина масою 70 кг. Коли людина перейшла в центр платформи, вона стала обертатися з частотою 10 хв⁻¹. Визначити масу платформи. Момент інерції людини розраховувати як для матеріальної точки.

171. Визначити максимальне прискорення матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання з амплітудою 0,1 м, якщо найбільша швидкість точки 10 м/с. Написати рівняння коливань та зобразити графічно залежності зміщення, швидкості, прискорення точки від часу.

172. Знайти максимальну швидкість матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання з амплітудою 0,3 м, якщо максимальне прискорення точки дорівнює $1,2 \text{ м/с}^2$. Написати рівняння коливань та зобразити графічно залежності зміщення, швидкості, прискорення точки від часу.

173. Знайти максимальну кінетичну енергію матеріальної точки масою $m = 1 \text{ кг}$, що здійснює гармонічні коливання з амплітудою $A = 0,05 \text{ м}$ та частотою 2 Гц .

174. Визначити частоту гармонічних коливань диска радіусом $0,2 \text{ м}$ навколо горизонтальної осі, що проходить на відстані половини радіуса диска та перпендикулярна його площині.

175. Визначити період коливань стержня довжиною $0,3 \text{ м}$ навколо горизонтальної осі, що проходить через його кінець перпендикулярно стержню.

176. Точка здійснює одночасно два коливання однієї частоти, що відбуваються в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Рівняння цих коливань мають вигляд: $x = A_1 \sin \omega t$ та $y = A_2 \cos \omega t$, де $A_1 = 0,01 \text{ м}$; $A_2 = 0,03 \text{ м}$; $\omega = 1 \text{ рад/с}$. Знайти рівняння траєкторії, побудувати її з врахуванням масштабу, показати напрямок руху точки та вказати положення точки в початковий момент.

177. Матеріальна точка бере участь у двох коливаннях, що проходять вздовж однієї прямої і описуються рівняннями: $x_1 = A_1 \sin \omega_1 t$, $x_2 = A_2 \sin \omega_2 t$, де $A_1 = 3 \text{ см}$; $A_2 = 4 \text{ см}$; $\omega_1 = \omega_2 = 2 \text{ с}^{-1}$. Знайти амплітуду складного руху, його частоту, початкову фазу, написати рівняння руху. Побудувати векторну діаграму для моменту часу $t = 0$.

178. Точка бере участь одночасно в двох взаємно перпендикулярних коливаннях однакової частоти, рівняння яких $x = A_1 \sin \omega t$ та $y = A_2 \cos \omega t$, де $A_1 = 0,08 \text{ м}$; $A_2 = 0,04 \text{ м}$. Написати рівняння траєкторії і побудувати її. Показати напрямок руху точки.

179. Дві точки знаходяться на прямій, вздовж якої розповсюджуються хвилі зі швидкістю 10 м/с . Період коливань $0,2 \text{ с}$, відстань між точками 1 м . Знайти різницю фаз коливань у цих точках.

180. Визначити швидкість розповсюдження хвиль у пружному середовищі, якщо різниця фаз $\Delta \varphi$ коливань двох точок, що знаходяться одна від одної на відстані $0,15 \text{ м}$, дорівнює $\pi/2$. Частота коливань 25 Гц .

1.4. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 1

1.4.1. ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ „ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ”

Фізика – наука експериментальна. Це означає, що фізичні закони встановлюються і перевіряються шляхом накопичення і зіставлення експериментальних даних.

Мета будь-кого, хто працює у фізичному практикумі, полягає в тому, щоб вивчити на досліді основні фізичні явища, відтворити їх самому і навчитися правильно аналізувати.

Задачі, які ставить лабораторний практикум з фізики перед студентами інженерних факультетів, є такими:

- поглибити і закріпити теоретичні знання з фізики, отримані на лекціях і при самостійній роботі з підручниками;
- оволодіти культурою фізичного експерименту, зокрема, основними методами фізичних вимірювань і методами математичної обробки результатів експерименту; познайомитись з вимірювальними приладами, лабораторним обладнанням, апаратурою;
- розвинути вміння фізично мислити – тобто бачити в явищах природи основне, загальне та абстрагуватись від випадкових, неістотних деталей.

1.4.1.1. ЗАГАЛЬНІ ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ І ЗАХИСТУ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1.Лабораторні роботи виконуються тільки відповідно до графіка лабораторних робіт. Студент, що пропустив лабораторне заняття, виконує не пропущену роботу, а ту, яка передбачена для нього графіком на даному занятті. Пропущена робота виконується на додатковому занятті.

2.Для оформлення робочих записів і звітів з лабораторних робіт кожен студент повинен мати спеціальний загальний зошит – журнал експериментальної роботи. Зошит має бути підписаний з вказанням прізвища з ініціалами, факультету, курсу і групи.

3. Оформлення кожної лабораторної роботи починається з нової сторінки.

Звіт з лабораторної роботи складається при підготовці студента до виконання роботи і в процесі її виконання. Звіт повинен включати :

- 1) повну назву лабораторної роботи та її номер;
- 2) дату виконання;
- 3) формулювання мети роботи;
- 4) стисло викладену теорію (закони, формули, їх виведення тощо), яка стосується роботи;

- 5) принципову схему дослідної установки;
- 6) основні відомості про вимірювальні прилади;
- 7) найбільш істотні проміжні, всі кінцеві результати і звітну таблицю (таблиці);
- 8) графіки (якщо потрібно);
- 9) обчислення шуканої величини і похибок експерименту.

Складання звіту починається під час домашньої підготовки до виконання роботи; при цьому виконуються пункти 1-5 і частково пункт 7 (креслення звітної таблиці). Пункти 6, 8, 9 і звітна таблиця складаються в процесі виконання роботи, а 9-й і заповнення звітної таблиці завершуються після занять.

Звіт оформлюється акуратно, без помарок і виправлень. Помарки і виправлення допускаються лише в експериментальній частині роботи, яку студент виділяє окремим розділом і де записує всі результати вимірювань і розрахунки у тій послідовності, в якій вони проводилися.

3. Кожна лабораторна робота – це невеликий самостійний фізичний експеримент. Найцінніше, що може дати лабораторний практикум – це вміння застосовувати теоретичні знання на практиці і осмислювати результати проведених дослідів. Недоцільно приступати до лабораторної роботи, не засвоївши теоретичних знань і не маючи ясного уявлення про процес її виконання та його найбільш істотні деталі. Тому допуск до виконання лабораторної роботи отримують ті студенти, які підготували теорію, що стосується роботи, знають в основних рисах принцип роботи приладів, які використовуються в ній, схеми установок, порядок виконання роботи і підготували вихідні матеріали протоколу лабораторної роботи.

Студенти, допущені викладачем до виконання роботи, отримують необхідні прилади у лаборанта.

4. Після виконання роботи студент показує експериментальні дані викладачеві і, переконавшись у правильності результатів, завершує оформлення роботи.

5. Після виконання роботи потрібно навести порядок на робочому місці, а отримані прилади здати лаборанту.

6. По кожній з виконаних робіт студент складає запис (захищає лабораторну роботу) на одному з наступних занять.

На заліку до студента ставляться такі вимоги:

- 1) глибоке знання програмних питань курсу фізики, зв'язаних з лабораторною роботою;
- 2) знання методу вимірювання і дослідження, який застосовується в даній роботі, його точності, переваги та недоліки;

3) знання принципу дії і точності вимірювальних приладів, що використовуються у роботі, і вміння ними користуватися; володіння навичками оцінки похибок і точності експерименту.

При цьому знання відповідей на контрольні запитання до лабораторної роботи є обов'язковим.

1.4.1.2. ПРЯМІ І НЕПРЯМІ ВИМІРЮВАННЯ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ПОХИБОК

Виміряти фізичну величину – це значить порівняти її з іншою однорідною величиною, яка прийнята за одиницю міри, тобто визначити скільки разів міститься в ній однорідна з нею величина, прийнята за одиницю міри.

Є два види вимірювань – прямі і непрямі. При прямому вимірюванні величину визначають безпосередньо за допомогою вимірювального приладу (лінійки, секундоміра, термометра, терезів тощо). Так, безпосередньо можна виміряти довжину, час, температуру, масу та деякі інші фізичні величини.

Якщо величину не можна виміряти безпосередньо, застосовують непряме вимірювання, а саме: шукану величину розраховують за формулою, яка виражає дану величину через інші, знайдені шляхом прямих вимірювань. Так, прискорення вільного падіння обчислюють за формулою $g=2h/t^2$, використовуючи результати прямих вимірювань висоти h і часу t вільного падіння тіла.

Будемо позначати істинне значення фізичної величини, що вимірюється, через a , а результат її виміру – через x . Ці величини, взагалі кажучи, не збігаються. Величину $\Delta x = x - a$ називають похибкою, її модуль $|\Delta x| = |x - a|$ – абсолютною похибкою, відношення $\varepsilon = |\Delta x|/a$ – відносною похибкою виміру.

Якщо за одних і тих же умов повторити вимірювання n разів, то отримаємо n результатів, $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, і відповідно матимемо n похибок. Отримання того чи іншого результату x_i – це випадкова подія.

Випадковою називають подію, яка при реалізації даних умов може відбутись, а може і не відбутись.

Наприклад, при підкиданні монети тризуб може випасти, а може і ні; отже, випадання тризуба – випадкова подія. Кожна випадкова подія має свою об'єктивну характеристику, яка називається

ймовірністю і вимірюється позитивним числом P , яке завжди буде (що впливає з визначення) більшим від одиниці :

$$0 \leq P \leq 1.$$

Ймовірність випадкової події P визначається відношенням числа випадків, що сприяють даній події, до повного числа рівноможливих випадків.

Наприклад, якщо в ящик всипати 5 білих і 15 чорних (однакових за розміром, вагою та якістю поверхні) кульок і добре його потрусити, то ймовірність P витягти (не зазираючи до ящика) білу кульку буде рівною $5/20 = 0,25$ – бо число рівноможливих випадків тут $5+15=20$, а сприяють даній події (вийманню білої кульки) тільки 5 із них. У наведеному вище прикладі з монетою рівноможливих випадків два (тризуб або цифра), а сприяє даній події (випаданню тризуба) тільки один. Отже, ймовірність випадання тризуба $P = 1/2 = 0,5$.

Подію, ймовірність якої дорівнює одиниці ($P = 1$), називають достовірною.

Подію, ймовірність якої дорівнює нулю ($P = 0$), називають неймовірною.

При великій кількості n незалежних випробувань ймовірність P випадкової події визначає частку випробувань, коли дана випадкова подія відбувається. Так, при підкиданні монети 100 разів тризуб може випасти, наприклад, у 50, 49, 48, 51, 52 випадках.

При вимірюванні певної фізичної величини один єдиний раз за результатом вимірювання x не можна оцінити ні абсолютної, ні відносної похибок (бо істинне значення a є невідомим).

Теорія похибок встановлює правила, які дозволяють, виконавши невелику кількість (наприклад, 3, 5, 7) вимірювань, оцінити інтервал

$$a_1 \leq a \leq a_2 \quad (1)$$

(еквівалентний запис: $[a_1, a_2]$), в якому знаходиться істинне значення вимірюваної величини. Цей інтервал називають довірчим. Теорія похибок дозволяє також оцінити достовірність P отриманого результату (1).

Достовірністю P (довірчою ймовірністю) називають ймовірність того, що істинне значення вимірюваної величини знаходиться у вказаному довірчому інтервалі (1).

Саме достовірність P визначає ту частку результатів вимірів, які при проведенні великої кількості вимірювань ($n = 100, 1000$, або більше; строго кажучи, при $n \rightarrow \infty$) потрапили б у даний довірчий інтервал.

Якщо, наприклад, для довжини відрізка L з достовірністю $P = 0,8$ отримано результат $0,58 \leq L \leq 0,62$ (м), то це означає, що з тисячі вимірів ($n = 1000$) приблизно 80% результатів матимуть значення між 0,58 м і 0,62 м, а решта (приблизно 20 %) будуть меншими 0,58 м або більшими, ніж 0,62 м.

Завдання експериментатора (студента) при визначенні фізичної величини, що вимірюється у прямий спосіб, полягає в наступному.

Зробити декілька (3-7) вимірів і знайти середнє арифметичне $\langle x \rangle$ результатів вимірів:

$$\langle x \rangle = (x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n) / n. \quad (2)$$

Встановити довірчий інтервал (1), в якому за його (експериментатора) твердженням знаходиться істинне значення a фізичної величини. Довірчий інтервал подають у формі:

$$\langle x \rangle - \Delta \leq a \leq \langle x \rangle + \Delta \quad (2a)$$

(еквівалентний запис : $a = \langle x \rangle \pm \Delta$; при цьому $a_1 = \langle x \rangle - \Delta$, $a_2 = \langle x \rangle + \Delta$). Величину Δ у формулі (2a) називають довірчою границею похибок результатів вимірів.

Вказати достовірність P вищезгаданого твердження. Оцінити точність експерименту. Її характеризують відносною похибкою \mathcal{E} , яку обчислюють за наближеною формулою

$$\mathcal{E} \approx \frac{\Delta}{\langle x \rangle}; \quad (3)$$

при цьому відмітимо, що чим менше \mathcal{E} , тим вище точність.

Подати кінцевий результат у стандартній формі, записавши встановлений довірчий інтервал і вказавши точність і достовірність отриманого результату:

$$a = \langle x \rangle \mp \Delta, \quad \mathcal{E}, \quad P. \quad (4)$$

Стандартна форма (4) представлення результату вимірювань є єдиною як при прямих, так і при непрямих вимірюваннях.

Точність вимірювання визначається тією найменшою часткою одиниці міри, до якої з упевненістю у правильності результату можна виконати вимірювання. Ступінь точності вимірювань залежить від приладів, що використовуються, і від загальних методів вимірювання, і було б марним витрачанням часу намагатися при вимірюваннях за даних умов перейти цю межу точності. Наприклад, зважуючи тіло масою 200 г на якісних терезах, неважко досягти точності 0,1 мг, тобто точності 0,00005 %. В інших випадках навіть точність 0,1 % є майже недосяжною – наприклад, при вимірюванні температури за допомогою термометрів. Звичайними термометрами можна відраховувати температуру з точністю до 0,1 К, іноді з точністю до

0,05 К. Отже, якщо вимірювана зміна температури становить приблизно 5 К, то точність не перевищуватиме 1 – 2 % вимірюваної величини.

Отже, перш ніж приступати до вимірювань, необхідно визначити межі точності, які можна отримати з наявними приладами.

Якщо в лабораторній роботі доводиться вимірювати різні величини і межі можливої точності для кожної вимірюваної величини виявляються різними, то немає сенсу при окремих вимірюваннях виходити за межі точності найменш точно вимірюваної величини. Так, при калориметричних вимірюваннях визначення маси води і калориметра із зважування можна б було виконати з точністю, не меншою 0,0001 %. Однак у даному випадку немає сенсу виконувати зважування з такою високою точністю і можна обмежитись зважуванням на менш досконалих терезах з точністю, наприклад, до 0,1 %, оскільки вимірювання зміни температури може бути виконано, як сказано, з точністю лише 1 – 2 %.

1.4.1.3. ВИДИ ПОХИБОК. МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

1. Перед початком прямих вимірювань перш за все записують назву величини, що вимірюється, назву вимірювального приладу і ціну найменшої його поділки C .
2. Записують у стовпчик під символом величини, що вимірюється, результати вимірів x_i і обчислюють за формулою (2) середнє арифметичне $\langle x \rangle$ результатів вимірів.
3. Встановлюють довірчу границю похибок Δ результатів вимірів. Для цього враховують два основні види похибок – систематичні і випадкові.

Систематичними називають похибки, що залишаються постійними за величиною і за знаком при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Такі похибки мають об'єктивний характер і обумовлені недосконалістю вимірювальних приладів, впливом умов, за яких проводиться дослід, а також недосконалістю методів вимірювання. Деякі систематичні похибки можуть бути виявлені і усунуті. Однак існують і такі систематичні похибки, від яких не можна позбавитись і які обов'язково необхідно враховувати. Такими є похибки, обумовлені недосконалістю приладів, зокрема їх вимірювальних шкал. Як правило більшість приладів високої якості дає похибку, що не перевищує ціни найменшої поділки їх шкали.

Випадковими називають похибки, що непередбачено змінюють свою величину (і знак!) від одного досліду до іншого. Вони обумовлені багатьма неконтрольованими причинами, а також недосконалістю наших органів чуттів. З останньої причини випадкові похибки в значній мірі мають суб'єктивний характер. Випадкові похибки описуються теорією ймовірностей. Вплив випадкових похибок на результат вимірювань можна істотно зменшити при багатократному повторенні досліду: оскільки завищені і занижені (відносно істинного) значення зустрічаються однаково часто, то при обчисленні середнього арифметичного $\langle x \rangle$ випадкові похибки частково компенсують одна одну, і тому середнє арифметичне менше відрізняється від істинного значення а фізичної величини, ніж кожен з результатів вимірювань x_i .

Зменшити вплив систематичних похибок шляхом повторення досліду, звичайно, не можна. Для цього потрібно удосконалити (або взяти більш точний) прилад або змінити метод вимірювань. Відповідно до наявності двох видів похибок довірчу границю сумарних похибок Δ записують у вигляді суми

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}, \quad (5)$$

де Δ_c – довірча границя систематичних похибок, а $\overset{\circ}{\Delta}$ – довірча границя випадкових похибок. Їм відповідають параметри P_c – ймовірність того, що систематичні похибки не перевищують Δ_c , і $\overset{\circ}{P}$ – ймовірність того, що випадкові похибки не перевищують $\overset{\circ}{\Delta}$.

4.1. Встановлення довірчої границі випадкових похибок, $\overset{\circ}{\Delta}$, починають з обчислення випадкових відхилень результатів вимірів δ за формулою

$$\delta_i = x_i - \langle x \rangle, \quad (6)$$

їх квадратів δ_i^2 та середньоарифметичного $\langle \delta^2 \rangle$ за формулою

$$\langle \delta^2 \rangle = \frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_i^2 + \dots + \delta_n^2}{n}. \quad (7)$$

4.2. Розраховують параметр

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{\langle \delta^2 \rangle}{n-1}}, \quad (8)$$

що має назву середнього квадратичного відхилення середніх результатів вимірів.

4.3. Довірчу границю випадкових похибок обчислюють за формулою

$$\overset{\circ}{\Delta} = t \cdot \sigma_{\text{ср.}} \quad (9)$$

Тут t – параметр, який визначають з таблиць, розроблених за допомогою теорії ймовірностей. Цей параметр названо параметром Ст'юдента на честь вченого, який розрахував таблицю його значень. Параметр Ст'юдента залежить від кількості вимірів n (число n встановлює експериментатор) і величини параметра $\overset{\circ}{P}$ (її теж встановлює експериментатор). З табл. 1 видно, що при фіксованому значенні $\overset{\circ}{P}$ параметр Ст'юдента t зменшується зі збільшенням кількості вимірів n .

5. При оцінці довірчої границі систематичних похибок, Δ_c , вважатимемо, що вона не перевищує ціни найменшої поділки C вимірювального приладу. В цьому випадку

$$\Delta_c = C, \quad P_c = 1. \quad (10)$$

Якщо ж існують додаткові систематичні похибки, що перевищують C , то користуються формулою $\Delta_c = C + \Delta_{\text{дод.}}$, де $\Delta_{\text{дод.}}$ – довірча границя додаткових систематичних похибок. Формула для $\Delta_{\text{дод.}}$, обумовленої методом вимірювання, якщо вона не є набагато меншою ціни поділки, наводиться в лабораторній роботі.

6. Обчислюють довірчу границю сумарних похибок Δ за формулою (5) і відносну похибку \mathcal{E} за формулою (3).

7. Записують результат у стандартній формі (4), вказуючи, що його достовірність знаходиться в межах між $\overset{\circ}{P}$ і $P_c = 1$: $\overset{\circ}{P} < P < 1$ (або $P > \overset{\circ}{P}$).

1. КОЕФІЦІЄНТИ СТУДЕНТА

ЧИСЛО ВИМІРІВ n	ДОВІРЧА ЙМОВІРНІСТЬ $\overset{\circ}{P}$							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,999
1								
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	4,8
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	4,1
20	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	3,9
40	0,68	0,85	1,1	1,2	1,7	2,0	2,4	3,6
60	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	3,5
120	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	3,4
∞	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	3,3

Нижче наведено приклад розташування результатів і розрахунків при $n = 3$, $\overset{\circ}{P} = 0,95$ (при цьому $t = 4,3$), табл.2

2. МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ПРЯМИХ ВИМІРІВ ЧАСУ τ ДВАДЦЯТИ КОЛИВАНЬ МАЯТНИКА

Час τ вимірювали секундоміром , $C = 0,2$ с			
i	τ , с	δ , с	Розрахунки
1	34,2	- 0,07	$\langle \tau \rangle = \frac{34,2 + 34,0 + 34,6}{3} = 34,27$ $\delta_1 = 34,2 - 34,27 = - 0,07$ с; $\delta_1^2 = 0,005$ с ² ; $\delta_2 = 34,0 - 34,27 = - 0,27$ с; $\delta_2^2 = 0,073$ с ² ; $\delta_3 = 34,6 - 34,27 = + 0,33$ с; $\delta_3^2 = 0,109$ с ² ; $\langle \delta^2 \rangle = \frac{0,005 + 0,073 + 0,109}{3} = 0,062$ с;
2	34,0	- 0,27	
3	34,6	+ 0,33	
$\langle \tau \rangle = 34,27$		$\sigma_{cp} = 0,18$	
$\Delta_c = 0,2$ с; $P_c = 1$			
$\overset{\circ}{\Delta} = 0,77$ с; $\overset{\circ}{P} = 0,95$			
$\Delta = 1,0$ с; $P > 0,95$			
$\mathcal{E} = 0,028$ (2,8%)			
Результат:			
$\tau = (34,27 \pm 1,0)$ с,			$\overset{\circ}{\Delta} = t \cdot \sigma_{cp} = 4,3 \cdot 0,18 = 0,77$ с;
$P > 0,95$,			$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta} = 0,2 + 0,77 = 0,97 \approx 1,0$ с;
$\mathcal{E} = 0,028$.			$\mathcal{E} = \frac{\Delta}{\langle \tau \rangle} = \frac{0,97}{34,3} = 0,028$ (2,8%).

Примітки: 1. Якщо результати n прямих вимірювань збігаються, то $\Delta = \Delta_c = C$ і $P = P_c = 1$.

2. Якщо відносна похибка \mathcal{E} перевищує 0,2 (20%), то експеримент потрібно повторити, взявши більш точний інструмент (при цьому зменшується Δ_c) або збільшивши кількість вимірювань n (при цьому зменшується $\overset{\circ}{\Delta}$), або зробивши і те, і інше.

1.4.1.4. МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

Розглянемо величину Z , що є функцією декількох аргументів – величин x, y, \dots , які визначаються незалежно одна від одної шляхом прямих вимірювань:

$$Z = f(x, y, \dots). \quad (11)$$

Тоді послідовність розрахунків є такою:

Середнє значення величини Z розраховують один раз,

підставляючи замість аргументів x, y, \dots їх середні значення:

$$\langle Z \rangle = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \dots). \quad (12)$$

2. Визначають відносну похибку непрямих вимірювань \mathcal{E}_Z за формулою

$$\mathcal{E}_Z = \left\{ \left| \frac{\partial(\ln f)}{\partial x} \right| \Delta_x + \left| \frac{\partial(\ln f)}{\partial y} \right| \Delta_y + \dots \right\} \quad (13)$$

де Δ_x, Δ_y — довірчі границі сумарних похибок вимірювань величин x, y, \dots . Для полегшення обчислень формулу (13) для розрахунку відносної похибки непрямих вимірювань \mathcal{E}_Z наведено у кожній лабораторній роботі.

3. Розраховують довірчу границю сумарних похибок за формулою

$$\Delta_Z = \mathcal{E}_Z \langle Z \rangle. \quad (14)$$

у табл. 3 наведено розраховані за формулами (13), (14) значення Δ_Z і \mathcal{E}_Z для величин Z , що виражаються простими функціональними залежностями, які зустрічаються найчастіше.

5. Записують кінцевий результат у стандартній формі (4):

$$Z = \langle Z \rangle \pm \Delta_Z, \quad \mathcal{E}_Z, \quad PZ.$$

Примітки 1. Якщо в розрахунках використовують табличне значення, то відповідну довірчу границю похибок визначають як половину одиниці його (табличного значення) останнього значущого розряду з достовірністю, рівною одиниці. Наприклад, в таблиці наведено значення прискорення вільного падіння $g = 9,807 \text{ м/с}^2$; у цьому випадку $\Delta g = 0,0005 \text{ м/с}^2$, $Pg = 1$. Але якщо табличне значення g наведено як $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, то $\Delta g = 0,05 \text{ м/с}^2$, $Pg = 1$.

2. Якщо прямі вимірювання не можна виконати в однакових умовах, то величину Z розраховують для кожного окремого вимірювання, а потім знаходять її середнє значення. При цьому для прямих вимірювань враховують лише довірчу границю систематичних похибок, а відносні похибки прямих і непрямих вимірювань оцінюють тільки для якогось одного вимірювання.

3. Значення довірчих границь сумарних похибок та відносних похибок непрямих вимірювань для величини

$$Z = f(x, y, \dots)$$

	$Z = f(x, y, \dots)$	Δ_Z	\mathcal{E}_Z
--	----------------------	------------	-----------------

1	$x + y + \dots$	$\Delta_x + \Delta_y + \dots$	$\frac{\Delta_Z}{\langle x \rangle + \langle y \rangle + \dots}$
2	$x - y$	$\Delta_x + \Delta_y$	$\frac{\Delta_Z}{ \langle x \rangle - \langle y \rangle }$
3	$ax,$ де $a = \text{const}$	$a \cdot \Delta_x$	\mathcal{E}_x
4	$x \cdot y \cdot \dots$	$\mathcal{E}_Z \cdot \langle x \rangle \cdot \langle y \rangle \cdot \dots$	$\mathcal{E}_x + \mathcal{E}_y + \dots$
5	$\frac{x}{y}$	$\mathcal{E}_Z \cdot \frac{\langle x \rangle}{\langle y \rangle}$	$\mathcal{E}_x + \mathcal{E}_y$
6	x^n	$\mathcal{E}_Z \cdot \langle x \rangle^n$	$n \cdot \mathcal{E}_x$
7	$\sqrt[n]{x}$	$\mathcal{E}_Z \cdot \sqrt[n]{\langle x \rangle}$	$\frac{1}{n} \cdot \mathcal{E}_x$
8	$x^\alpha \cdot y^\beta \cdot \dots$ де $\alpha > 0, \beta > 0$	$\mathcal{E}_Z \cdot \langle x \rangle^\alpha \cdot \langle y \rangle^\beta \cdot \dots$	$\alpha \mathcal{E}_x + \beta \mathcal{E}_y + \dots$
9	$\sin x$	$\Delta_x \cdot \cos \langle x \rangle $	$\Delta_x \cdot \text{ctg} \langle x \rangle $
10	$\cos x$	$\Delta_x \cdot \sin \langle x \rangle $	$\Delta_x \cdot \text{tg} \langle x \rangle $
11	$\text{tg} x$	$\Delta_x / \cos^2 \langle x \rangle$	$2\Delta_x / \sin 2 \langle x \rangle $
12	$\text{ctg} x$	$\Delta_x / \sin^2 \langle x \rangle$	$2\Delta_x / \sin 2 \langle x \rangle $

Примітка. У прикладах 1 і 2 спочатку розраховують Δ_Z , а потім — \mathcal{E}_Z . у прикладах 4-8 спочатку розраховують \mathcal{E}_Z , а потім — Δ_Z .

1.4.1.5. ГРАФІЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

При дослідженні залежності однієї фізичної величини від іншої для наочного представлення цієї залежності її зображують графічно. Для цього у більшості випадків користуються декартовою системою координат; на міліметровому папері уздовж осі абсцис у довільному масштабі відкладають незалежну змінну x (аргумент), тобто величину, значення якої задає сам експериментатор, а уздовж осі ординат — ту величину y (функцію $y = y(x)$), яку він при цьому визначає. Через отримані на площині точки проводять неперервну плавну криву. При побудові графіків необхідно дотримувати таких правил.

1. Біля кожної з осей (напроти середини або в кінці осі) слід вказати умовне позначення величини i , через кому, одиниці її вимірювання в обраній системі одиниць (рис. 1).

2. Масштаб на кожній осі вибирають так, щоб експериментальні точки не зливалися одна з одною і були розташовані з розумним інтервалом (рис. 2). Не слід відкладати на осях значення величин, істотно більших або менших тих значень, в межах яких проводились вимірювання – інакше графік займатиме лише малу частину відведеної для нього координатної площини (рис. 2,а).

3. Початок координат не обов'язково повинен збігатися з нульовими значеннями вимірюваних величин (рис. 2,б).

4. Масштаб має бути простим: в одній поділці масштабу повинна укладатись одиниця (або 10; 100; 0,1 одиниці і т.д.) вимірюваної величини.

5. При вимірюваннях часто зустрічаються величини, що мають дуже мале (або дуже велике) чисельне значення, наприклад, $5 \cdot 10^{-7}$ м, $2 \cdot 10^{11}$ Па та ін. У таких випадках загальний коефіцієнт вказується перед одиницею вимірюваної величини (L, 10^{-7} м; E, 10^{11} Па). При цьому зникає необхідність вказувати множник біля кожної цифри проти масштабної риски (рис. 1). Винесення загального коефіцієнта можна замінити введенням дільних або кратних одиниць. Так, $5 \cdot 10^{-7}$ м можна замінити на 0,5 мкм.

На рис.1 приведені приклади надписів вздовж осей графіка: а) залежність модуля Юнга E від температури T; б) залежність опору R міді від температури T при нагріванні (x) і охолодженні (o).

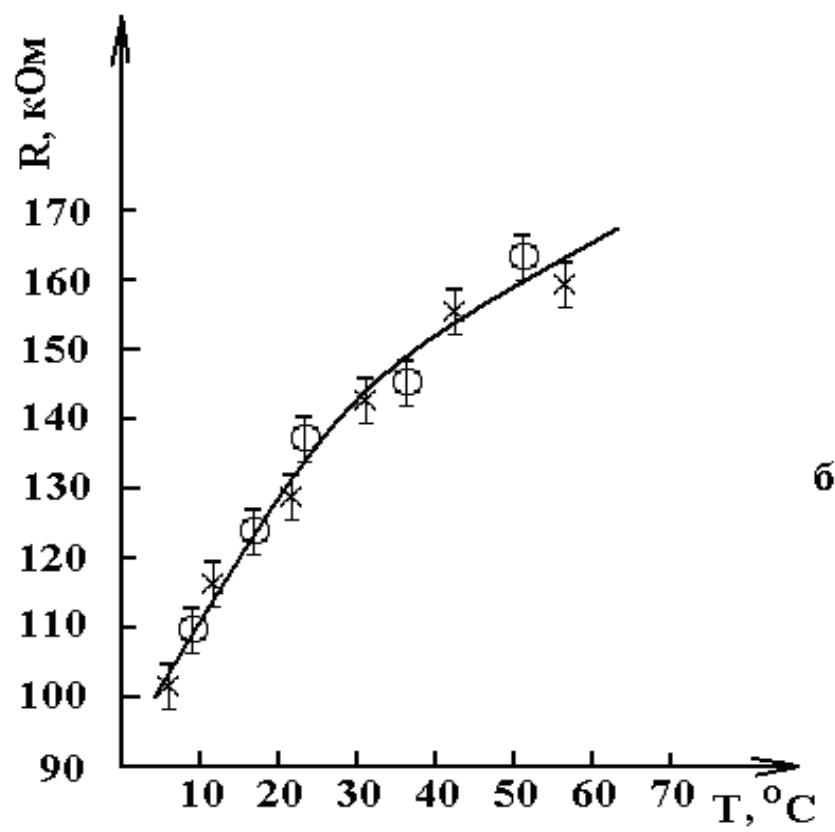
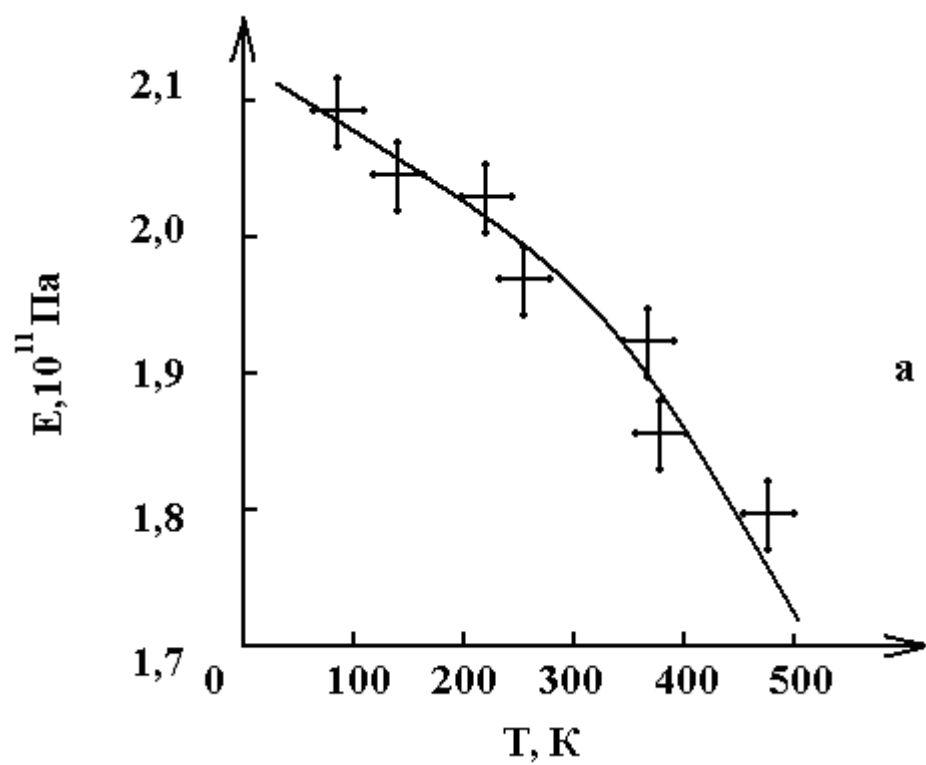


Рис. 1

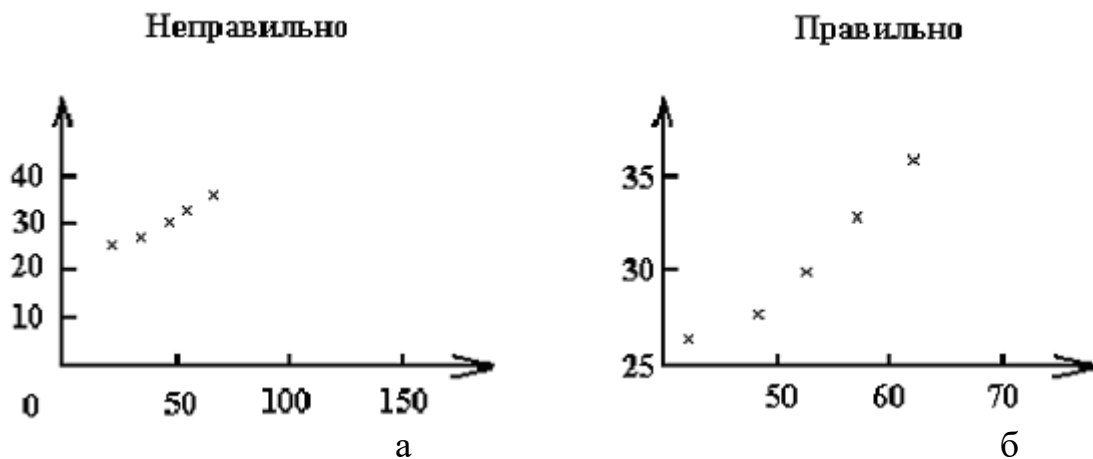


Рис. 2

а – невдалий вибір масштабу для графічного представлення результатів;

б – ті ж данні у збільшеному масштабі

Правильно

Неправильно

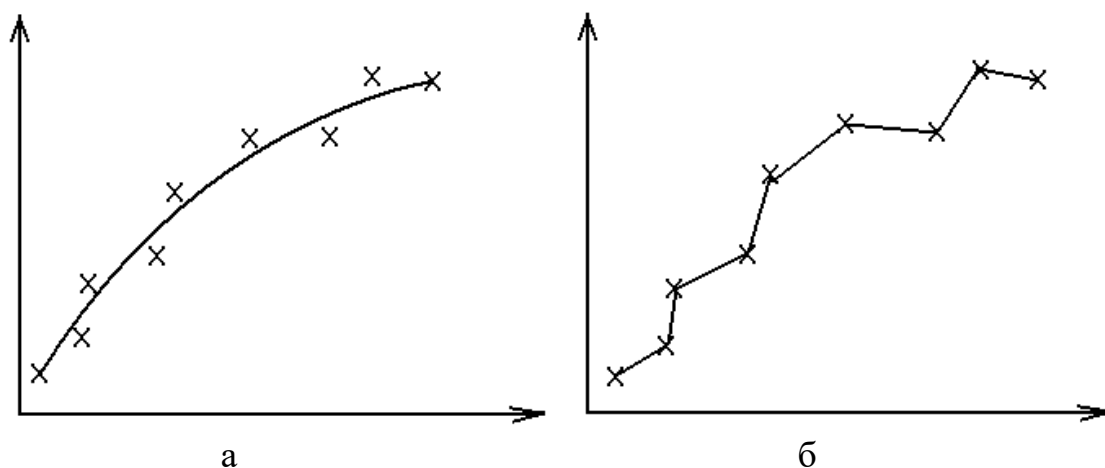


Рис. 3

а – через експериментальні точки проводять плавну криву;

б – з'єднання експериментальних точок ламаною лінією є помилкою.

6. Для графічного відображення точності вимірювань досліджуваної величини y на графіку, окрім самої експериментальної точки, відкладають вгору і вниз від неї (в тому ж масштабі) вертикальні відрізки, рівні довірчим границям похибок величини y . Аналогічно, вправо і вліво від експериментальної точки відкладають горизонтальні відрізки (розноски), рівні довірчим границям похибок величини x (див. рис. 1). Розноски не наносять, якщо довірчі границі уздовж однієї з осей (або обох осей) не виходять за межі розмірів точок на графіку.

7. Через експериментальні точки, нанесені на графік (у вигляді кружків, зірочок або хрестиків), проводять плавну криву так, щоб точки, які відповідають окремим вимірюванням, розташовувалися симетрично по обидві сторони лінії (рис. 3). Товщина лінії має бути у 2-3 рази меншою лінійних розмірів експериментальних точок.

8. Якщо метою роботи є встановлення аналітичної залежності між вимірюваними величинами (або її перевірка), то на графік необхідно також нанести теоретичну лінію, що відповідає цій залежності. При цьому величини, які відкладаються уздовж осей графіка, завжди слід вибирати такими, щоб очікувана теоретична залежність мала вид прямої лінії. Побудова функціональної залежності у вигляді прямої лінії значно полегшує задачу експериментатора.

Наприклад, необхідно перевірити, чи виконується закон Бойля - Маріотта ($PV = \text{const}$ при постійній температурі) для деякого газу. Якщо за отриманими даними побудувати графік залежності P від V , то при виконанні закону Бойля - Маріотта експериментальні точки розташуються поблизу гіперболи. Однак встановити візуально, чи є побудована крива гіперболою, досить важко. Якщо ж відкласти уздовж осей величини P і $1/V$, то графік залежності P від $1/V$ для ідеального газу буде прямою лінією. В цьому випадку можливі відхилення від прямої лінії (тобто від закону Бойля - Маріотта) зразу ж стануть очевидними.

9. Готовий графік підписують і підклеюють у журнал лабораторних робіт.

1.4.1.6.ВИВЧЕННЯ НОНІУСІВ

Ноніусом називається доповнення до звичайного масштабу (лінійного або кругового), яке дозволяє підвищити точність вимірювання з даним масштабом у 10 – 20 разів.

Техніка безпосереднього вимірювання довжин і кутів у наш час досягла високої досконалості. Наприклад, сконструйовано спеціальні прилади (названі компараторами), які дозволяють вимірювати довжину з точністю до 1 мікрона ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$). При цьому майже завжди відлікові пристрої обладнані ноніусами.

Лінійним ноніусом називається маленька лінійка з поділками, яка може ковзати уздовж великої лінійки (також з поділками), названої масштабом. (рис. 4).

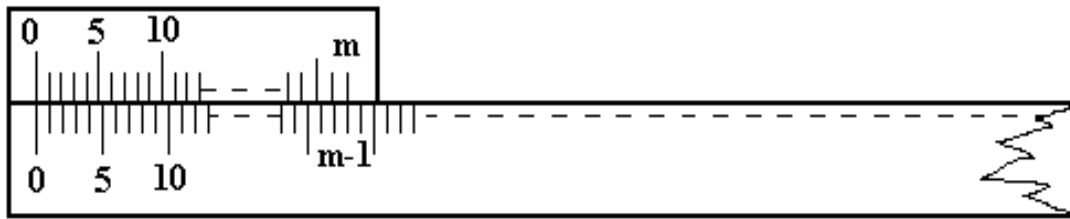


Рис. 4

Сумарна довжина всіх m поділок шкали ноніуса дорівнює довжині $(m - 1)$ найменших поділок масштабу. Отже, одна поділка ноніуса

дорівнює $\frac{m-1}{m} = (1 - \frac{1}{m})$ поділки масштабу. Саме це дозволяє, користуючись ноніусом, робити відлік з точністю до $1/m$ частки найменшої поділки масштабу. Позначимо через y відстань між сусідніми штрихами масштабу, а через x – між сусідніми штрихами ноніуса. Тоді можна записати, що

$$x = y \cdot (1 - \frac{1}{m}) ;$$

звідси отримуємо:

$$m \cdot x = (m - 1)y.$$

Величина

$$\Delta x = y - x = \frac{y}{m} \tag{15}$$

має назву точності ноніуса, вона визначає максимальну похибку ноніуса.

При будь-якому положенні ноніуса відносно масштабу одна з поділок ноніуса збігається з деякою поділкою масштабу. Відлік по ноніусу оснований саме на здатності ока фіксувати цей збіг поділок ноніуса і масштабу. При вимірюванні довжини відрізка L розміщують його так, щоб він опинився між нульовою поділкою основного масштабу і нульовою поділкою ноніуса (рис. 5). Припустимо, що при цьому кінець відрізка L опинився між k -ю і $(k + 1)$ -ю поділками масштабу. Тоді можна записати :

$$L = ky + \Delta L,$$

де ΔL – невідома поки що частка k -ї поділки масштабу. Її знаходимо за допомогою ноніуса. Оскільки поділки ноніуса не є рівними поділкам масштабу, то обов'язково знайдеться така n -на поділка, яка буде найближче підходити до відповідної $(k + n)$ -ї поділки масштабу.

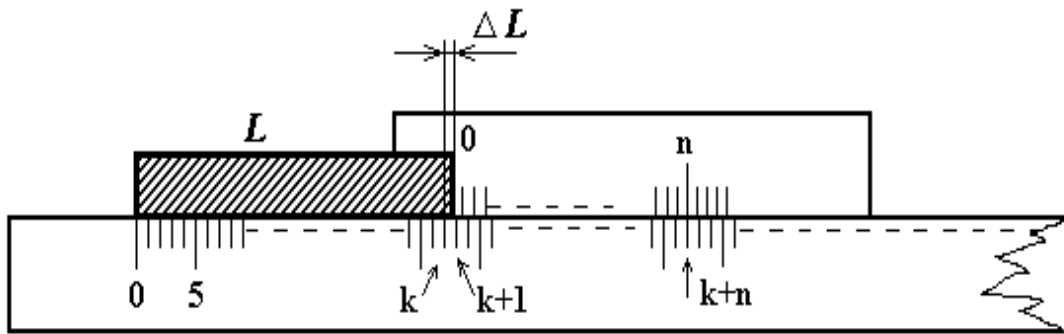


Рис. 5

Як бачимо з рис. 5

$$\Delta L = ny - nx = n(y - x) = n\Delta x;$$

отже, вся довжина L визначатиметься за формулою

$$L = ky + n\Delta x. \quad (16)$$

Співвідношення (16) дозволяє сформулювати правило: довжина відрізка, що вимірюється за допомогою ноніуса, дорівнює числу цілих поділок масштабу плюс точність ноніуса, помножена на номер поділки ноніуса, яка збігається з деякою поділкою масштабу.

Похибка, що може виникнути при такому методі відліку, обумовлена неточним збігом n -ї поділки ноніуса з $(k+n)$ -ю поділкою

масштабу. Величина її, очевидно, не перевищує $\frac{1}{2}\Delta x$. Отже, похибка ноніуса дорівнює половині його точності.

Круговий ноніус принципово нічим не відрізняється від лінійного. Це невелика дугова лінійка, що ковзає уздовж круга (лімба), розділеного на градуси або ще більш дрібні поділки (рис. 6). На лінійці нанесено поділки також у кількості m , загальна довжина яких дорівнює $(m - 1)$ поділки лімба, тобто

$$m\lambda = (m - 1)\beta,$$

де λ і β – виражені у градусах або у хвилинах ціни поділок ноніуса (λ) і найменшої поділки лімба (β).

Точність кругового ноніуса $\Delta\lambda$ буде виражатися формулою, аналогічною формулі (15):

$$\Delta\lambda = \frac{\beta}{m}.$$

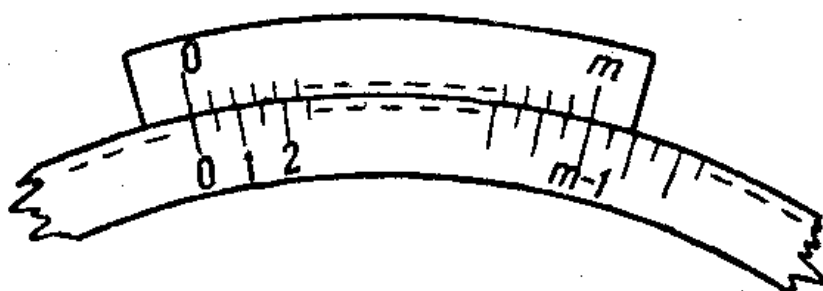


Рис. 6

Відраховані від нуля лімба кути φ (рис. 7) обчислюються за формулою

$$\varphi = k \beta + n \Delta \lambda.$$

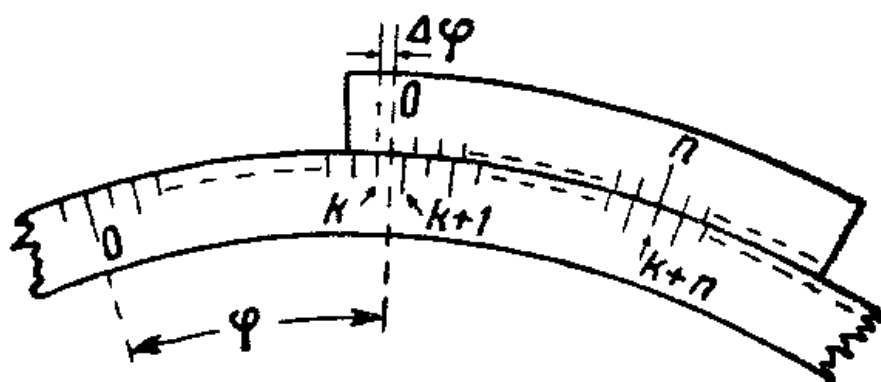


Рис. 7

Запитання і вправи для самоконтролю:

1. Дайте визначення абсолютної та відносної похибок вимірювання.
2. Дайте визначення випадкової події, наведіть приклади.
3. Дайте визначення ймовірності випадкової події, проілюструйте його прикладами.
4. Що таке випадкове відхилення результату вимірювання? Чим воно відрізняється від похибки вимірювання?
5. Чим відрізняється похибка вимірювання від довірчої границі похибок?
6. Як визначити довірчу границю систематичних, випадкових та сумарних похибок?
7. Як розрахувати середнє значення величини, що вимірюється у непрямий спосіб?

8. Розкрийте зміст поняття достовірності (довірчої ймовірності). Якою є стандартна форма представлення кінцевого результату вимірювань?

ВПРАВА 1 ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ МЕТАЛЕВОЇ ПЛАСТИНКИ МІКРОМЕТРОМ

Приладдя: 1) мікрометр, 2) металева пластинка.

Опис приладу. Мікрометр (рис. 8) використовується для вимірювання діаметрів дротів, кульок і невеликої товщини пластинок. Він має вигляд невеличких лещат, у яких предмет затискається за допомогою гвинта. Крок гвинта звичайно становить 1 мм або 0,5 мм. На стержні гвинта В закріплено барабан С з нанесеною на ньому шкалою, яка має 50 або 25 поділок.

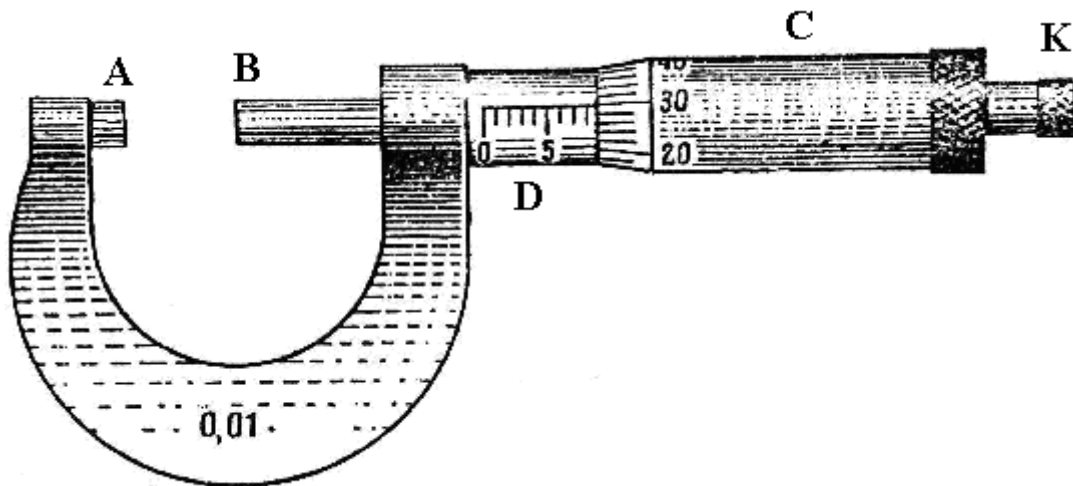


Рис. 8

У випадку, коли шкала барабана розділена на 50 поділок, а крок гвинта становить 0,5 мм, ціна поділки барабана дорівнює 0,01 мм. На лінійній шкалі над центральною лінією між поділками нанесено риси для того, щоб знати 1-й чи 2-й оберт здійснює барабан.

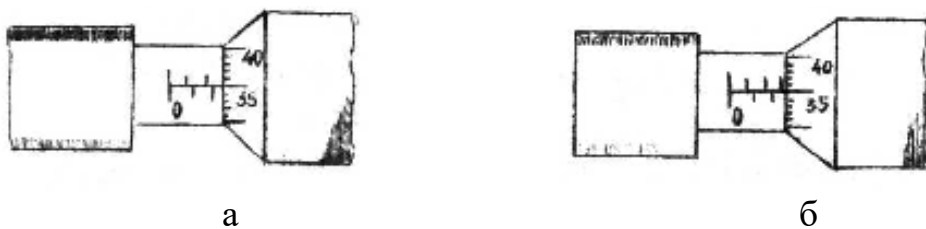


Рис. 9.

При положенні барабана, зображеному на рис. 9,а, довжина вимірюваного тіла становить 2,35 мм. При положенні барабана на рис. 9,б довжина вимірюваного тіла дорівнює 2,85 мм, оскільки після другої поділки шкали видно одну риску між 2-ю і 3-ю поділками. Це свідчить про те, що барабан після другої поділки здійснює 2-й оберт і, хоч на барабані, як і на рис. 9,а, проти центральної лінії розташована 35-а поділка, результатом виміру є не 2,35 мм, а 2,85 мм. При затиснутому гвинті нуль барабана збігається проти нуля лінійної шкали D, а край барабана сходиться із нульовою поділкою шкали. Предмет розміщують між гвинтом і протилежним до нього упором А, потім, обертаючи гвинт за головку К, доводять його до зіткнення з предметом. За лінійною шкалою відраховують міліметри, а за шкалою барабана – соті частки міліметра.

Головним джерелом похибок є нерівномірність натискування гвинта на предмет, розмір якого вимірюється. Для усунення цього недоліку сучасні мікрометри обладнані спеціальним пристроєм, який не допускає надто сильного натискування.

Вимірювання. Перш ніж користуватись мікрометром, потрібно переконатись, що нулі його шкал збігаються. Пластинку розміщують між гвинтом та протилежним упором і обертанням барабана С підводять торець гвинта до площини пластинки.

Натискування гвинтом на пластинку слід робити тільки рукояткою К, що повертає гвинт. Момент натискування фіксується слабким тріском. Після цього тріску подальше обертання рукоятки К є непотрібним, а барабана С – неприпустимим. Знімають відліки за шкалами: міліметри – за лінійною шкалою, частки міліметра – за шкалою на барабані.

Товщину пластинки необхідно виміряти поблизу кожного з її чотирьох кутів не менше трьох разів. За наближене значення товщини беруть середнє арифметичне.

ВПРАВА 2

ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ ТРУБКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ

Приладдя: 1) штангенциркуль, 2) трубка.

Опис приладу. Штангенциркуль складається (рис. 10) з розділеного на міліметри масштабу LM, вздовж якого може переміщуватись перпендикулярно до його довжини ніжка СВ із затискувальним гвинтом С, що служить для її закріплення. На скошеному краю ніжки СВ, який прилягає до масштабу, нанесено ноніус. Коли ніжки зсунуті упритул, то нуль ноніуса збігається із нулем масштабу. Нерухома ніжка LA, закріплена на початку

масштабу також перпендикулярна до його довжини, служить упором для вимірюваного тіла. Частини FF обох ніжок служать для вимірювання внутрішніх розмірів тіл.

Вимірювання. Для визначення об'єму трубки необхідно визначити її геометричні розміри – довжину і внутрішній та зовнішній діаметри.

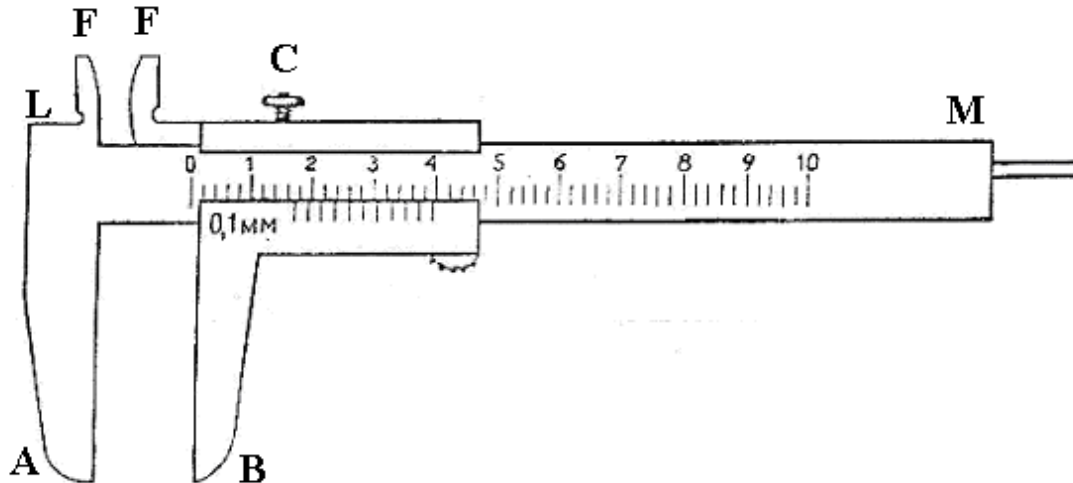


Рис. 10

Для вимірювання довжини розсувають ніжки штангенциркуля і розміщують між ними поздовжньо трубку поблизу шкали, ніжку В підводять так, щоб трубка була трошки затиснута, і роблять відлік. Оскільки ніжка В, а отже і нуль ноніуса перемістилися на довжину трубки, то відраховують на масштабі ціле число поділок міліметрів до нуля ноніусу, а потім дивляться, яка саме поділка ноніуса збігається з деякою поділкою масштабу. Вимірювання виконують декілька разів, кожного разу повертаючи трубку навколо осі на деякий кут (приблизно 45°). З усіх отриманих результатів беруть середнє арифметичне.

Для вимірювання зовнішнього діаметра трубки її злегенька затискують між ніжками штангенциркуля А і В. Вимірюють однакове число разів на одному і на протилежному кінцях трубки два взаємно-перпендикулярних діаметра, тримаючи її при цьому перпендикулярно до довжини масштабу. З усіх результатів беруть середнє.

При вимірюванні внутрішнього діаметра трубки вводять частини FF ніжок штангенциркуля у трубку і розводять їх настільки, щоб обидві вони прилягали до внутрішніх стінок трубки, і виконують відлік; потім вимірюють інший, перпендикулярний до першого, внутрішній діаметр трубки. Такі ж два вимірювання виконують на

протилежному її кінці. Беруть із усіх вимірів середнє. За результатами вимірювань, використовуючи елементарні геометричні формули, обчислюють об'єм трубки.

1.5. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 1, „МЕХАНІКА”

РОБОТА 1.1

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: 1) виміряти прискорення вільного падіння за періодом коливань математичного маятника; 2) вивчити методику математичної обробки результатів прямих і непрямих вимірювань; 3) вивчити закони гармонічного коливального руху.

Прилади та обладнання: важка кулька, яка підвішена на легкій нитці, що не розтягується; вертикальна шкала; секундомір.

Рух тіла під дією тільки однієї сили тяжіння називається вільним падінням, а прискорення, якого набуває при цьому тіло, - прискоренням вільного падіння g .

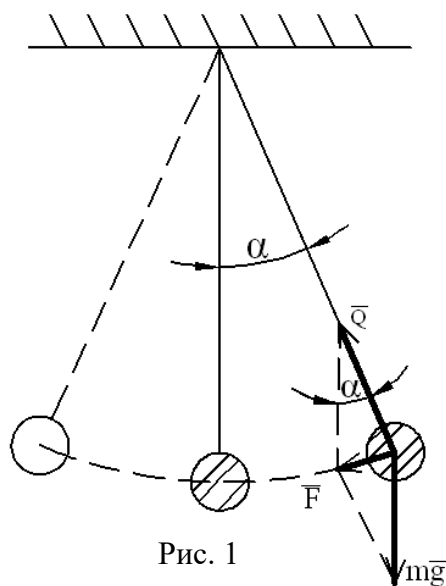


Рис. 1

У даній роботі прискорення вільного падіння визначається за допомогою математичного маятника.

Математичним маятником називається матеріальна точка, яка підвішена на тонкій невагомій нитці, що не розтягується. Ця матеріальна точка здійснює коливання у вертикальній площині під дією сили тяжіння.

На практиці математичним маятником можна вважати важке тіло, яке підвішене на легкій недеформованій нитці, довжина якої в багато разів більша за розміри тіла.

На рис.1 видно, що сила F , яка повертає маятник у напрямку до положення рівноваги, при малих кутах відхилення α дорівнює

$$F = mg \sin \alpha \approx mg \alpha, \quad (1)$$

де $\sin \alpha \approx \alpha$ (в радіанах).

Таким чином, сила F пропорційна куту відхилення маятника від положення рівноваги, отже, пропорційна зміщенню маятника від цього положення. Така сила викликає гармонічний коливальний рух.

Період коливань математичного маятника T залежить від довжини маятника l і прискорення вільного падіння:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} . \quad (2)$$

Розв'язуючи (2) відносно g , одержимо:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} , \quad (3)$$

звідки випливає, що визначення прискорення вільного падіння зводиться до вимірювання довжини маятника та періоду його коливань.

Порядок виконання роботи

1. Установлюють певну (якомога більшу) довжину нитки маятника і знаходять значення l , вимірюючи для цього відстань від точки підвісу до центра ваги підвішеного тіла.
2. Відводять маятник від положення рівноваги на малий кут ($5-10^\circ$), визначають проміжок часу, за який здійснюється $N = 50$ повних коливань. Вимірювання повторюють не менше трьох разів.
3. Обробляють результати вимірювань l і t .
4. Розраховують середнє значення величини $\langle T \rangle$ за формулою

$$\langle T \rangle = \frac{\langle t \rangle}{N}$$

і середнє значення величини $\langle g \rangle$ за формулою (3).

5. Визначають відносні похибки результатів прямих і непрямих вимірювань: $\varepsilon_T = \varepsilon_t$; $\varepsilon_g = 2\varepsilon_\pi + \varepsilon_l + 2\varepsilon_T$.

6. Розраховують довірчу границю сумарних похибок $\Delta g = \langle g \rangle \varepsilon_g$

і записують результат визначення прискорення вільного падіння у вигляді

$$g = \langle g \rangle \pm \Delta g$$

8. Оформлюють звіт і результати заносять у таблицю.

№ <i>n/n</i>	Табличні величини	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань	
	π	$l, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$g, \text{ м/с}^2$
<i>C</i>				-	-

Запитання та вправи для самоконтролю

1. Сформулюйте закон всесвітнього тяжіння.
2. Поясніть різницю між вагою і силою тяжіння.
3. Запишіть залежність прискорення вільного падіння від висоти над поверхнею Землі та географічної широти місцевості.
4. У чому полягає різниця між фізичним і математичним маятниками? Порівняйте вирази для їх періодів коливань.
5. Запишіть диференціальне рівняння гармонічних коливань та його розв'язок. Поясніть зміст понять "зміщення", "амплітуда", "початкова і повна фази", "період", "частота коливань".
6. Від яких величин залежить повна енергія гармонічних коливань?

РОБОТА 1.2

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ НА ХРЕСТОВИДНОМУ МАЯТНИКУ ОБЕРБЕКА

Мета роботи: 1) вивчити кінематику і динаміку поступального і обертального рухів; 2) використовуючи основний закон динаміки обертального руху, визначити експериментально момент інерції тягарців, закріплених на спицях хрестоподібного маятника, і порівняти результат з теоретичним значення моменту інерції тягарців.

Прилади та обладнання: хрестоподібний маятник, чотири однакові тягарці, прискорювальний тягар, секундомір, штангенциркуль, вертикальна шкала.

Хрестоподібний маятник являє собою шків (рис. 1), до якого прикріплені чотири спиці з тягарцями масою m_1 кожний. Ці тягарці за допомогою гвинтів можуть бути закріплені на спицях на будь-якій відстані від осі обертання або ж зняті.

На шків намотується нитка, до кінця якої прикріплюється тягар масою m . Під дією тягара нитка, розмотуючись, приводить систему до рівноприскореного обертання.

Поступальний рух тягара m описується другим законом Ньютона,

$$ma = F, \quad (1)$$

де F – рівнодіюча сили тяжіння mg (g – прискорення вільного падіння) і сили натягу нитки T_1 :

$$F = mg - T_1. \quad (2)$$

Обертальний рух хрестовини описується основним рівнянням динаміки обертального руху,

$$J\beta = M, \quad (3)$$

де J – момент інерції хрестовини відносно осі обертання; β – її кутове прискорення; M – момент зовнішньої сили відносно осі обертання. Відповідно до рисунка

$$M = T_2R, \quad (4)$$

де R – радіус шківів. Згідно з третім законом Ньютона сили \vec{T}_1 і \vec{T}_2 є рівними за величиною (і протилежними за напрямком):

$$T_1 = T_2 = T.$$

Виключаючи з рівнянь (2), (4) силу натягу нитки, комбінуючи рівняння (1), (3) і враховуючи зв'язок між лінійним і кутовим прискореннями,

$$\beta = \frac{a}{R}, \quad (5)$$

знаходимо:

$$J = mR^2\left(\frac{g}{a} - 1\right). \quad (6)$$

Прискорення a тягаря m виражається через шлях h , пройдений тягарем (висоту падіння), і час t проходження цього шляху:

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Вимірюючи час падіння тягаря m з однієї і тієї ж висоти, отримуємо моменти інерції J_1 і J_2 хрестовини маятника з тягарцями (індекс 1) і без тягарців (індекс 2):

$$J_1 = mR^2\left(\frac{g}{2h}t_1^2 - 1\right), \quad J_2 = mR^2\left(\frac{g}{2h}t_2^2 - 1\right).$$

Момент інерції J_0 чотирьох тягарців на спицях визначають двома різними способами :

1) експериментально – з виразу $J_0 = J_1 - J_2$, тобто за формулою

$$J_0 = \frac{md^2g}{8h}(t_1 + t_2)(t_1 - t_2), \quad \text{де } d = 2R; \quad (7)$$

2) теоретично – за формулою

$$J_{0T} = 4m_1 r^2. \quad (8)$$

В останньому випадку тягарці m_1 приймають за матеріальні точки, що знаходяться на відстані r від осі обертання.

Порядок виконання роботи

1. Записують до таблиці задані значення мас m і $4m_1$ і задану викладачем висоту h падіння тягаря m .

2. Штангенциркулем вимірюють діаметр шківів d у двох різних місцях при розмотаній і намотаній нитці і визначають $\langle d \rangle$.

3. Розміщують тягарці на спицях на однаковій відстані r від осі маятника так, щоб маятник знаходився у байдужній рівновазі; визначають $\langle r \rangle$. Перш, ніж почати експеримент, перевіряють, чи добре збалансовано маятник.

4. Відмітивши початкове положення тягаря m і надавши йому можливість падати уздовж шкали, визначають t_1 – час падіння тягаря з висоти h . Вимірювання проводять три рази, результати заносять до таблиці.

5. Знімають тягарці m_1 зі спиць і знову тричі визначають час падіння t_2 тягаря m з висоти h .

6. Розраховують середні значення $\langle t_1 \rangle$ і $\langle t_2 \rangle$.

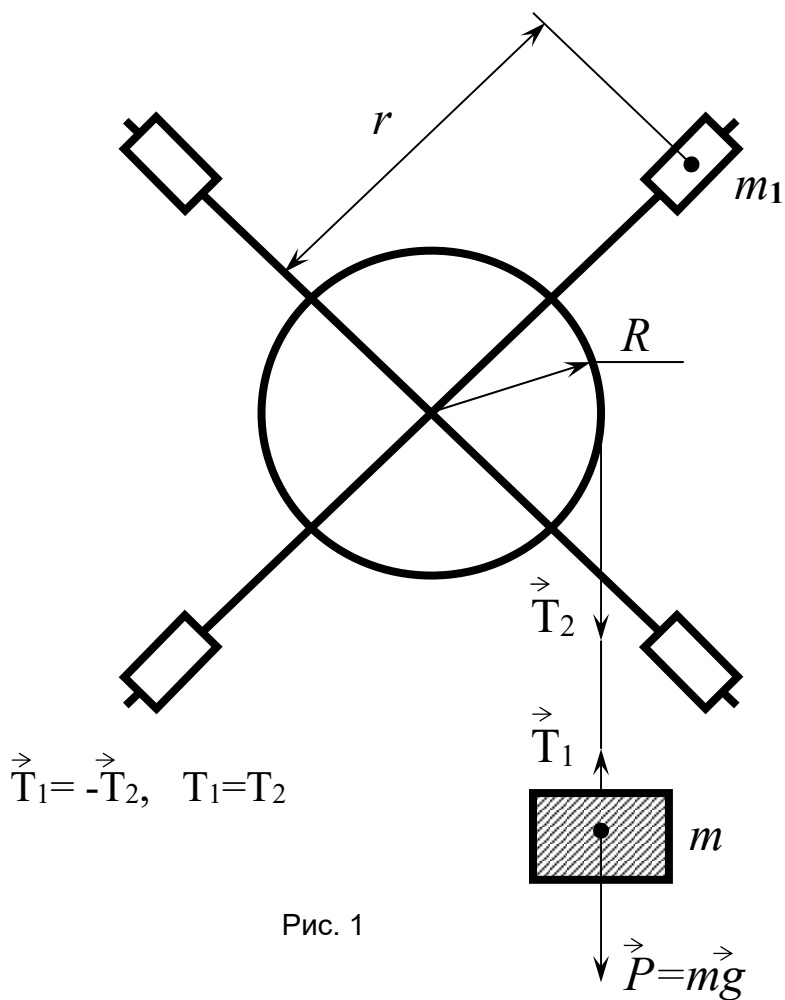
7. Оцінюють довірчі границі сумарних похибок (при достовірності не меншій 0,95) і відносні похибки результатів прямих вимірів та заносять їх до таблиці.

8. Знаходять середнє значення $\langle I_0 \rangle$, користуючись формулою (7), і оцінюють відносну похибку непрямого виміру за формулою $\varepsilon_{J_0} = \varepsilon_m + \varepsilon_g + \varepsilon_h + 2\varepsilon_d + \varepsilon_{t_1+t_2} + \varepsilon_{t_1-t_2}$ і довірчу границю Δ_{J_0}

за формулою $\Delta_{J_0} = \langle J_0 \rangle \varepsilon_{J_0} \cdot \varepsilon_{t_1 \pm t_2} = \frac{\Delta_{t_1} \pm \Delta_{t_2}}{\langle t_1 \rangle + \langle t_2 \rangle}$.

9. Оформлюють звіт і висновки. Впевнюються в тому, що теоретичне значення моменту інерції чотирьох тягарців $J_{0T} = 4m_1 r^2$, попадає в довірчій інтервал цієї величини: $J_0 = \langle J_0 \rangle \pm \Delta_{J_0}$.

	Табличні або задані величини			Результати прямих вимірювань					Результати непрямих вимірювань	
	$g, \text{М/с}^2$	$4m_1, \text{КГ}$	$m, \text{КГ}$	$h, \text{М}$	$d, \text{М}$	$r, \text{М}$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$J_{0T}, \text{КГ}\cdot\text{М}^2$	$J_0, \text{КГ}\cdot\text{М}^2$
С	-	-	-						-	-
1	-	-	-						-	-
2	-	-	-						-	-
3	-	-	-						-	-
4	-	-	-						-	-
$\langle X \rangle$										
Δ_c									-	-
Δ^o									-	-
Δ										
$\varepsilon = \Delta / \langle X \rangle$										



Запитання та вправи для самоконтролю

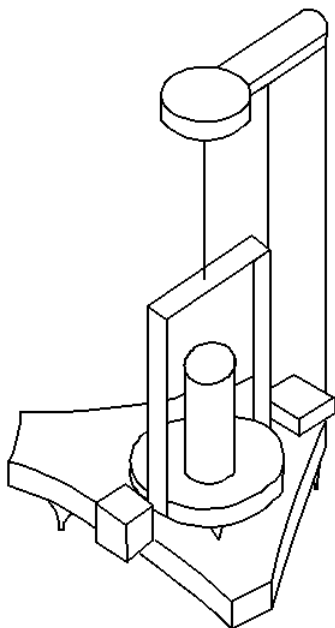
1. Дайте визначення кутових швидкості та прискорення і покажіть, як вони зв'язані з відповідними лінійними величинами.
2. Дайте визначення нормального і тангенціального (дотичного) прискорень і розкрийте їх фізичний зміст.
3. Дайте визначення моментів інерції матеріальної точки та тіла довільної форми; розкрийте фізичний зміст моменту інерції.
4. Як визначається момент сили відносно точки? Відносно осі? Відповідь проілюструйте рисунком.
5. Сформулюйте і запишіть основне рівняння динаміки обертального руху.
6. Запишіть вираз для кінетичної енергії тіла, що обертається навколо нерухомої осі.
7. Як визначається момент імпульсу тіла відносно осі обертання? Сформулюйте закон збереження моменту імпульсу.

РОБОТА 1.3 ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ТІЛА МЕТОДОМ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ

Мета роботи : 1) вивчити динаміку обертального руху твердого тіла; 2) визначити момент інерції тіла методом крутильних коливань.

Прилади та обладнання: крутильний маятник, циліндр, секундомір, штангенциркуль.

У даній роботі для визначення моменту інерції тіла неправильної форми використовують крутильний маятник, який являє собою підвішений на пружному дроті диск зі скобою (рис.1).



Період коливань маятника T зв'язаний з його моментом інерції співвідношенням:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}}, \quad (1)$$

де k – модуль кручення підвісу, який чисельно дорівнює моменту сили, що закручує дріт на кут в один радіан.

Для виключення k з виразу (1) діють так. На диску розміщують циліндр з відомим моментом інерції $J_{ц}$. У цьому

Рис.1

випадку згідно з (1) період маятника дорівнюватиме:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J + J_{ц}}{k}} \quad (2)$$

Розв'язуючи сумісно (1) і (2), одержують:

$$J = J_{ц} \frac{T^2}{T_1^2 - T^2} \quad (3)$$

$$J_{ц} = \frac{1}{2} m r^2 = \frac{1}{8} m d^2 \quad (4)$$

де m , d – маса і діаметр циліндра.

Порядок виконання роботи

1. Записують задане значення маси циліндра m .
2. Вимірюють штангенциркулем діаметр циліндра d (не менше трьох разів).
3. Крутильний маятник приводять у коливальний рух, повернувши його на невеликий кут (20-30°). Вимірюють час t тридцяти коливань ($N=30$). Вимірювання повторюють п'ять разів.
4. На диск ставлять циліндр і, повторюючи вимірювання (див. п.3), визначають час t_1 .

5. Розраховують середнє значення $\langle t \rangle$, $\langle t_1 \rangle$, $\langle d \rangle$.

6. Обчислюють середнє значення періодів коливань $\langle T \rangle = \frac{\langle t \rangle}{N}$ і $\langle T_1 \rangle = \frac{\langle t_1 \rangle}{N}$, а також середні значення моментів

інерції $\langle J_{ц} \rangle$ і $\langle J \rangle$ за формулами (4) і (3).

7. Визначають відносні похибки і довірчі границі сумарних похибок результатів вимірювань, використовуючи формули:

$$\varepsilon_{J_{ц}} = \varepsilon_m + 2\varepsilon_d; \quad \varepsilon_T = \varepsilon_t; \quad \varepsilon_{T_1} = \varepsilon_{t_1};$$

$$\varepsilon_J = \varepsilon_{J_{ц}} + 2\varepsilon_T + \frac{2\Delta_{T_1} \langle T_1 \rangle + 2\Delta_T \langle T \rangle}{\langle T_1 \rangle^2 - \langle T \rangle^2}$$

9. Оформлюють звіт і висновки, заносючи дані в таблицю.

№ п/п	Задані величини	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань			
	m , кг	d , м	t , с	t_l , с	N	T , с	T_1 , с	J_c , кг м ²	J , кг м ²

Запитання та вправи для самоконтролю

1. Дайте визначення моменту інерції матеріальної точки і тіла довільної форми.
2. Запишіть і сформулюйте теорему Штейнера, проілюструйте рисунком.
3. Наведіть відомі Вам моменти інерції тіл симетричної форми.
4. Виведіть формулу кінетичної енергії тіла, що обертається.
5. Дайте визначення моменту імпульсу твердого тіла, що обертається відносно осі обертання.
6. Запишіть і сформулюйте основний закон динаміки обертального руху.

РОБОТА 1.4

ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЮНГА ПО ЗГИНУ СТЕРЖНЯ

Мета роботи: визначити модуль пружності (модуль Юнга) для сталі.

Прилади та обладнання: прилад для визначення модуля Юнга по стрілі прогину, лінійка, штангенциркуль, набір тягарців, індикатор.

Зміну в розміщенні частинок твердого тіла під дією зовнішніх сил називають деформацією. Зміну довжини Δl при односторонньому розтягу (або стиску) називають *абсолютною деформацією*, а відношення $\frac{\Delta l}{l}$ – відносною деформацією, де l – початкова довжина.

Деформація викликає виникнення в деформованому тілі пружної сили $F_{пр}$:

$$F_{пр} = k\Delta l, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт жорсткості, який залежить від матеріалу і форми тіла. Формула (1), що виражає закон Гука, дійсна для пружних деформацій. Сила F , яка діє на площу поперечного перерізу тіла S , створює нормальну напругу

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (2)$$

Відповідно до закону Гука

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (3)$$

де E – модуль Юнга, постійний для даної речовини коефіцієнт, який характеризує її пружні властивості.

З формули (3) випливає, що модуль Юнга чисельно дорівнює напруженню, при якій відносна деформація дорівнює одиниці (тобто $\Delta l = l$).

Модуль Юнга можна визначити по згині стержня прямокутного перерізу (рис.1) за формулою

$$E = \frac{l^3}{ab^3} \cdot \frac{F}{\lambda}. \quad (4)$$

Тут l – відстань від точки опори стержня A до точки B прикладення сили F ; a і b – ширина і товщина стержня в прямокутній частині; λ – стріла прогину (тобто та відстань, на яку опускається при деформації точка C , яка лежить посередині між A і B). Стріла прогину залежить від величини навантаження, розмірів і форми стержня, а також від модуля Юнга матеріалу стержня.

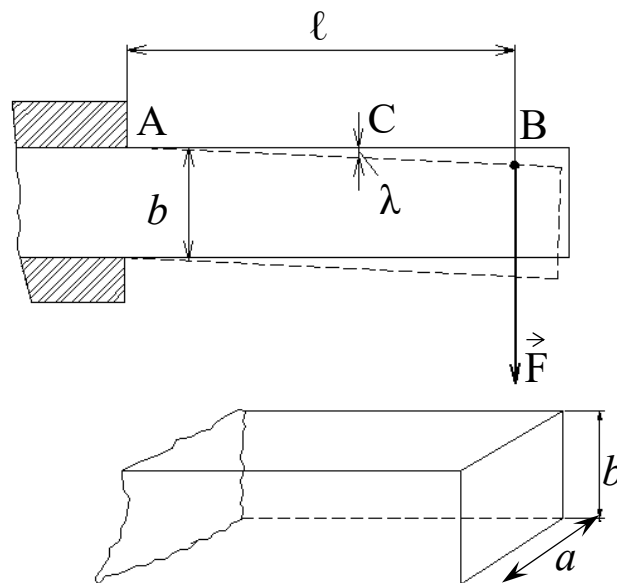


Рис.1

Порядок виконання роботи

I. Вимірюють лінійкою довжину l стержня від опори A до точки B прикладення деформуючої сили (тобто до ребра призми, на якій підвішене тягар).

2. Вимірюють штангенциркулем ширину a , товщину b стержня у вузькій прямокутній його частині.

3. У середньому положенні C закріплюють стрілочний індикатор так, щоб рухомий щуп був засунутий у корпус індикатора. При утворенні стріли прогину щуп повинен виходити з корпусу індикатора.

4. Поворотом зовнішнього кільця з насічкою на боковій поверхні встановлюють шкалу індикатора в нульове положення.

5. Чашку підвісу послідовно навантажують плоскими важками масою від 1 до 5 кг, а потім розвантажують до 0 кг. Для кожного навантаження $F = mg$ за шкалою індикатора визначають два положення стріли прогину λ (при навантаженні і розвантаженні).

6. Будують графіки залежності F від λ при навантаженні і розвантаженні (вони практично зливаються в одну пряму лінію, що проходить через початок координат, оскільки при вказаних навантаженнях деформація згину є пружною).

7. Користуючись графіком, визначають величину $\langle \frac{F}{\lambda} \rangle$ як відношення ординати правого кінця графіка до відповідної абсциси (таке відношення називають кутовим коефіцієнтом).

8. Розраховують середнє значення модуля Юнга за формулою (4) і відносно похибку вимірювань за формулою

$$\varepsilon_E = 3\varepsilon_l + \varepsilon_a + 3\varepsilon_b + \varepsilon_\lambda + \varepsilon_F.$$

9. Визначають довірчу границю $\Delta_E = \varepsilon_E \langle E \rangle$ сумарних похибок при $P \geq 0,95$.

10. Оформлюють звіт і висновки, вносячи дані в таблицю.

№ п/п	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань	
	l , м	a , м	b , м	λ , м	$\frac{F}{\lambda}$, $\frac{H}{м}$	E , Па

Запитання і вправи для самоконтролю

1. Дайте визначення абсолютної і відносної, пружної і непружної та залишкової деформації.

2. Перелічіть відомі види деформації.

3. Запишіть і сформулюйте закон Гука (в загальному вигляді і для одностороннього розтягу або стиску).

4. Розкрийте фізичний зміст модуля Юнга
5. Нарисуйте діаграму розтягу і вкажіть точки, що відповідають границям пружності і міцності. Вкажіть границі виконання закону Гука і границі пластичних деформацій.
6. Поясніть відмінності в пружних властивостях пластичних і крихких, а також аморфних і кристалічних тіл.

РОБОТА 1.5

ПЕРЕВІРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНУ ДИНАМІКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА МАКСВЕЛЛА

Мета роботи: 1) засвоїти основні питання кінематики і динаміки обертального руху твердого тіла; 2) визначити експериментально прискорення центра мас маятника і порівняти його з теоретичним значенням.

Прилади: маятник Максвелла, секундомір, штангенциркуль, лінійка.

Маятник Максвелла – це невеликий диск (маховичок), що туго насаджений на валик і під дією сили тяжіння може опускатися на двох нитках, які попередньо намотані на валик маховичка (див .рис. 1).

Дві нитки під час руху вниз розмотуються на всю довжину. Маховик, що розкрутився, продовжує обертальний рух у тому ж напрямку, намотуючи нитку на вісь. Внаслідок цього він підіймається угору і при цьому гальмує свій рух.

Піднявшись до верхньої точки, диск знову буде спускатися вниз і т.д. Маховичок буде коливатися, рухаючись то угору, то вниз; тому такий пристрій і називають маятником.

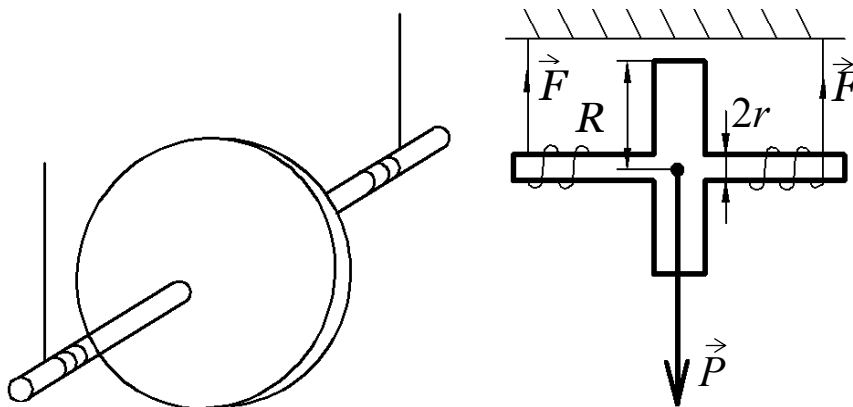


Рис.1

Позначимо через P силу тяжіння, що діє на маятник, а через F силу натягу однієї нитки. Тоді рівняння поступального руху маховика запишеться у вигляді:

$$P - 2F = ma, \quad (1)$$

де m – маса маятника; a – прискорення його центра мас. Рівняння для обертального руху буде мати вигляд:

$$2Fr = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

де r – радіус валика; ω – кутова швидкість обертального руху диска; J – момент інерції маятника. Останній дорівнює сумі моментів інерції валика J_1 і диска J_2 :

$$J = J_1 + J_2. \quad (3)$$

Валик є однорідним циліндром, тому

$$J_1 = \frac{1}{2} m_1 r^2, \quad (4)$$

де m_1 – маса валика. Момент інерції диска з коаксіальним отвором в ньому визначається з виразу

$$J_2 = \frac{1}{2} m_2 (R^2 - r^2), \quad (5)$$

де R – радіус диска; r – радіус отвору; m_2 – маса диска.

Враховуючи, що $a = r \frac{d\omega}{dt}$, з рівнянь (1) і (2) знаходимо:

$$a = \frac{P}{m + \frac{J}{r^2}} = \frac{mg}{m + \frac{J}{r^2}}. \quad (6)$$

Якщо диск і валик виготовлені з одного і того ж самого матеріалу і радіус валика набагато менше радіуса диска (тобто $r \ll R$), формула (6) спрощується і набуває вигляду:

$$a \approx 2g \left(\frac{r}{R} \right)^2. \quad (7)$$

Прискорення центра мас маятника можна визначати також за формулою:

$$a \approx \frac{2S}{t^2}, \quad (8)$$

де S – шлях, пройдений центром мас від крайнього верхнього положення до крайнього нижнього, t – час одного повного розкручування маятника. Надалі позначимо через a_T прискорення центра мас, розраховане теоретично за формулою (7) з використанням

відомих значень r і R , а через a_e –вимірне експериментально (тобто отримане при підстановці в (8) результатів вимірювань S і t).

Мета даної роботи – порівняти експериментальне a_e та теоретичне a_T значення прискорення і проаналізувати можливі причини розбіжності одержаних результатів.

Порядок виконання роботи

1. Вимірюють за допомогою штангенциркуля діаметри d і D валика та диска в трьох різних місцях і визначають їх радіуси $r = \frac{d}{2}$ та $R = \frac{D}{2}$. Результати вимірювань заносять до таблиці.

2. Помітивши початкове положення маятника, пускають його падати вздовж шкали і в момент пуску включають секундомір. Визначають час повного розкручування. Вимірювання t виконують тричі для одного і того ж самого значення S . Результати вимірювань заносять до таблиці.

3. За середніми значеннями $\langle S \rangle$, $\langle t \rangle$, $\langle R \rangle$ і $\langle r \rangle$ визначають експериментальне a_e та теоретичне a_T значення прискорення центра мас за формулами (8) і (7). Результати обчислень заносять до таблиці.

4. Оцінюють довірчі границі сумарних похибок і відносні похибки результатів прямих вимірювань.

5. Визначають довірчі границі сумарних похибок непрямих вимірювань за формулами

$$\Delta_{a_e} = \langle a_e \rangle \varepsilon_{a_e}; \quad \varepsilon_{a_e} = \varepsilon_S + 2\varepsilon_t$$

$$\Delta_{a_T} = \langle a_T \rangle \varepsilon_{a_T}; \quad \varepsilon_{a_T} = \varepsilon_g + 2(\varepsilon_R + \varepsilon_r)$$

6. Порівнюють значення a_e і a_T з урахуванням довірчих границь їх сумарних похибок. Аналізують можливі причини розбіжності результатів.

№ п/п	Табличні величини	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань	
		$R, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$a_e, \text{ м/с}^2$	$a_T, \text{ м/с}^2$
	-						

Запитання і вправи для самоконтролю

1. Дайте визначення кутової швидкості та кутового прискорення.
2. Як зв'язані лінійна та кутова швидкості, лінійне та кутове прискорення?
3. Що таке момент сили?
4. Що таке момент інерції, в яких одиницях він вимірюється? Наведіть приклади моментів інерції тіл симетричної форми.
5. Запишіть і сформулюйте основний закон динаміки обертального руху.
6. Дайте визначення моменту імпульсу, запишіть і сформулюйте закон збереження моменту імпульсу і наведіть приклади, що ілюструють цей закон.

Вступ до робіт 1.6, 1.7, 1.8.

ФІЗИЧНИЙ МАЯТНИК

Період гармонічних коливань фізичного маятника T визначається за формулою

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, L – приведена довжина фізичного маятника, яка у свою чергу визначається із співвідношення:

$$L = \frac{I}{md}, \quad (2)$$

де I – момент інерції маятника відносно осі качань O ; m – маса маятника; d – відстань від осі качань до центра мас маятника C (рис.1).

Згідно з теоремою Штейнера $I = I_c + md^2$, де I_c – момент інерції маятника відносно осі, що проходить через центр мас (і паралельно осі качань). I_c можна записати у вигляді $I_c = md_0^2$,

де d_0 – радіус інерції. Використовуючи останні два співвідношення, замість рівняння (2) отримуємо

$$L = \frac{d^2 + d_0^2}{d}. \quad (3)$$

Беручи до уваги формулу (3), для періоду коливань (1) маємо:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{d^2 + d_0^2}{gd}}. \quad (4)$$

З рівняння (4) випливає, що період коливань T фізичного маятника є функцією аргументу d , тобто $T = T(d)$. Графік залежності $T = T(d)$ наведено на рис.2. Можна показати, що функція $T = T(d)$ має мінімум при $d = d_0$, а при $d \rightarrow 0$ та $d \rightarrow \infty$ прямує до нескінченності.

З графіка видно, що кожному періоду коливань відповідають два значення d : $d_1 < d_0$ та $d_2 > d_0$. Використовуючи рівність $T(d_1) = T(d_2)$, можна довести, що $L = d_1 + d_2$.

Враховуючи це співвідношення, з формули (1) отримуємо:

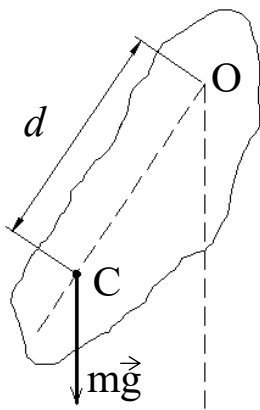


Рис.1

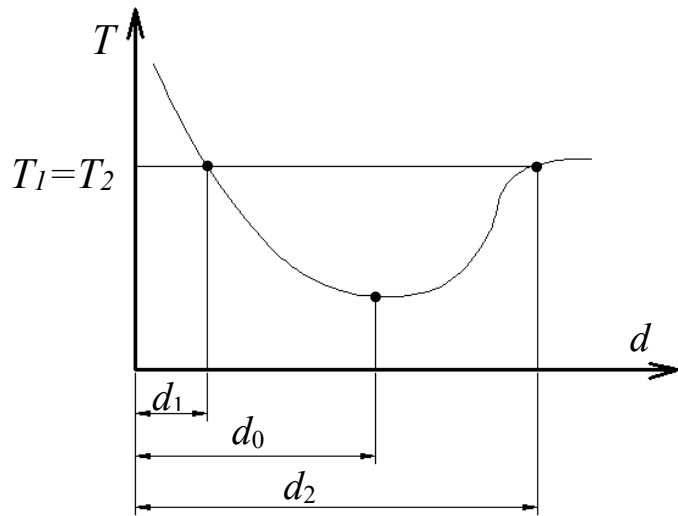


Рис.2

$$g = 4\pi^2 \frac{d_1 + d_2}{T^2}. \quad (5)$$

РОБОТА 1.6

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: 1) вивчити гармонічні коливання; 2) виміряти прискорення вільного падіння.

Прилади та обладнання : стержень з призмою, секундомір.

Фізичний маятник, що використовується у даній роботі, називають оборотним. Він складається з металевого стержня, на якому закріплено призми Π_1 і Π_2 і тягарі Γ_1 і Γ_2 (рис.1). Один з них закріплено жорстко, а другий може переміщуватися уздовж стержня і закріплюватися гвинтом. Положення тягарів підбрано так, що періоди

T_1 і T_2 коливань маятника відносно призм Π_1 і Π_2 збігаються. При збігу періодів відстань між призмами дорівнює приведеній довжині маятника $L = d_1 + d_2$. В роботі ця відстань становить $0,730 \pm 0,001$ м.

Порядок виконання роботи

1. Відхиляють маятник від положення рівноваги на малий кут ($5-8^\circ$) і, пропустивши 1-2 коливання, визначають за допомогою секундоміра час t_1 п'ятдесяти повних коливань. Вимірювання величини t_1 повторюють тричі.

2. Перевертають маятник і тричі вимірюють час t_2 п'ятдесяти повних його коливань у новому положенні.

3. Результати всіх шести вимірювань часу t обробляють за стандартною формою.

4. Розраховують середнє значення періоду $\langle T \rangle$ за формулою $\langle T \rangle = \frac{\langle t \rangle}{50}$ і середнє значення величини $\langle g \rangle$, використовуючи формулу (5) на с.74.

5. Розраховують відносні похибки $\varepsilon_T = \varepsilon_t$ та $\varepsilon_g = \varepsilon_L + 2\varepsilon_T$.

6. Розраховують довірчу границю сумарних похибок вимірювань величини g при достовірності $P \geq 0,95$, тобто $\Delta_g = \langle g \rangle \varepsilon_g$.

Записують довірчий інтервал у вигляді $g = \langle g \rangle \pm \Delta_g$

7. Оформляють звіт і висновки, для чого заносять дані в таблицю

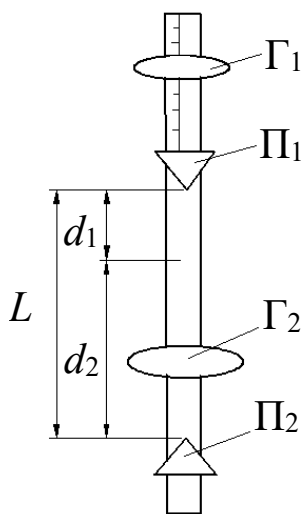


Рис.1

№ п/п	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань	
	$t, \text{с}$	$L, \text{м}$	$T, \text{с}$	$g, \text{м/с}^2$

Запитання та вправи для самоконтролю

1. Дайте визначення гармонічних коливань та поясніть зміст понять "амплітуда", "частота", "циклічна частота", "період", "фаза".
2. Які коливання називають вільними (власними)?
3. Що таке фізичний маятник? Приведена довжина фізичного маятника.
4. Які сили називають квазіпружними? Наведіть приклади.
5. Дайте визначення моменту інерції твердого тіла і радіуса інерції.
6. Запишіть і сформулюйте теорему Штейнера та наведіть рисунок, що її ілюструє.
7. Поясніть, як і чому прискорення вільного падіння залежить від широти місцевості.

РОБОТА 1.7

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ПО КРИВІЙ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЕРІОДУ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА ВІД ПОЛОЖЕННЯ ТОЧКИ ПІДВІСУ.

Мета роботи: 1) вивчити гармонічні коливання; 2) визначити приведену довжину маятника та прискорення вільного падіння.

Прилади та обладнання: металевий стержень з опорною призмою, секундомір.

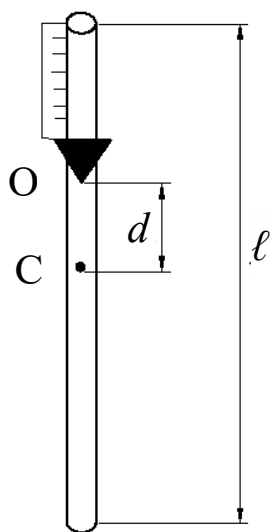


Рис.1

Фізичний маятник, що використовується в даній роботі, являє собою однорідний металевий стержень завдовжки близько 1 м (рис.1). На стержні є шкала і пересувна опорна призма, яку можна закріпити у будь-якому місці стержня.

Порядок виконання роботи

1. Опорну призму закріплюють на самому кінці стержня-маятника. Ребрам опорної призми маятник ставлять на підставку; відхиливши його від положення рівноваги на малий кут ($\leq 4^\circ$), вимірюють за допомогою секундоміра час 50 повних коливань і обчислюють їх період.

2. Повторюють вимірювання (див. п.1) через кожні 4 см і дані заносять у таблицю.

Треба одержати 10-12 значень періоду (періоди можуть відрізнятися на соті долі секунди, їх необхідно визначити дуже ретельно).

3. За даними таблиці будують графік функції $T=T(d)$ (див. рис.2 на стор.104). По осі абсцис відкладають відстань між серединою стержня і ребром опорної призми, по осі ординат - значення періоду. Через експериментальні точки, нанесені на графік, проводять плавну криву так, щоб приблизно однакова кількість точок була розташована по обидві сторони кривої. Графік необхідно будувати тільки на міліметровому папері.

4. Паралельно осі абсцис проводять пряму так, щоб вона двічі перетинала криву $T=T(d)$. Знаходять значення ординати T та абсцис d_1 і d_2 точок перетину і визначають приведену довжину $L = d_1 + d_2$. Прискорення вільного падіння g обчислюють за формулою (5), наведеною, мінімум для трьох значень приведеної довжини і періоду; потім знаходять середнє арифметичне.

№ п/п	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань		
	d , м	t , с	T , с	L , м	g , м/с ²

Запитання та вправи для самоконтролю

1. Що таке фізичний маятник? За яких умов його коливання є гармонічними?
2. Що таке приведена довжина фізичного маятника?
3. Дайте визначення моменту інерції твердого тіла та радіуса інерції, виразіть радіус інерції однорідного стержня через його довжину.
4. Сформулюйте теорему Штейнера і наведіть рисунок, що її ілюструє.
5. Розкрийте математичний та фізичний зміст поняття фази коливань. На яку величину змінюється фаза за час, що дорівнює періоду? Відповідь обґрунтуйте.
6. За яких умов виникає явище невагомості?

РОБОТА 1.8

ВИЗНАЧЕННЯ ЛОГАРИФМІЧНОГО ДЕКРЕМЕНТУ ЗАГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: 1) вивчити загасаючі коливання; 2) визначити логарифмічний декремент загасання і коефіцієнт загасання коливань.

Фізичний маятник, що використовується в даній роботі, має вигляд стержня з тягарцем на кінці /рис.1/. Стержень підвішений на кронштейні за допомогою шарикового підшипника. На підставці у площині коливань встановлено шкалу, яка дозволяє вимірювати амплітуду. Наявність сил тертя призводить до того, що енергія маятника, який вільно коливається, витрачається на роботу з їх подолання і з часом зменшується. В результаті цього зменшується амплітуда коливань. Отже, вільні /власні/ коливання завжди загасають і тому, строго кажучи, не є гармонічними. Амплітуда цих загасаючих коливань зменшується за експоненціальним законом:

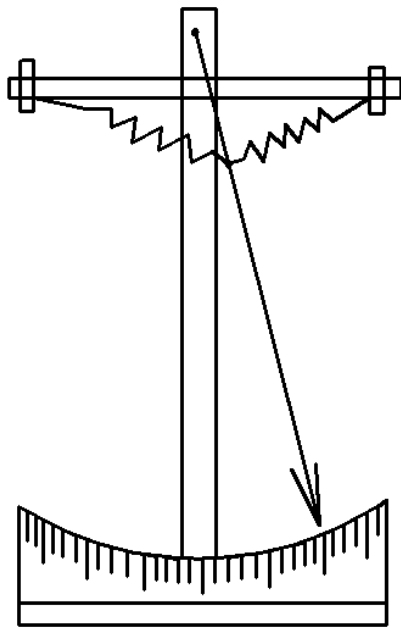


Рис.1

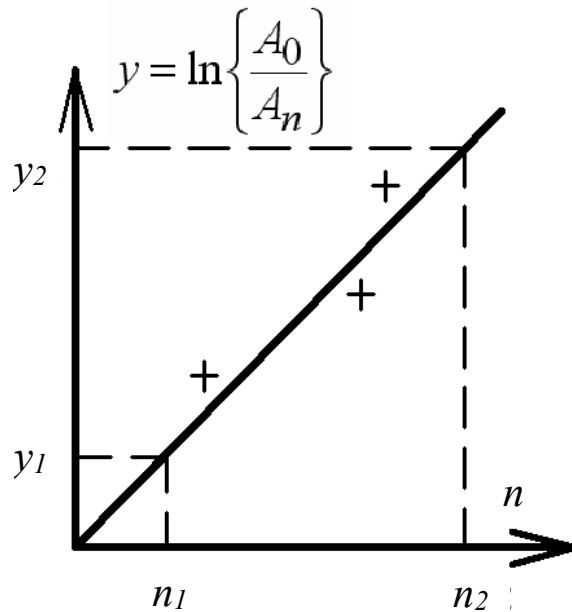


Рис.2

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}. \quad (1)$$

Тут A_0 – амплітуда в початковий момент часу, $t=0$; β – параметр системи, який називається **коефіцієнтом загасання**. Згідно з рівнянням (1) за час $\tau = 1/\beta$ амплітуда загасаючих коливань зменшується в e разів. Величину τ називають **часом релаксації** системи; за цей час відбувається $N = \tau/T = 1/\beta T$ повних коливань (тут T – період коливань).

Коефіцієнт загасання β враховує наявність сил тертя (за відсутності тертя $\beta=0$). Для зміни величини β фізичний маятник, що використовується в даній роботі, має поновлюючі пружини. Для характеристики загасання коливань поряд з коефіцієнтом загасання користуються безрозмірною величиною $\delta = \frac{1}{N} = \beta T$, яка називається **декрементом загасання** (або логарифмічним декрементом).

Логарифмічний декремент загасання δ визначається як натуральний логарифм відношення амплітуд, що відрізняються за часом, на період:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (2)$$

Виходячи з формули (1), можна довести, що для будь-якого цілого числа n має місце співвідношення

$$\ln \frac{A(t)}{A(t+nT)} = n\delta = n\beta T \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

1. За допомогою установочних гвинтів встановлюють підставку маятника горизонтально.

2. За відсутності поновлюючих пружин відхиляють маятник на невеликий кут ($\leq 10^\circ$), відраховують по шкалі кількість поділок A_0 (тут $A_0 = A(0)$) і відпускають маятник. Потім відраховують $n=10$ повних коливань і знову вимірюють амплітуду. Результат позначають через A_n (тут $A_n \equiv A(nT)$).

3. Встановлюють те ж саме значення A_0 і повторюють вимірювання (див. п.2) для $n = 20, 30, 40, 50, 60, 70$. Результати заносять у табл.1.

4. Вимірювання (див. п.п.2,3) повторюють за наявності поновлюючих пружин. Результати заносять у табл.2.

5. Обчислюють значення A_0/A_n та $\ln(A_0/A_n)$ і заносять їх у відповідні таблиці.

6. Для маятника з пружинами і без них будують на одному і тому ж самому графіку за даними таблиці 1 та 2 залежності відношення амплітуд A_0/A_n від кількості коливань n . Одержані криві порівнюють між собою.

7. Для маятника з пружинами будують графік, відкладаючи по осі абсцис кількість коливань n , а по осі ординат – значення $y = \ln(A_0/A_n)$. Логарифмічний декремент загасання визначають, знаходячи нахил одержаної прямої лінії (див. рис.2, де хрестиком позначено експериментальні точки):

$$\delta = \frac{y_2 - y_1}{n_2 - n_1}$$

8. Аналогічно обчислюють логарифмічний декремент загасання δ_0 для маятника без пружин.

9. За допомогою секундоміра визначають періоди T і T_0 коливань маятника з пружинами і без них, вимірюючи проміжки часу t 50 повних коливань:

$$T = \frac{\langle t \rangle}{50}; \quad T_0 = \frac{\langle t_0 \rangle}{50}.$$

Розраховують коефіцієнт загасання $\beta = \frac{\delta}{T}$, $\beta_0 = \frac{\delta_0}{T_0}$

маятника з пружинами і без них та відповідний час релаксації

$$\tau = \frac{1}{\beta}, \quad \tau_0 = \frac{1}{\beta_0}.$$

Розрахунки заносять у табл.3.

1. Результати розрахунків для маятника без пружин; $A_0 = \dots$

N	A_n	A_0/A_n	$\ln(A_0/A_n)$	δ_0
10				
20				
...				
70				

2. Результати розрахунків для маятника з пружинами; $A_0 = \dots$

n	A_n	A_0/A_n	$\ln(A_0/A_n)$	δ
10				
20				
...				
70				

3.

№ П/П	Результати непрямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань					
	$t_0, \text{с}$	$t, \text{с}$	$T_0, \text{с}$	$\beta_0, \text{с}^{-1}$	$\tau_0, \text{с}$	$T, \text{с}$	$\beta, \text{с}^{-1}$	$\tau, \text{с}$

Запитання та вправи для самоконтролю

1. Складіть диференціальне рівняння власних незагасаючих коливань і залишіть його розв'язок.
2. Складіть диференціальне рівняння власних коливань з урахуванням сил тертя; запишіть його розв'язок і зробіть аналіз.
3. Як залежить амплітуда загасаючих коливань від часу? Запишіть вираз і проілюструйте графіком.
4. Що таке коефіцієнт загасання? Який його фізичний зміст?
5. Дайте визначення логарифмічного декременту загасання; покажіть, як він зв'язаний з коефіцієнтом загасання і розкрийте його фізичний зміст.

2. МОДУЛЬ 2 „МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА”

2.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ

Кількість речовини однорідного газу (в молях):

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad \text{чи} \quad \nu = \frac{m}{M},$$

де N – число молекул газу; N_A – стала Авогадро; m – маса газу; M – молярна маса (маса одного, 1 моль) газу.

Якщо система являє суміш декількох газів, то кількість речовини системи визначається як:

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A}$$

або

$$\nu = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n},$$

де ν_i, N_i, m_i, M_i – відповідно кількість речовини, число молекул, маса, молярна маса i -го компонента суміші.

Рівняння Менделєєва – Клапейрона (рівняння стану ідеального газу):

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT,$$

де p, V, T – параметри стану; m – маса газу; M – молярна маса газу; $\nu = m/M$ – кількість речовини; $R = 8,31$ Дж/моль·К – універсальна газова стала; T – термодинамічна температура.

Дослідні (експериментальні) газові закони, які є частковим випадком рівняння Менделєєва – Клапейрона для ізопроеесів:

а) закон Бойля–Маріотта (ізоермічний процес $T = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$pV = \text{const}, \text{ чи для двох станів газу: } p_1V_1 = p_2V_2;$$

б) закон Гей – Люсака (ізобарний процес $p = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \text{ чи для двох станів: } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2};$$

в) закон Шарля (ізохорний процес $V = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$\frac{p}{T} = \text{const}, \text{ чи для двох станів: } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$

г) об'єднаний газовий закон ($m = \text{const}$):

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \text{ або } \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2},$$

де p_1, V_1, T_1 – тиск, об'єм та температура газу в початковому стані;

p_2, V_2, T_2 – те ж саме, в кінцевому стані.

Закон Дальтона, який визначає тиск суміші газів:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

де p_1 – парціальні тиски компонентів суміші; n – число компонентів суміші.

Парціальний тиск є тиск газу, який створював би цей газ, якби він один знаходився в ємності, яку займає суміш.

Молярна маса суміші газів:

$$M = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n},$$

де m_i – маса i -го компонента суміші; $\nu_i = \frac{m_i}{M_i}$ – кількість речовини

i -го компонента суміші; n – число компонентів суміші.

Масова доля ω_i i -го компонента суміші газу (в долях одиниці чи відсотках):

$$\omega_i = \frac{m_i}{m},$$

де m —маса суміші.

Концентрація молекул:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \rho}{M},$$

де N —число молекул, які містить дана система; ρ —густина речовини; V —об'єм системи. Формула дійсна не тільки для газів, але і для будь-якого агрегатного стану речовини.

Основне рівняння молекулярно – кінетичної теорії ідеальних газів

Тиск ідеального газу p прямо пропорційний концентрації n молекул газу і середній кінетичній енергії поступального руху $\langle \varepsilon_n \rangle$ молекули газу:

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_n \rangle \quad (1)$$

Відповідно до експериментальних газових законів і висновків молекулярно-кінетичної теорії газів встановлено, що

$$\langle \varepsilon_n \rangle = \frac{3}{2} kT, \quad (2)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К—стала Больцмана, T —термодинамічна температура.

Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді залежності тиску газу від концентрації молекул та температури:

$$p = nkT. \quad (3)$$

Середня повна кінетична енергія молекули:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{i}{2} kT, \quad \text{де } i\text{—число ступенів свободи молекули, що}$$

дорівнює 3, 5 та 6 для одно-, двоатомного та три чи більш атомного газу.

Швидкість молекул :

$$\langle V_{KB} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_1}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (\text{середня квадратична});$$

$$\langle V \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_1}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (\text{середня арифметична});$$

$$V_{iM} = \sqrt{\frac{2kT}{m_1}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (\text{найбільш ймовірна}),$$

де m_1 – маса однієї молекули.

Відносна швидкість молекули:

$$u = \frac{V}{V_{im}},$$

де V – швидкість даної молекули.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу записується ще й так:

$$p = \frac{1}{3} n m_1 V_{кв}^2.$$

Перший закон термодинаміки

Важливою характеристикою термодинамічної системи є її **внутрішня енергія U** . Внутрішня енергія – це сума енергій хаотичного (теплого) руху мікрочастинок системи (молекул, атомів, електронів, ядер тощо) та енергії взаємодії цих частинок. Внутрішня енергія – однозначна функція термодинамічного стану системи.

Внутрішня енергія ідеального газу визначається за формулою:

$$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT, \quad (1)$$

де i – число ступенів свободи молекули

Перший закон термодинаміки є законом збереження і перетворення енергії стосовно до теплових процесів. В неізольованих термодинамічних системах цей закон формулюється як закон рівності між прибуттям і витратою енергії в системі.

Математичний запис цього закону:

$$Q = \Delta U + A, \quad (2)$$

тобто: кількість теплоти Q , що передана системі, витрачається на збільшення її внутрішньої енергії ΔU і виконання роботи A проти зовнішніх сил.

У диференціальній формі цей закон запишеться у вигляді:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (3)$$

де dU – нескінченно мала зміна внутрішньої енергії, δA – елементарна робота; δQ – нескінченно мала кількість теплоти.

У СІ кількість теплоти виражається в тих же одиницях, що робота і енергія, тобто в джоулях (Дж).

Питома теплоємність газу при сталому об'ємі (c_v) та при сталому тиску (c_p):

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}; \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}.$$

Зв'язок між питомою c та молярною C теплоємностями:

$$c = \frac{C}{M} \quad \text{або} \quad C = cM.$$

Рівняння Майєра:

$$C_p - C_v = R.$$

Внутрішня енергія ідеального газу:

$$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT = \frac{m}{M} C_v T.$$

Робота розширення газу:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (\text{у загальному випадку});$$

$$A = p(V_2 - V_1) \quad (\text{при ізобарному процесі});$$

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{при ізотермічному процесі});$$

$$A = -\Delta U = -\frac{m}{M} C_v \Delta T \quad \text{чи} \quad A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] \quad (\text{при}$$

адіабатичному процесі), де $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – показник адіабати.

Рівняння Пуассона, яке зв'язує параметри ідеального газу при адіабатичному процесі:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1},$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}.$$

Другий закон термодинаміки

Коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини дорівнює:

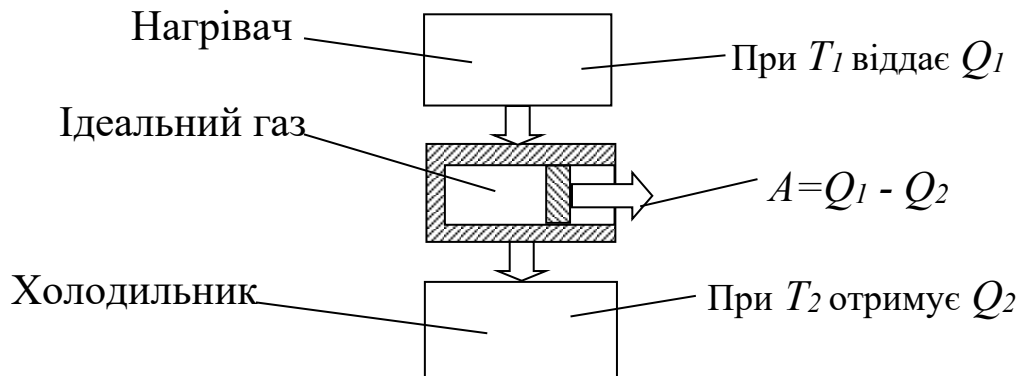
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

де Q_1 – теплота, яка отримана робочим тілом від нагрівача; Q_2 – теплота, яка передана робочим тілом холодильнику.

Термічний коефіцієнт корисної дії циклу Карно:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

де T_1 і T_2 – відповідно термодинамічна температура нагрівача та холодильника.



Другий закон термодинаміки Рис. 14 визначає напрямок протікання термодинамічних процесів, визначає які процеси в природі можливі, а які неможливі. Існує кілька еквівалентних формулювань закону. Наведемо деякі з них.

1. Неможливий періодично діючий механізм, який всю одержану від нагрівача кількість теплоти Q_1 повністю переводив би в роботу A ; частина цієї кількості теплоти Q_2 повинна бути віддана холодильнику (формулювання Кельвіна).

Використовуючи поняття **ентропії** S – характеристики стану термодинамічної системи, другий закон формулюється як **закон зростання ентропії ізольованої системи** (Клаузіус).

2. В ізольованих системах здійснюються лише такі процеси, при яких **ентропія** системи **зростає**, якщо здійснюються необоротні процеси (наприклад, вирівнювання температур, тисків, концентрації різних речовин, електричних потенціалів у різних частинах системи), або залишається сталою якщо процеси оборотні.

За Клаузіусом ентропія – це фізична величина, зміна якої в системі при елементарному оборотному процесі дорівнює відношенню кількості теплоти δQ до температури T цього процесу.

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

Фізичний зміст ентропії відкривається в статистичній фізиці. За Больцманом ентропія зв'язується з термодинамічною ймовірністю Ω стану системи. Термодинамічна ймовірність – це число способів, якими може бути реалізований даний стан макросистеми. За визначенням $\Omega \geq 1$, тобто термодинамічна ймовірність не є ймовірністю в математичному розумінні. Згідно з теорією Больцмана, ентропія системи і термодинамічна ймовірність зв'язані між собою співвідношенням:

$$S = k \ln \Omega.$$

Формула Больцмана дозволяє дати ентропії такий статистичний зміст: **ентропія є мірою неупорядкованості системи.**

Оскільки реальні процеси необоротні, то на основі другого закону термодинаміки можна стверджувати, що **всі процеси в ізольованій системі ведуть до збільшення її ентропії.** В стані термодинамічної рівноваги системи ентропія досягає максимального значення.

Коефіцієнт поверхневого натягу:

$$\alpha = \frac{F}{l} \quad \text{чи} \quad \alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S},$$

де F – сила поверхневого натягу, яка діє на контур l , що обмежує поверхню рідини; E – зміна вільної енергії поверхневої плівки рідини, яка зв'язана зі зміною площі ΔS поверхні цієї плівки.

Формула Лапласа, що виражає тиск, створений сферичною поверхнею рідини:

$$p = \frac{2\alpha}{R},$$

де R – радіус сферичної поверхні.

Висота підйому рідини в капілярній трубці:

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g R},$$

де θ – крайовий кут ($\theta = 0$ при повному змочуванні стінок трубки рідиною; $\theta = \pi$ при повному незмочуванні); R – радіус каналу трубки; ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння.

Висота підйому рідини між двома близькими та паралельними одна до одної площинами:

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g d},$$

де d – відстань між площинами.

2.2. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 1. При нагріванні на 600 К тиск ідеального газу збільшився в три рази. Обчислити початкову температуру цього газу.

Розв'язання. Введемо позначення $\Delta T = 600$ К – зміна температури газу, T_1 – початкове значення температури, $T_2 = T_1 + \Delta T$ – кінцеве значення температури газу, $n = p_2/p_1$ – зміна його тиску внаслідок нагрівання (тобто в скільки разів змінився тиск). За умовою задачі $n = 3$. Використаємо закон Шарля, записуючи його через введені позначення:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad n = \frac{T_1 + \Delta T}{T_1} = 1 + \frac{\Delta T}{T_1}.$$

Розв'язуючи це рівняння, знаходимо початкову температуру:

$$T_1 = \frac{\Delta T}{n - 1} = 300 \text{ К},$$

тобто початкова температура газу дорівнює 300 К.

Приклад 2. Яку початкову температуру мало повітря в циліндрі під поршнем, який вільно рухається без тертя, якщо в результаті нагрівання на 100 К його об'єм збільшився на 10% від початкового значення?

Розв'язання. Запишемо початкові й кінцеві параметри газу і значення його температури : спочатку – V_1 і T_1 , після нагрівання – $V_2 = 1,1 \cdot V_1$; $T_2 = T_1 + \Delta T$, де $\Delta T = 100$ К. Для ізобарного процесу можна записати:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad \text{або} \quad \frac{1,1V_1}{V_1} = 1 + \frac{\Delta T}{T_1};$$

$$0,1 = \frac{\Delta T}{T_1}.$$

Отже, $T_1 = \Delta T / 0,1 = 1000 \text{ К}$.

Приклад 3. При температурі + 27°C і тиску 267 кПа густина деякої сполуки вуглецю і водню 1,5 кг/м³. Визначити, яка це сполука і написати її формулу.

Розв'язання. За законом Клапейрона-Менделєєва

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (1)$$

знаходимо вираз для молярної маси M :

$$M = m \frac{RT}{pV}, \quad (2)$$

де m —маса; V —об'єм; p —тиск; T —термодинамічна температура;

R —універсальна газова стала; $\frac{m}{V} = \rho$ —густина речовини.

Отже,

$$M = \rho \frac{RT}{p}. \quad (3)$$

Запишемо в одиницях СІ числові значення величини, що входять у формулу (3):

$\rho = 1,5 \text{ кг/м}^3$; $R = 8,32 \text{ кг/моль}$; $T = 300 \text{ К}$; $p = 2,67 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Підставимо в формулу (3) і вирахуємо молярну масу M даної сполуки:

$$M = \rho \frac{RT}{p} = \frac{1,5 \cdot 8,31 \cdot 300}{2,67 \cdot 10^5} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

Молярна M і відносна молекулярна M_r маси зв'язані залежністю

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \quad (4)$$

Отже,

$$M_r = 16.$$

Отже, відносна молекулярна маса $M_r = 16$.

$$M_r = xA_{r(\text{C})} + yA_{r(\text{H})}, \quad (5)$$

де $A_{r(\text{C})}$ і $A_{r(\text{H})}$ — відносні атомні маси вуглецю і водню;

x і y — кількості атомів відповідно вуглецю і водню в сполуці.

$$\begin{aligned} A_{r(\text{C})} &= 12; A_{r(\text{H})} = 1; \\ 16 &= x \cdot 12 + y \cdot 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Підбираємо значення x і y в рівнянні (6):

$$\begin{aligned} x &= 1; y = 4; \quad 16 = 1 \cdot 12 + 4 \cdot 1; \\ &1 \text{ C} + 4 \text{ H}. \end{aligned}$$

Отже, формула даної сполуки CH_4 — це газ метан.

Приклад 4. Балон містить 80 г кисню та 320 г аргону. Тиск суміші дорівнює 1 МПа, а температура—300 К. Вважаючи наведені гази ідеальними, визначити об'єм балона.

Розв'язання. За законом Дальтона тиск суміші дорівнює сумі парціальних тисків газів, що входять до складу суміші. З рівняння Менделєєва–Клапейрона парціальні тиски p_1 кисню та p_2 аргону дорівнюють:

$$p_1 = \frac{m_1 RT}{M_1 V}, \quad p_2 = \frac{m_2 RT}{M_2 V}.$$

Отже, за законом Дальтона тиск суміші газів дорівнює:

$$p = p_1 + p_2, \text{ або } p = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{RT}{V}.$$

Звідси об'єм балона

$$V = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{RT}{p}.$$

Проведемо розрахунки, враховуючи, що $M_1 = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль (кисень), та $M_2 = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль (аргон):

$$V = \left(\frac{0,08}{32 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,32}{40 \cdot 10^{-3}} \right) \frac{8,31 \cdot 300}{10^6} \text{ м}^3 = 0,0262 \text{ м}^3 = 26,2 \text{ л}.$$

Приклад 5. Визначіть найбільш імовірну швидкість молекул газу, густина якого при тиску $p = 40$ кПа становить $\rho = 0,35$ кг/м³.

Розв'язання. Найбільш ймовірна швидкість молекул газу

$$V_i = \sqrt{\frac{2RT}{M}},$$

де M – молярна маса газу.

З рівняння стану газу:

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

або

$$p = \frac{m}{V} \cdot \frac{RT}{M} = \rho \frac{RT}{M}.$$

Звідси

$$\frac{RT}{M} = \frac{p}{\rho}.$$

Отже,

$$V_i = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{2 \frac{p}{\rho}}.$$

Перевіримо розмірність лівої та правої частин формули:

$$\frac{m}{c} = \sqrt{\frac{H \cdot m^3}{m^2 \cdot kZ}} = \sqrt{\frac{kZ \cdot m \cdot m}{c^2 \cdot kZ}} \frac{m}{c}.$$

Підставимо числові значення величин з умови задачі:

$$V_i = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot 10^4}{0,35}} = 478 \text{ м/с}.$$

Приклад 6. При якій температурі середня арифметична швидкість (за розподілом Максвелла) атомів неону становить половину першої космічної швидкості?

Розв'язання. Відомо, що перша космічна швидкість

$$V_1 = \sqrt{g \cdot R_3} \approx 7,9 \cdot 10^3 \frac{m}{c}. \quad (1)$$

Середня арифметична швидкість $\bar{V} = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m}}, \quad (2)$

де m – маса одного атома неону, що має $z = 10$, $A = 20$; тобто $m = 20 \text{ а.о.м} = 20 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

За умовою задачі:

$$\frac{V_1}{2} = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m}}. \quad (3)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \frac{V_1^2}{4} &= \frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m} \text{ або} \\ T &= \frac{\pi \cdot m \cdot V_1^2}{32 \cdot k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Підставимо числові значення:

$$T = \frac{3,14 \cdot 20 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (7,9 \cdot 10^3)^2}{32 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} = \frac{650,6 \cdot 10^{-20}}{44,2 \cdot 10^{-23}} = 1,47 \cdot 10^4 \text{ К}.$$

Тобто, температура, при якій виконується умова задачі дорівнює $14700 \text{ К} = 1,47 \cdot 10^4 \text{ К}$.

Перевіримо розмірність:

$$[T] = \frac{[m] \cdot [V^2]}{[k]} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{\frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}} = \text{К}.$$

Приклад 7. Яку роботу виконує 40 г водню при нагріванні його при сталому тиску на 500 К?

Розв'язання. Спочатку перетворимо формулу для обчислення роботи газу $A = p\Delta V$ до вигляду:

$$A = pV_2 - pV_1 = \frac{m}{M}RT_2 - \frac{m}{M}RT_1 = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1).$$

За цією формулою можна обчислити роботу водню при відповідному нагріванні:

$$A = \frac{4 \cdot 10^{-2} \cdot 8,31 \cdot 500}{2 \cdot 10^{-3}} = 8,31 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

2.3. ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ № 2. МОДУЛЬ 2 “МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА”

201. Визначити кількість речовини та число молекул газу: а) кисню, б) азоту, в) водяної пари масою 1 кг.

202. Скільки атомів містить водяна пара: а) у кількості речовини 0,1 моль; 2) у масі 0,1 кг?

203. Знайти молярну масу та масу однієї молекули кухонної солі, вуглекислого газу, кисню, азоту.

204. Гранично допустима концентрація молекул парів ртуті (Hg) у повітрі дорівнює $3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, а отруйного газу хлору (Cl_2) – $8,5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Визначити, при якій масі кожної з речовин в одному кубічному метрі повітря з'являється небезпека отруєння.

205. Сучасна техніка дає змогу створити вакуум до 10^{-12} Па. Скільки молекул газу залишається при такому вакуумі в 1 м^3 при температурі 300 К?

206. Визначити концентрацію молекул кисню, що знаходиться в посудині об'ємом 1 л. Кількість речовини кисню дорівнює 1 моль.

207. Як збільшиться середня кінетична енергія молекул газу при збільшенні його температури від 27 до 77°C?

208. Визначити кількість речовини водню, що заповнює посудину об'ємом 2 л, якщо концентрація молекул газу в посудині $2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

209. Налита у склянку вода масою 200 г повністю випарувалась за 25 діб. Скільки в середньому молекул води вилітало з її поверхні за 1 секунду?

210. У балоні об'ємом 3 л міститься азот масою 10 г. Визначити концентрацію молекул газу.

211. Балон об'ємом 10 л заповнений киснем при температурі 290 К. Коли частину газу використали, тиск у балоні понизився на 200 кПа. Визначити масу використаного азоту. Процес вважати ізотермічним.

212. Обчислити густину азоту, що знаходиться в балоні під тиском 2 МПа при температурі 400 К.

213. Кількість речовини (кисню) дорівнює 0,5 моль. Визначити внутрішню енергію цього об'єму кисню, а також середню кінетичну енергію молекули цього газу при температурі 300 К.

214. Визначити середню кінетичну енергію молекули двоатомного газу і концентрацію молекул при температурі 300 К і при тиску 0,5 Мпа.

215. Як зміниться внутрішня енергія 100 г: а) гелію та б) кисню при збільшенні температури на 50⁰С?

216. При збільшенні об'єму одноатомного газу втричі його тиск зменшився вдвічі. Як при цьому змінилася внутрішня енергія?

217. Молярна внутрішня енергія деякого двоатомного газу дорівнює 6 кДж. Визначити середню кінетичну енергію обертального та поступального руху однієї молекули цього газу. Газ вважати ідеальним.

218. Визначити середню квадратичну швидкість молекули газу, що знаходиться в посудині об'ємом 2 л під тиском 500 кПа. Маса газу 0,3 г.

219. Визначити середню квадратичну швидкість молекули водню при температурі: а) 27⁰С та б) 77⁰С.

220. Визначити внутрішню енергію гелію в аеростаті об'ємом 100 м³ при тиску 150 кПа.

221. При збільшенні об'єму двоатомного газу в п'ять разів його тиск зменшився втричі. Як при цьому змінилася внутрішня енергія?

222. Який тиск створює водяна пара, що займає об'єм 5 л, якщо її внутрішня енергія 500 Дж?

223. Знайти внутрішню енергію триатомного газу, що займає об'єм V , при температурі T , якщо концентрація його молекул n ?

224. Знайдіть внутрішню енергію 20 моль одно- та двоатомного газів при температурі: а) 27⁰С та 127⁰С.

225. Знайти співвідношення внутрішніх енергій однакових мас водяної пари та кисню при однаковій температурі.

226. Знайти зміну внутрішньої енергії одноатомного газу під час ізобарного охолодження, ізохорного охолодження та ізотермічного розширення?

227. Визначити температури газу, якщо тиск 100 кПа і концентрація молекул 10^{25}м^{-3} .

228. У балоні місткістю 50 л, міститься газ при температурі 27°C . При витіканні газу тиск зменшився на 10 кПа. Знайти кількість молекул, що вийшла з балона, якщо температура залишилася незмінною?

229. При якій температурі середня квадратична швидкість молекул кисню та азоту дорівнює 1000 м/с?

230. При якій температурі перебував газ у закритій посудині, якщо в результаті нагрівання його на 250 К тиск збільшився в два рази?

231. Знайдіть внутрішню енергію 5 моль одно- та двоатомного газів при температурі: а) 77°C та 127°C .

232. Знайти співвідношення внутрішніх енергій однакових мас водню, азоту та кисню при однаковій температурі.

233. Знайти зміну внутрішньої енергії двоатомного газу під час ізобарного охолодження, ізохорного охолодження та ізотермічного розширення?

234. При збільшенні об'єму триатомного газу в чотири рази його тиск зменшився вдвічі. Як при цьому змінилася внутрішня енергія?

235. Який тиск створює водяна пара, що займає об'єм 10 л, якщо його внутрішня енергія 2500 Дж?

236. Знайти внутрішню енергію триатомного газу, що займає об'єм V при температурі T , якщо концентрація його молекул n ?

237. Кількість речовини (азоту) дорівнює 5 моль. Визначити внутрішню енергію цього об'єму азоту, а також середню кінетичну енергію молекули цього газу при температурі 400 К.

238. Визначити сумарну кінетичну енергію поступального руху всіх молекул газу, що знаходиться в посудині об'ємом 3 л під тиском 540 кПа. Чому дорівнює внутрішня енергія цієї маси газу?

239. Кількість речовини (гелію) 1,5 моль, температура 120 К. Визначити сумарну кінетичну енергію поступального руху всіх молекул цього газу. Чому дорівнює внутрішня енергія цієї маси газу?

240. Молярна внутрішня енергія деякого двоатомного газу дорівнює 6 кДж. Визначити середню кінетичну енергію обертального та поступального руху однієї молекули цього газу. Газ вважати ідеальним.

241. При якій температурі середня кінетична енергія поступального руху молекул газу дорівнюватиме $6,2 \cdot 10^{-23}$ Дж?

242. Визначити середню квадратичну швидкість молекули водню при температурі 7°C .

243. При якій температурі середня квадратична швидкість молекул азоту дорівнює 900 м/с ?

244. Визначити середню кінетичну енергію однієї молекули водяної пари при температурі 400 К .

245. При якій температурі середня енергія молекул одноатомного газу буде вдвічі більшою, ніж при температурі: а) 127°C ? б) -23°C

246. У скільки разів середня квадратична швидкість молекул кисню менша, ніж середня квадратична швидкість молекул водню при одній температурі?

247. У скільки разів середня квадратична швидкість молекул повітря в літній день при температурі 27°C більша, ніж у зимовий день при температурі -27°C ?

248. Вирахувати число молекул в 1 кг газу, середня квадратична швидкість яких при температурі T дорівнює V_0 .

249. Визначити середню квадратичну швидкість молекули газу, що знаходиться в посудині об'ємом 2 л під тиском 500 кПа . Маса газу $0,3\text{ г}$.

250. Водень знаходиться при температурі 300 К . Знайти середню кінетичну енергію обертального руху однієї молекули та сумарну кінетичну енергію всіх молекул цього газу. Чому дорівнює внутрішня енергія цієї кількості газу? Кількість речовини водню -1 моль .

251. При якій температурі середня кінетична енергія поступального руху молекули: а) одноатомного, б) двоатомного, в) багатоатомного ідеального газу дорівнює $5 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$?

252. Визначити температури газу, якщо тиск 100 кПа і концентрація молекул 10^{25} м^{-3} .

253. Один балон об'ємом 10 л містить кисень під тиском $1,5\text{ МПа}$, інший балон об'ємом 22 л містить азот під тиском $0,6\text{ МПа}$. Коли балони з'єднали між собою, обидва гази змішалися, утворивши однорідну суміш (без зміни температури). Знайти парціальні тиски обох газів у суміші і повний тиск суміші.

254. У балоні об'ємом $22,4\text{ л}$ знаходиться водень за нормальних умов. Після того, як у балон було додатково введена деяка кількість гелію, тиск у балоні підвищився до $0,25\text{ МПа}$, а температура не змінилася. Визначити масу гелію, що введений у балон.

255. Яку роботу виконують 320 г кисню під час ізобарного нагрівання на 10 К ?

256. У скільки разів кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання газу при сталому тиску, більша, ніж робота, що її виконує

газ під час розширення? Питома теплоємність газу при сталому тиску c_p , молярна маса M .

257. Визначити показник адіабати ідеального газу, що при температурі 380 К та тиску 0.4 МПа займає об'єм 300 л та має теплоємність при постійному об'ємі 857 Дж /Кмоль. Чому дорівнює внутрішня енергія цього газу?

258. Об'єм кисню, що має масу 32 г, розширюється при постійній температурі 300 К втричі. Визначити роботу, виконану газом, та теплоту, отриману газом. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії газу?

259. У посудині об'ємом 6 л знаходиться за нормальних умов двоатомний газ. Визначити молярні (мольні) теплоємності при постійних об'ємі та тиску цього газу. Чому дорівнює внутрішня енергія цього газу?

260. При адіабатичному (адіабатному) розширенні 320 г кисню його температура зменшилася на 50 К. Знайти роботу, виконану газом. Зобразити залежність тиску від об'єму для цього процесу та показати на графіку, чому дорівнюватиме виконана робота.

261. При адіабатному (адіабатичному) стисненні тиск повітря було збільшено від 50 кПа до 0,5 МПа. Після цього при незмінному об'ємі температура повітря була знижена до початкової. Визначити тиск газу в кінці процесу.

262. Кисень масою 200 г займає об'єм 100 л і знаходиться під тиском 200 кПа. При нагріванні газ розширився при постійному тиску до об'єму 300 л, а після цього його тиск підвищився до 500 кПа при незмінному об'ємі. Знайти зміну внутрішньої енергії газу, виконану ним роботу та теплоту, що отримав газ. Побудувати графік цього процесу.

263. Водень масою 20 г при температурі 300 К розширився адіабатно, збільшивши об'єм втричі. Після цього при ізотермічному стисненні об'єм газу зменшився вдвічі. Визначити повну роботу, виконану газом та кінцеву температуру газу.

264. Кисень масою 320 г був ізобарно нагрітий від температури 200 К до температури 400 К. Визначити роботу, виконану газом, отриману ним кількість теплоти та зміну внутрішньої енергії газу.

265. Водень масою 200 г, що мав температуру 300 К, був адіабатно стиснутий. При цьому була виконана робота 25 кДж. Визначити кінцеву температуру газу.

266. Азот масою 280 г ізотермічно розширився при тиску 10^5 Па. Початкова температура дорівнює 300 К. Визначити роботу, що

виконує при цьому розширенні газ, та об'єм, до якого розширився газ, якщо на це розширення витрачено 5 кДж тепла.

267. Нагрівач ідеальної теплової машини, що працює за циклом Карно, має температуру 227°C . Визначити температуру холодильника, якщо 75% тепла, отриманого від нагрівача, газ віддає холодильнику.

268. Знайти роботу ізотермічного стиснення газу, що працює за циклом Карно, коефіцієнт корисної дії якого дорівнює 0,5, якщо робота ізотермічного розширення дорівнює 10 кДж.

269. У скільки разів збільшиться коефіцієнт корисної дії циклу Карно при підвищенні температури нагрівача від 400 К до 600 К? Температура холодильника 300 К.

270. Ідеальна тепла машина працює за циклом Карно. Температура нагрівача дорівнює 500 К, температура холодильника 250 К. Визначити коефіцієнт корисної дії циклу, а також роботу газу при ізотермічному розширенні, якщо при ізотермічному стисненні виконана робота 10 кДж.

271. Газ, що здійснює цикл Карно, одержує від нагрівача кількість теплоти 30 кДж. Визначити роботу газу в циклі, якщо температура нагрівача втричі вища за температуру холодильника.

272. Температура нагрівача ідеальної теплової машини 127°C , а холодильника 23°C . Кількість теплоти, що отримує машина від нагрівача дорівнює 50 Дж за кожну секунду. Знайти ККД теплової машини, кількість теплоти, що забирає холодильник за 1 с, та потужність машини.

273. В ідеальній тепловій машині за рахунок одного кілоджоуля енергії, що її дає нагрівач, виконується робота 400 Дж. Визначити ККД теплової машини і температуру нагрівача, якщо температура холодильника 273 К.

274. Визначити масу води, що піднялася по капілярній трубці діаметром: а) 0,25 мм та б) 0,5 мм.

275. Яка енергія виділиться (і чому?) при злитті двох крапель ртуті діаметром 0,5 мм і 1,0 мм в одну краплю? Коефіцієнт поверхневого натягу ртуті 500 мН/м.

276. Ртутний барометр має діаметр трубки 2,5 мм. Яку поправку в покази барометра треба внести, якщо врахувати капілярне опускання ртуті?

277. У капілярній трубці, радіус якої 0,4 мм, рідина піднялася на висоту 15 мм. Визначити густину цієї рідини, якщо її коефіцієнт поверхневого натягу становить 20 мН / м.

278. На скільки тиск повітря всередині мильної бульбашки більше нормального атмосферного тиску, якщо її діаметр 5 мм? Коефіцієнт поверхневого натягу мильної води 40 мН/м.

279. У двох капілярних трубках різного діаметра, що занурені у воду, встановилася різниця рівнів 20 мм. Коли ці самі трубки занурили в спирт, то різниця рівнів становила 10 мм. Знаючи коефіцієнт поверхневого натягу води, визначити коефіцієнт поверхневого натягу спирту.

280. Яку роботу треба виконати при надуванні мильної бульбашки, щоб збільшити її об'єм від 0,4 см³ до 0,8 см³? Вважати процес ізотермічним. Коефіцієнт поверхневого натягу мильної води 40 мН/м.

281. Пояснить з обґрунтуванням, зміну висоти капілярного підняття води в ґрунті при підвищенні температури.

282. Знайти додатковий тиск всередині мильної бульбашки діаметром 5 см. Яку роботу треба виконати щоб видути цю бульбашку? Коефіцієнт поверхневого натягу мильної води 40 мН/м.

283. На яку висоту піднімається: а) чиста вода; б) мильна вода між паралельними пластинками, розташованими на відстані 0,15 мм одна від одної?

284. Гліцерин піднявся по капілярній трубці з діаметром каналу 1 мм на висоту 20 мм. Визначити поверхневий натяг гліцерину. Вважати змочування повним. Густина гліцерину дорівнює $1,26 \cdot 10^3$ кг/м³.

2.4. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 2 „МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА”

РОБОТА 2.1

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Мета роботи: 1) вивчити механізм явища перенесення – внутрішнє тертя; 2) визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини за швидкістю рівномірного падіння кульки.

Прилади та обладнання: скляний циліндр, наповнений рідиною; металеві кульки, мікромметр, секундомір.

При протіканні шарів рідини (або газу) з різними швидкостями між ними виникає тертя. Завдяки тепловому руху молекули переходять з одного шару в інший і при цьому кожна молекула переносить разом із собою імпульс свого направлено руху ($m\vec{v}$). У результаті з двох суміжних шарів більш швидкий шар збагачується "повільними" молекулами, а більш повільний – "швидкими". Через це з боку шару,

що рухається швидше на шар, що рухається повільніше, діє прискорююча сила, і навпаки, з боку шару, що рухається повільніше, на більш швидкий шар діє гальмуюча сила. Ці сили називають силами внутрішнього тертя, або силами в'язкості. Вони направлені по дотичній до поверхні шарів (рис 1).

Згідно із законом Ньютона сила внутрішнього тертя F , що діє в площині дотикання двох паралельних суміжних шарів рідини (або газу), пропорційна площі їх дотикання S і градієнту швидкості $\frac{\Delta v}{\Delta z}$

$$F = \mp \eta \frac{\Delta v}{\Delta z} S, \quad (1)$$

де $\Delta v = v_2 - v_1$; v_1 і v_2 – швидкості шарів; Δz – відстань між шарами; знаки \mp у формулі (1) відповідають гальмуючій і прискорюючій силам. Коефіцієнт пропорційності η називається **коефіцієнтом** внутрішнього тертя, або **коефіцієнтом в'язкості**. Він чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє на одиницю площі дотикання шарів при градієнту швидкості, що дорівнює одиниці.

Завдяки в'язкості тіло, що рухається в рідині, захоплює прилегли до нього. шари і тому зазнає опору з боку рідини. Згідно із законом Стокса при невеликій швидкості руху тіла сила опору F пропорційна коефіцієнту в'язкості η , швидкості тіла v та його лінійним розмірам l : $F \sim \eta v l$.

Для кульки з радіусом r

$$F = 6\pi\eta v r. \quad (2)$$

На кульку масою m і радіусом r , що рухається в рідині з швидкістю v діють три сили: сила опору F , сила тяжіння P та Архімедова сила F_A . Останні дві сили визначаються за формулами:

$$P = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_1; \quad (3)$$

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_2, \quad (4)$$

де g – прискорення вільного падіння; ρ_1 – густина кульки; ρ_2 – густина рідини.

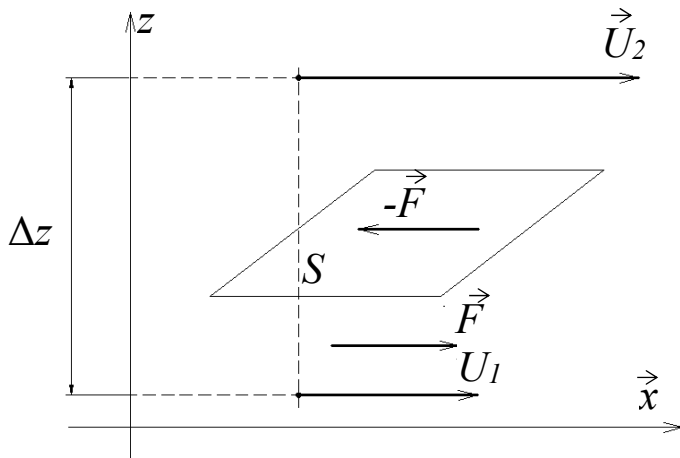


Рис.1

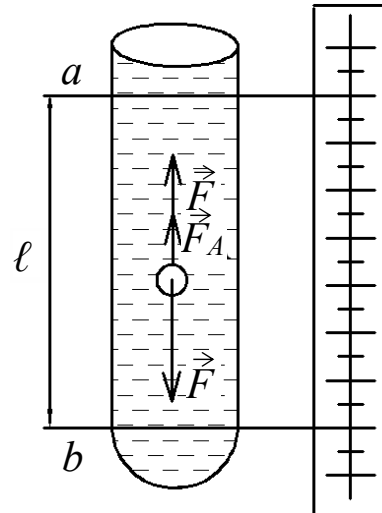


Рис.2

При вертикальному падінні кульки в рідині сила опору, як і архімедова сила, направлена вгору (рис.2). Оскільки P і F_A – сталі, а сила F зростає зі збільшенням швидкості, то настане такий момент, коли буде досягнуто рівності $P = F_A + F$. Починаючи з цього моменту, рух кульки буде рівномірним. Підставляючи в останню рівність вирази (2) – (4), маємо:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g \rho_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 g \rho_2 + 6 \pi \eta r v .$$

Звідси знаходимо:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho_1 - \rho_2}{v} g r^2 ,$$

або

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{g d^2 t}{l} (\rho_1 - \rho_2). \quad (5)$$

Де $d = 2r$, а $l = vt$ – шлях, який пройшла кулька за час t .

Порядок виконання роботи

1. Вимірюють відстань l між мітками "a" і "b" циліндричної посудини, що наповнена рідиною (гліцерин, рицинова олія).

2. Мікрометром вимірюють діаметр d трьох кульок (приблизно однакових).

3. Кидають кульку в рідину так, щоб вона рухалася вздовж центральної частини циліндра; вимірюють час падіння t між мітками "a" і "b".

4. Експериментальні дані d , l , t і табличні ρ_1 і ρ_2 заносять у таблицю.

5. Розраховують значення η за формулою (5) для кожного вимірювання, а потім знаходять $\langle \eta \rangle$.

6. Визначають відносні похибки і довірчі границі для одного з вимірювань за формулами:

$$\varepsilon_{\eta} = \varepsilon_t + \varepsilon_l + 2\varepsilon_d + \varepsilon_g + \varepsilon_{\rho_1 - \rho_2};$$

$$\varepsilon_{\rho_1 - \rho_2} = \frac{\Delta\rho_1 + \Delta\rho_2}{\rho_1 - \rho_2}; \Delta_{\eta} = \langle \eta \rangle \varepsilon_{\eta}.$$

№ п/п	Табличні дані			Результати прямих вимірювань			Результати непрямих вимірювань
	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	g , м/с ²	l , м	d , м	t , с	η , Па с

Питання та вправи для самоконтролю

1. Поясніть механізм виникнення сил внутрішнього тертя.
2. Сформулюйте і запишіть закон внутрішнього тертя (закон Ньютона), дайте ілюструючий рисунок.
3. Що називається градієнтом швидкості? Який його зміст?
4. Що називається коефіцієнтом внутрішнього тертя? В яких одиницях він вимірюється? Який його фізичний зміст?
5. За яких умов кулька рухається в рідині рівномірно?
6. Сформулюйте і запишіть закон Стокса.

РОБОТА 2.2

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ГАЗУ МЕТОДОМ АДІАБАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ (МЕТОД КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА)

Мета роботи: визначити коефіцієнт Пуассона повітря і порівняти результат експерименту з висновками молекулярно-кінетичної теорії газів.

Прилади та обладнання: закритий скляний балон з краном, манометр, насос.

Молярною теплоємністю C будь-якої речовини називають фізичну величину, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку треба надати одному молу цієї речовини для підвищення його температури на один кельвін.

Теплоємність газу суттєво залежить від умов, за яких надають теплоту. Так, якщо нагрівається газ при сталому об'ємі, то кількість теплоти витрачається на збільшення його внутрішньої енергії. Якщо ж газ нагрівати при сталому тиску, то він потребує ще додаткової кількості теплоти для виконання роботи при розширенні. Тому молярна теплоємність C_P при сталому тиску більше молярної теплоємності при сталому об'ємі C_V . Зв'язок між ними показує співвідношення Майєра:

$$C_P = C_V + R ,$$

де R – універсальна газова стала.

Безпосередні виміри C_P і C_V здійснити важко, оскільки теплоємність газу є малою часткою теплоємності посудини, що містить газ.

Легше виміряти відношення величин $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$, яке називають коефіцієнтом Пуассона. Виходячи з уявлень класичної молекулярно-кінетичної теорії, можна показати, що для ідеального газу

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i + 2}{i} ,$$

де i – число ступенів свободи молекули.

Коефіцієнт Пуассона γ входить до рівняння Пуассона:

$$PV^\gamma = const ,$$

яке описує зв'язок між тиском P і об'ємом V ідеального газу при адиабатичному процесі.

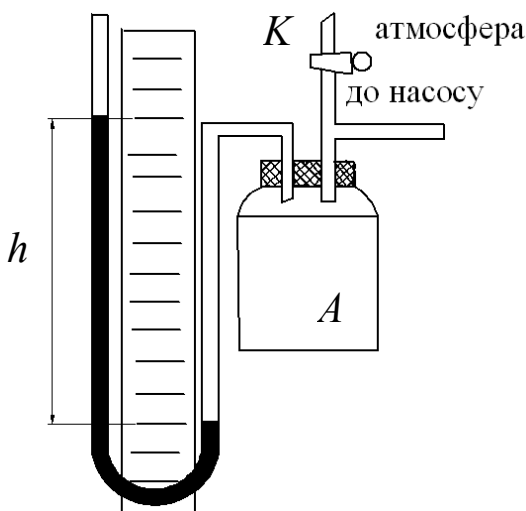
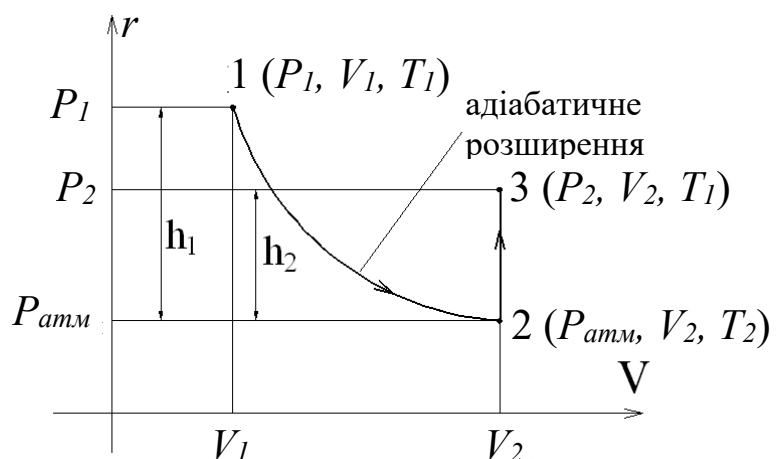


Рис.1



Метод Клемана-Дезорма для визначення відношення теплоємностей газів $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ базується на використанні методу адіабатичного

розширення. Адіабатичним називається процес, який відбувається без теплообміну системи з навколишнім середовищем. Адіабатичний процес можна здійснити або за допомогою теплової ізоляції системи, або за умову короткочасності процесу (за малий проміжок часу не встигає відбутися тепловий обмін з навколишнім середовищем).

У скляний балон A (рис.1) за допомогою насоса накачують повітря. При швидкому накачуванні температура останнього дещо підвищується, а тому потрібно зачекати 2-3 хв для встановлення в балоні тієї ж самої температури, що і в навколишньому середовищі. Цей стан газу будемо вважати початковим і характеризувати параметрами V_1, T_1, P_1 .

На рис.2 даний стан зображено точкою 1. При цьому

$$P_1 = P_{атм} + h_1,$$

де $P_{атм}$ – атмосферний тиск, h_1 – надлишок тиску над атмосферним. Далі відкривають кран K балона на дуже короткий проміжок часу і перекривають його у той момент, коли тиск всередині балона дорівнюватиме атмосферному. При цьому газ перейде в новий стан з параметрами $V_2, T_2, P_{атм}$ (на рис.2 даний стан зображено точкою 2).

Оскільки розширення повітря відбувається швидко, то можна вважати, що процес переходу газу із стану 1 у стан 2 адіабатичний. Тому для нього можна застосувати рівняння Пуассона.

$$P_1 V_1^\gamma = P_{атм} V_2^\gamma ; (P_{атм} + h_1) V_1^\gamma = P_{атм} V_2^\gamma . \quad (1)$$

Підкреслимо, що $T_2 < T_1$ оскільки при адіабатичному розширенні газ охолоджується. Через 2-3 хв. газ нагріється до температури навколишнього повітря T_1 . При нагріванні об'єм V_2 залишається без змін, а тиск підвищується до значення

$$P_2 = P_{атм} + h_2,$$

де h_2 – надлишок тиску над атмосферним після адіабатичного розширення та ізохоричного нагрівання до температури T_1 .

Параметри нового стану 3 позначимо через V_2, P_2, T_1 , (на рис.2–точка 3). Істотно, що в станах 1 і 3 газ має однакову температуру, отже, стани 1 і 3 знаходяться на одній ізотермі. Тому до них можна застосувати закон Бойля - Маріотта:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 ; (P_{атм} + h_1) V_1 = (P_{атм} + h_2) V_2 . \quad (2)$$

Після ряду перетворень з рівнянь (1) і (2) отримаємо:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} .$$

Порядок виконання роботи

1. Накачують у балон A повітря, не виходячи за поділки шкали манометра.

2. Зачекавши 2-3 хв, доки температура в балоні не стане дорівнювати температурі навколишнього повітря, відраховують покази манометра h_1 .

3. Відкривши на короткий час кран K , вирівнюють тиск всередині балона з атмосферним. Коли стовпчики рідини в манометрі зрівняються, кран закривають.

4. Чекають 2-3 хв., відраховують покази манометра h_2 .

5. Для кожного досліду розраховують γ за формулою (3). Повторюють дослід не менше 5 разів.

6. Результати вимірювань заносять у таблицю.

7. Визначають відносну похибку результатів вимірювань:

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_{h_1} + \varepsilon_{h_1 - h_2}, \quad \varepsilon_{h_1 - h_2} = \frac{\Delta_{h_1} + \Delta_{h_2}}{h_1 - h_2},$$

де $\Delta_{h_1} = \Delta_{h_2} = 2C$, C - ціна поділки шкали манометра.

8. Розраховують довірчу границю похибок результатів вимірювань:

$$\Delta_\gamma = \langle \gamma \rangle \varepsilon_\gamma .$$

9. Порівнюють одержаний результат з теоретичним значенням γ повітря.

№ п/п	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань
	h_1	h_2	γ

Питання і вправи для самоконтролю

1. Запишіть і сформулюйте основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів.

2. Дайте визначення числа ступенів свобода тіла (системи, молекули) і виразіть молярні теплоємності ідеального газу через кількість ступенів свободи молекули.

3. Дайте визначення і отримайте вираз для внутрішньої енергії ідеального газу.

4. Запишіть і сформулюйте перший закон термодинаміки, застосуйте його до різних ізопроцесів у газах.

5. Запишіть співвідношення Майера і поясніть фізичний зміст універсальної газової сталої.

6. Який процес називається адіабатичним? Як і чому змінюється температура газу при адіабатичній зміні його об'єму?

7. Запишіть рівняння Пуассона і поясніть зміст коефіцієнта Пуассона. Зобразіть графік адіабати.

РОБОТА 2.3

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ МЕТОДОМ ВІДРИВУ КРАПЕЛЬ

Мета роботи: 1) вивчити явище поверхневого натягу; 2) визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Прилади та обладнання: скляна бюретка з краном, склянки з рідинами.

Поверхневі властивості рідини обумовлені особливостями взаємодії молекул у поверхневому шарі. Товщина цього шару дорівнює декільком молекулярним відстаням, тобто приблизно 10^{-9} м.

Поки молекула знаходиться у глибині рідини, вона рівномірно оточена іншими молекулами, які в середньому притягують її у всі сторони з однаковими силами. Рівнодійна цих сил дорівнює нулю (рис.1, молекула 1). Рівнодійна ж сил притягання, які діють на молекули поверхневого шару, не дорівнює нулю (оскільки над поверхнею рідини знаходиться газ, густина якого в багато разів менша, ніж густина рідини) і направлена всередину рідини (див. рис.1, молекула 2). Перехід молекули з глибини рідини в поверхневий шар супроводжується роботою проти сил молекулярного притягання. Тому молекули поверхневого шару мають додаткову потенціальну енергію порівняно з молекулами в решті об'єму. Намагаючись зменшити енергію, поверхня скорочується. Поверхневий шар рідини знаходиться в напруженому стані, схожому на розтягнуту плівку, яка прагне скоротитися. У поверхневому шарі діють сили поверхневого натягу F , які направлені по дотичній до поверхні перпендикулярно до будь-якого елемента лінії–на поверхні рідини і які пропорційні довжині контуру l :

$$F = \sigma l, \quad (1)$$

де σ - коефіцієнт поверхневого натягу.

З формули 1 випливає, що σ чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, яка припадає на одиницю довжини лінії на поверхні рідини і вимірюється в H/m . У даній роботі використовується один із методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини – метод відриву крапель. Із скляної бюретки капає рідина. Її утримують сили поверхневого натягу.

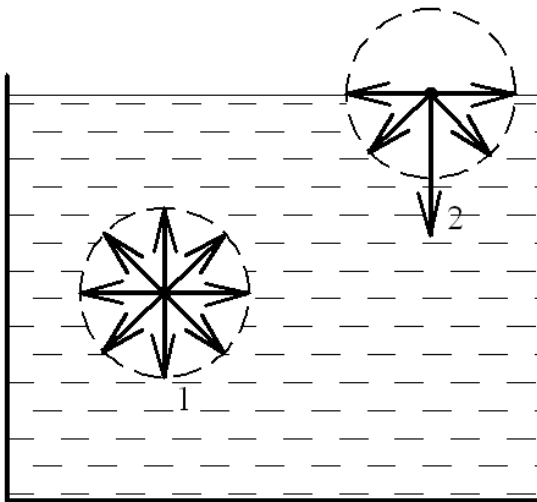


Рис. 1

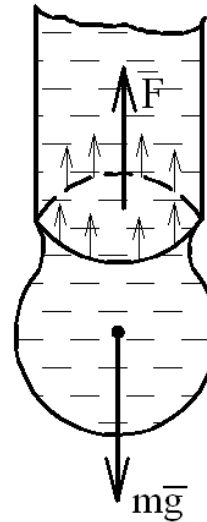


Рис. 2

Краплина відривається в той момент, коли сила тяжіння краплі $m\vec{g}$ буде дорівнювати рівнодійній сил поверхневого натягу \vec{F} , що діють уздовж кола шийки краплі (див. рис.2):

$$F = mg. \quad (2)$$

Сила поверхневого натягу визначається в виразу:

$$F = \sigma \pi d, \quad (3)$$

де $l = \pi d$ – периметр шийки краплини в момент її відриву. Отже, в момент відриву краплини

$$mg = \sigma \pi d. \quad (4)$$

Звідси знаходимо σ :

$$\sigma = \frac{mg}{\pi d}. \quad (5)$$

Коефіцієнт σ_2 досліджуваної рідини визначаємо, порівнюючи його з відомим σ_1 другої рідини.

Якщо визначений об'єм рідини V містить n_1 крапель однієї рідини (еталонної) і n_2 крапель другої (досліджуваної). При цьому сили тяжіння однієї краплі відповідно дорівнюють:

$$m_1 g = \frac{\rho_1 V g}{n_1} \quad \text{і} \quad m_2 g = \frac{\rho_2 V g}{n_2}, \quad (6)$$

де ρ_1, ρ_2 – густини відповідних рідин.

Тому

$$\sigma_1 = \frac{m_1 g}{\pi d} = \frac{\rho_1 V g}{\pi d n_1} \quad \text{і} \quad \sigma_2 = \frac{m_2 g}{\pi d} = \frac{\rho_2 V g}{\pi d n_2}. \quad (7)$$

З формули 7 маємо:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{n_1 \rho_2}{n_2 \rho_1}. \quad (8)$$

Отже, якщо відомий коефіцієнт поверхневого натягу якоїсь конкретної рідини, то цим методом можна визначити коефіцієнт поверхневого натягу будь-якої іншої рідини.

Порядок виконання роботи

1. Наповнюють бюретку дистильованою водою.
2. Обережно відкривають кран, щоб краплі капали рівномірно. Відраховують n_1 – кількість крапель з об'єму 2 мл. Дослід повторюють декілька разів.
3. Те ж саме роблять з іншою рідиною. Відраховують n_2 – кількість крапель з такого ж самого об'єму (2 мл).
4. За таблицями знаходять ρ_1, ρ_2, σ_1 .
5. За робочою формулою (8), використовуючи середні значення (n_1), (n_2) розраховують (σ_2). Дані заносять у таблицю.
6. Визначають відносну похибку ε_{σ_2} і довірчу границю сумарних похибок Δ_{σ_2} за формулами

$$\varepsilon_{\sigma_2} = \varepsilon_{\sigma_1} + \varepsilon_{n_1} + \varepsilon_{n_2} + \varepsilon_{\rho_1} + \varepsilon_{\rho_2}, \quad \Delta_{\sigma_2} = \langle \sigma_2 \rangle \varepsilon_{\sigma_2}.$$

№ п/п	Табличні величини			Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань
	$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$	$\sigma_1, \text{Н/м}$	n_1	n_2	$\sigma_2, \text{Н/м}$

Питання і вправи для самоконтролю

1. Вкажіть причини молекулярного тиску в рідинах.
2. Чим обумовлений поверхневий натяг?
3. Дайте визначення коефіцієнта поверхневого натягу. В яких одиницях він вимірюється?

4. Опишіть явища на границі рідини з твердим тілом. Що називається крайовим кутом змочування?
5. Запишіть формулу Лапласа і поясніть її.
6. Що таке капілярні явища? Наведіть доведення формули для висоти підняття рідини у капілярі.
7. Як використовують капілярні явища в процесах обробітку ґрунту?

РОБОТА 2.4

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ЕНТРОПІЇ ПРИ НАГРІВАННІ І ПЛАВЛЕННІ ОЛОВА

Мета роботи: визначити приріст ентропії олова при його нагріванні і плавленні.

Прилади та обладнання: тигель з оловом, електроплитка, термомопа, градуйований графік термомопа, мікровольтметр, секундомір, склянка з водою.

За визначенням ентропія S – це функція стану системи, диференціал якої дорівнює елементарній приведеній теплоті:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (1)$$

де δQ – означає нескінченно малу кількість теплоти, яку отримала система при оборотному теплообміні з резервуаром, що має температуру T . Термодинамічна температура T , яка вимірюється в кельвінах, пов'язана з температурою t за шкалою Цельсія таким співвідношенням:

$$T = t + 273,15. \quad (2)$$

Для практичних цілей потрібно знати не саму величину ентропії S , а лише її зміну ΔS . Якщо ентропію в стані 1 позначити S_1 , а в стані 2 – S_2 , то зміна ентропії при оборотному переході системи зі стану 1 до стану 2 дорівнює:

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (3)$$

При зміні температури від T до $T + dT$ однорідне тіло одержує елементарну кількість теплоти

$$\delta Q = cm dT, \quad (4)$$

де c – питома теплоємність, m – маса тіла.

При нагріванні тіла від температури T_1 до T_2 згідно з (3) і (4) зміна ентропії становить:

$$\Delta S = cm \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = cm \ln \frac{T_2}{T_1} . \quad (5)$$

У випадку ізотермічного ($T = const$) переходу із стану 1 до стану 2 співвідношення (3) має вигляд:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} , \quad (6)$$

де δQ – кількість теплоти, одержаної тілом у процесі $1 \rightarrow 2$.

У даній лабораторній роботі визначається зміна ентропії олова при його нагріванні і плавленні. Якщо спочатку температура олова дорівнює кімнатній, то при підведенні теплоти олово спочатку нагрівається до температури плавлення, а потім плавиться при постійній температурі.

Приріст ентропії ΔS при нагріванні олова від кімнатної температури T_k до температури плавлення $T_{пл}$ (перший етап процесу нагрівання) одержують, покладаючи у виразі (5) $T_1 = T_k$ і $T_2 = T_{пл}$;

$$\Delta S_1 = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_k} . \quad (7)$$

Приріст ентропії ΔS_2 у результаті плавлення олова при температурі $T_{пл}$ (другий етап процесу) визначають з виразу (6), покладаючи $T_2 = T_{пл}$ і $Q = \lambda m$, де λ – питома теплота плавлення:

$$\Delta S_2 = \frac{\lambda m}{T_{пл}} . \quad (8)$$

Повна зміна ентропії дорівнює:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_k} + \frac{\lambda m}{T_{пл}} . \quad (9)$$

Для обчислення ΔS потрібно знати параметри, що входять в (9), зокрема, необхідно виміряти температуру плавлення олова.

Схему установки зображено на рис.1. Тигель (1) з оловом нагрівається на електроплитці (2). Для вимірювання температури олова використовують термопару. Один із спаїв (3) термопари занурений у тигель з оловом, другий (4) – у склянку з водою. За наявності різниці

температур спаїв у колі термопари виникає термоелектрорушійна сила (т.е.р.с.), яку вимірюють мікровольтметром V . Залежність т.е.р.с. від різниці температур спаїв близька до лінійної, її зображено на градуйованому графіку термопари. Графік додається до установки і використовується для визначення температури плавлення олова.

Порядок виконання роботи

1. Заносять у табл. 1 значення табличних величин для олова:

$$c = 230 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} ; \quad \lambda = 5,86 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} ;$$

маса олова в досліді $m = 0,100$ кг.

2. За допомогою термометра визначають кімнатну температуру t_k і розраховують температуру T_k за формулою (2).

3. Вмикають електроплитку і стежать за показами вольтметра V . Починаючи з напруги $V \approx 4 \text{ мВ}$, записують в табл. 2 у графу "Нагрівання" покази мікровольтметра через кожну хвилину.

Спочатку значення V збільшуватимуться—підвищується температура твердого олова. Потім настане момент, коли покази вольтметра практично не змінюватимуться ($V = \text{const} = V_{nl}$) – процес плавлення олова відбувається при сталій температурі $T_{nl} = \text{const}$. Після того, як все олово розплавиться, починається швидке зростання значень V (це нагрівається розплав). Вимірювання припиняють, записавши декілька даних для третьої ділянки кривої. Нагрівання в цілому продовжується приблизно 20 хв.

4. Вимикають електроплитку і, дочекавшись, коли покази вольтметра почнуть зменшуватись, записують їх у табл. 2 у графу "Охолодження" з інтервалом в одну хвилину. Час відраховують від умовного нуля.

5. За даними табл. 2 будують графік залежності показів вольтметра V від часу τ для нагрівання та охолодження.

6. По графіках визначають середнє значення V_{nl} , яке відповідає ділянкам кривих, паралельних осі абсцис τ .

7. Використовуючи градуйований графік, по значенню V_{nl} знаходять температуру $\Delta t = t_{nl} - t_e$, де t_{nl} - температура гарячого спаю, що дорівнює температурі плавлення олова; t_e - температура холодного спаю, що дорівнює температурі води у склянці. t_e вимірюють термометром, а t_{nl} - розраховують за формулою $t_{nl} = t_e + \Delta t$. T_{nl} обчислюють за формулою (2). Усі дані заносять до табл. 1.

8. За формулою (9) розраховують ΔS .

1.

№ п/п	Табличні величини			Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань					
	C , Дж/кгК	λ , Дж/кг	m , кг	t_k , С ⁰	t_{θ} , С ⁰	T_k , К	V_{nl} , мВ	Δt , С ⁰	t_{nl} , С ⁰	T_{nl} , К	ΔS , Дж/К

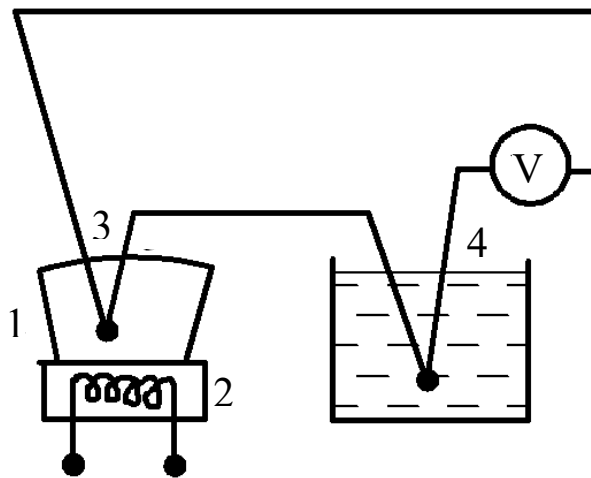


Рис.1

2.

τ , хв	Нагрівання	Охолодження
	V , мВ	V , мВ
0	4	
1	...	
2	...	
...	...	

Питання і вправи для самоконтролю

1. Які процеси називають оборотними, необоротними? Наведіть приклади.
2. Що таке приведена теплота ?
3. Дайте визначення ентропії, укажіть одиницю її вимірювання.
4. Який фізичний зміст ентропії?
5. Сформулюйте принцип зростання ентропії.
6. Наведіть різні формулювання другого закону термодинаміки.
7. Дайте виведення робочої формули.

РОБОТА 2.5

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Мета роботи: визначити абсолютну і відносну вологість повітря психрометром Августа.

Прилади та обладнання: психрометр Августа, таблиця тиску насиченої водяної пари при різних температурах.

Атмосферне повітря – це суміш різних газів і водяної пари. Кількість цих парів може змінюватись як за абсолютною величиною, так і за ступенем насиченості, що характеризується абсолютною та відотною вологістю.

Абсолютна вологість повітря – це маса водяної пари, що міститься в 1 м^3 повітря при даних умовах. У системі СІ абсолютна вологість вимірюється в $\text{кг}/\text{м}^3$. Абсолютну вологість вимірюють ще парціальним тиском водяної пари P (пружність пари). Тиск, який чинила б водяна пара, якби всіх інших газів не було, називають парціальним тиском водяної пари, його виражають в одиницях тиску – паскалях - або в міліметрах ртутного стовпчика.

Відотною вологістю повітря r називають виражене у відсотках відношення парціального тиску P водяної пари, що міститься в повітрі при даній температурі (абсолютна вологість), до тиску P насиченої водяної пари при тій самій температурі:

$$r = \frac{P}{P} 100\% . \quad (1)$$

Вологість повітря вимірюють спеціальними приладами. В даній роботі для визначення вологості використовується психрометр Августа. Цей прилад складається з двох однакових термометрів. Резервуар одного з них сухий і термометр показує температуру повітря. Резервуар другого обгорнутий смужкою тканини (батист), кінець якої знаходиться у воді. Вода випаровується, а термометр охолоджується. Чим менша відносна вологість, тим інтенсивніше випаровується вода і тим нижчу температуру показує термометр. Відліки по двох термометрах дадуть різницю температур, яка і буде характеризувати вологість повітря.

Метод психрометра

Розглянемо сталий режим випаровування, коли температура "мокрого" термометра теж стала. Приплив теплоти Q_1 ззовні дорівнює

витраті теплоти Q_2 . Згідно із законом, встановленим Ньютоном, приплив теплоти за одиницю часу визначається виразом:

$$Q_1 = \alpha (t - t_1) S_1,$$

де t – температура сухого термометра, t_1 – температура "вологого" термометра; S_1 – площа поверхні балона "вологого" термометра; α – коефіцієнт пропорційності. Маса m води, що випаровується за одиницю часу, визначається за формулою:

$$m = \frac{c S_2 (P_1 - P)}{P_a},$$

де S_2 – площа випаровуючої поверхні; P_a – атмосферний тиск; P_1 – парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі t_1 ; P – парціальний тиск водяної пари, що міститься у повітрі; c – коефіцієнт пропорційності, який залежить від швидкості потоку повітря. Кількість теплоти Q_2 можна записати у вигляді:

$$Q_2 = \frac{c L S_2 (P_1 - P)}{P_a},$$

де L – питома теплота випаровування води.

При $Q_1 = Q_2$ і $S_1 = S_2$ маємо

$$\frac{c L (P_1 - P)}{P_a} = \alpha (t - t_1).$$

Звідси знаходимо абсолютну вологість

$$P = P_1 - A(t - t_1) P_a \quad (2)$$

де $A = \alpha / cL$ – постійна приладу.

Порядок виконання роботи

1. Змочують батист, яким обгорнута кулька термометра, занурюючи кінець його в чашку з водою.

2. Проводять відлік температури по "сухому" термометру t і "вологому" t_1 .

3. По ртутному стовпчику барометра визначають атмосферний тиск H_a , виражаючи його в мм.рт.ст.

4. Користуючись таблицею тиску насиченої водяної пари, знаходять тиск P_1 , що відповідає температурі вологого термометра t_1 , і за формулою (2) обчислюють абсолютну вологість p , приймаючи $A = 7,9 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

5. Користуючись цією ж самою таблицею, знаходять тиск насиченої пари, що відповідає температурі "сухого" термометра t .
6. За формулою (1) обчислюють відносну вологість.
7. Результати вимірювань заносять у таблицю
8. Визначають довірчі границі систематичних похибок прямих вимірювань і табличних даних. Обчислюють їх відносні похибки.
9. Визначають довірчі границі систематичних похибок непрямих вимірювань за формулами:

$$\Delta P = \Delta P_1 + A \cdot P_a (\Delta t + \Delta t_i) + A (t - t_1) \cdot \Delta P_a;$$

$$\Delta r = r \cdot \varepsilon_r$$

10. Розраховують відносні похибки результатів вимірювань величин

№ п/п	Табличні величини		Результати прямих вимірювань			Результати непрямих вимірювань		
	, мм. рт. ст.	, мм. рт. ст.	, С ⁰	, С ⁰	, мм. рт. ст.	, К	, мм. рт. ст.	, %

Питання та вправи для самоконтролю

1. Що називається абсолютною і відотною вологістю?
2. Що таке точка роси? Які явища мають місце при температурах нижче точки роси?
3. Яка пара називається насиченою, ненасиченою?
4. Виведіть формулу для абсолютної вологості.
5. Опишіть властивості реального газу. Запишіть рівняння Ван-дер-Ваальса. Зобразіть теоретичні та експериментальні ізотерми реального газу.

РОБОТА 2.6

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Мета роботи: вивчити механізм явища перенесення-теплопровідність; визначити коефіцієнт теплопровідності піску.

Прилади та обладнання: прилад для визначення коефіцієнта теплопровідності, електроплитка, термометр, калориметр, пароутворювач.

При охолодженні тіло втрачає частину своєї внутрішньої енергії, яка передається оточуючим більш холодним тілам. Цей процес

теплопередачі може відбуватися трьома способами: конвекцією, випромінюванням і теплопровідністю.

Теплопровідність – спосіб передачі внутрішньої енергії від однієї частини тіла до іншої без переміщення маси речовини за рахунок теплового руху молекул. Явище теплопровідності описується експериментальним законом Фур'є: кількість теплоти, перенесеної шляхом теплопровідності через площадку, перпендикулярну напрямку поширення теплоти, пропорційна величині цієї площадки, часу перенесення і градієнтом температури (градієнт температури дорівнює зміні температури на одиниці відстані в напрямку найбільш різкого зростання температури).

Прилад для визначення коефіцієнта теплопровідності складається з металевого кожуха М (рис.1), в якому розміщено картонний циліндр Ц. Між ними знаходиться шар теплової ізоляції І. У нижній частині кожуха розміщено парову коробку К. На верхній частині коробки знаходиться шар піску, на якому встановлено калориметр з водою. За допомогою гумової трубки парова коробка з'єднується з пароутворювачем П.

Кількість теплоти Q , переданої через пісок, згідно із законом Фур'є визначається рівнянням:

$$Q = k \frac{T_2 - T_1}{l} \cdot S \cdot \tau, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності; S – площа дна калориметра; τ – час передачі теплоти; T_1 – середня (за час передачі) температура води в калориметрі; T_2 – температура пари, l – товщина шару піску; величина $\frac{(T_2 - T_1)}{l}$ при цьому є градієнтом температури. З іншого боку,

нехтуючи втратами енергії в оточуюче середовище, кількість теплоти Q , переданої калориметру з водою і мішалкою, можна визначити, знаючи масу води m_1 , масу калориметра з мішалкою m_2 та їх питомі теплоємності C_1 і C_2 ($C_1 = 4190$ Дж/кг.К, $C_2 = 88$ Дж/кг.К):

$$Q = (C_1 m_1 + C_2 m_2) (t_2 - t_1), \quad (2)$$

тут t_1 і t_2 – відповідно початкова і кінцева температура води в

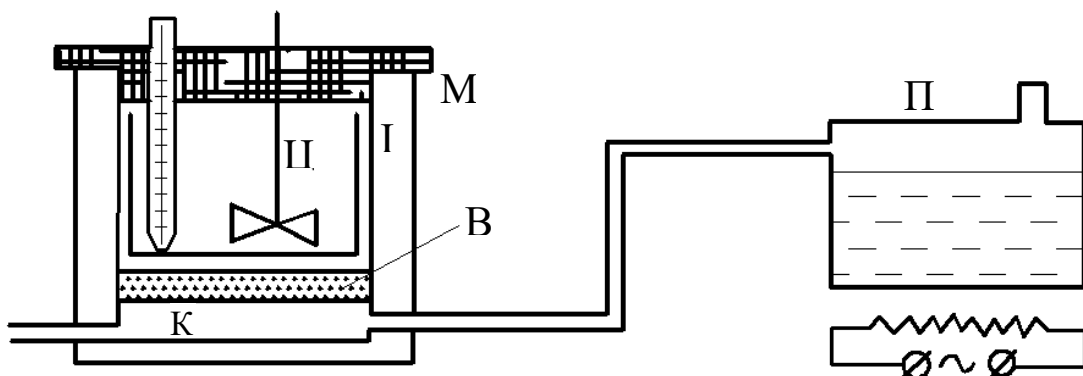


Рис.1

калориметрі. Прирівнюючи праві частини рівнянь (1) і (2), знаходимо:

$$k = \frac{(C_1 m_1 + C_2 m_2)(t_2 - t_1)\ell}{(T_2 - T_1)}. \quad (3)$$

Згідно з рівнянням (1) коефіцієнт теплопровідності k чисельно дорівнює кількості теплоти, що протікає за одиницю часу через одиничну площадку, розташовану перпендикулярно напрямку поширення теплоти, при градієнті температури, який дорівнює одиниці; при цьому $[k] = \text{Вт/К.м}$.

Порядок виконання роботи

1. Наливають воду в пароутворювач і ставлять його на ввімкнену електричну плитку.

2. Вимірюють діаметр d дна калориметра і визначають

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

3. Визначають масу калориметра m_2 і масу води m_1 .

4. Встановлюють калориметр з водою у циліндр Ц на пісок; товщина ℓ шару піску дорівнює 1,0 см.

5. З'єднують пароутворювач з паровою коробкою. Помішуючи мішалкою воду в калориметрі, стежать за зміною їх температури. При підвищенні температури води на 1-2° записують покази термометра і включають секундомір.

6. При підвищенні температури ще на 5-6°. зупиняють секундомір, записують тривалість досліду і кінцеву температуру t_2 .

7. Середню температуру води в калориметрі T_1 визначають за формулою $T_1 = \frac{(t_1 + t_2)}{2}$.

8. Температуру водяної пари T_2 визначають за таблицею її залежності від атмосферного тиску $P_{\text{атм}}$, який вимірюють барометром.

9. Дані досліду заносять у табл.1.

10. Розраховують коефіцієнт теплопровідності k за формулою (3).

11. Розраховують похибки результатів прямих вимірювань і табличних даних.

12. Оскільки в даній роботі відносні похибки вимірювань різниць температур $(T_2 - T_1)$ і $(t_2 - t_1)$ у багато разів перевищують відносні похибки всіх інших величин, відносну похибку ε_k розраховують за наближеною формулою:

$$\varepsilon_k = 2 \left(\frac{C_t}{T_2 - T_1} + \frac{C_t}{t_2 - t_1} \right),$$

де C_t – ціна поділки термометра.

1.

№ п/п	Табличні дані		Результати прямих вимірювань								
	$C_1,$ Дж/кг.к	$C_2,$ Дж/кг.к	$P_{атм},$ мм рт.ст	$\ell,$ м	$d,$ м	$m_1,$ кг	$m_2,$ кг	$t_1,$ °C	$t_2,$ °C	$\tau,$ с	$T_2,$ °C
с	-	-									

2.

Результати непрямих вимірювань				
$S,$ m^2	$T_1,$ °C	$t_2-t_1,$ К	$T_2-T_1,$ К	$\aleph,$ Вт/К.м

Запитання і вправи для самоконтролю

1. Назвіть і опишіть способи передачі теплоти.
2. Що таке питома теплоємність? В яких одиницях її вимірюють?
3. Що таке градієнт температури? В яких одиницях його вимірюють?
4. Запишіть і сформулюйте закон Фур'є, наведіть рисунок, що його ілюструє.
5. Розкрийте фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності.

3. МОДУЛЬ 3 „ЕЛЕКТРИКА”

3.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ

Закон Кулона:

$$F = \frac{|Q_1 Q_2|}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2},$$

де F – модуль сили взаємодії точкових зарядів Q_1 і Q_2 ; r – відстань між зарядами; ε – діелектрична проникність середовища; ε_0 – електрична стала.

Напруженість та потенціал електричного поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \text{ та } \varphi = \frac{\Pi}{Q},$$

де Π – потенціальна енергія точкового позитивного заряду Q , який знаходиться в цій точці поля (за умови, що потенціальна енергія заряду, віддаленого в нескінченність, приймається рівною нулю).

Сила, яка діє на точковий заряд, що знаходиться в електричному полі, та потенціальна енергія цього заряду:

$$\vec{F} = Q\vec{E} \text{ та } \Pi = Q\varphi.$$

Напруженість та потенціал поля, який створює система точкових зарядів (принцип суперпозиції електричних полів):

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \text{ та } \varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i,$$

де \vec{E}_i , φ_i – напруженість та потенціал полів, що створюються окремими зарядами у даній точці поля.

Модуль напруженості та потенціал електростатичного поля, створеного точковим зарядом:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \text{ та } \varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r},$$

де r – відстань від заряду Q до точки, в якій визначається напруженість та потенціал.

Напруженість та потенціал поля, що створюється металічною зарядженою сферою радіусом R на відстані r від центра сфери.

$$\text{а) } E = 0, \quad \varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R} \quad (\text{при } r < R);$$

$$\text{б) } E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^2}, \quad \varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R} \quad (\text{при } r = R);$$

$$\text{в) } E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}, \quad \varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (\text{при } r > R),$$

де Q – заряд сфери.

Якщо заряджені тіла не є точковими, то тіла уявно розбиваються на нескінченно малі ділянки, які можна розглядати як точкові заряди і до яких можна застосовувати відповідні формули.

Наприклад, якщо заряд Q рівномірно розподілений на нитці або циліндрі довжиною ℓ з лінійною густиною заряду

$$\tau = \frac{Q}{\ell},$$

то нескінченно мала ділянка довжиною $d\ell$ із зарядом $dQ = \tau d\ell$ може розглядатися як точковий заряд, для якого

$$d\vec{E} = \frac{\tau d\ell}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \frac{\vec{r}}{r}; \quad d\varphi = \frac{\tau d\ell}{4\pi\epsilon_0\epsilon r},$$

де \vec{r} – радіус-вектор, що спрямований від виділеного елемента $d\ell$ до точки, в якій вираховується напруженість електростатичного поля.

Використовуючи принцип суперпозиції електричних полів, інтегруванням знаходимо напруженість \vec{E} та потенціал φ поля, який створюється розподіленим зарядом:

$$\vec{E} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_{\ell} \frac{d\ell \vec{r}}{r^2 r}; \quad \varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_{\ell} \frac{d\ell}{r}.$$

Тут інтегрування ведеться вздовж всієї довжини ℓ зарядженої лінії.

Модуль напруженості поля, що створюється нескінченною прямою рівномірно зарядженою ниткою чи нескінченно довгим циліндром:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r},$$

де r – відстань від нитки або осі циліндра до точки, напруженість поля якої розраховується.

Заряджену поверхню, заряд якої Q рівномірно розподілений по поверхні площею S , можна характеризувати поверхневою густиною заряду

$$\sigma = \frac{Q}{S}.$$

Модуль напруженості поля, яка створюється нескінченною рівномірно зарядженою площиною:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}.$$

Зв'язок потенціалу електростатичного поля з напруженістю поля:

а) $\vec{E} = -grad \varphi$ чи $\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right)$ – у загальному

випадку;

б) $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$ – у випадку однорідного поля;

в) $E = -\frac{d\varphi}{dr}$ – у випадку поля, що має центральну або осьову симетрію.

Електричний диполь – це система з двох рівних за модулем точкових зарядів протилежного знаку. Електричний момент диполя:

$$\vec{p} = |Q| \vec{\ell},$$

де Q – заряд; $\vec{\ell}$ – плече диполя (векторна величина, направлена від від'ємного заряду до позитивного та чисельно рівна відстані між зарядами).

Робота сил поля з переміщення заряду Q із точки поля з потенціалом φ_1 у точку з потенціалом φ_2 :

$$A_{12} = Q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Електроємність

$$\text{провідника: } C = \frac{Q}{\varphi}, \quad \text{конденсатора: } C = \frac{Q}{U},$$

де φ – потенціал провідника (за умови, що на нескінченності потенціал провідника приймається рівним нулю); U – різниця потенціалів між пластинами конденсатора.

Електроємність сфери радіусом R , яка віддалена від інших тіл:

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

Електроємність плоского конденсатора:

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

де S – площа пластини (однієї) конденсатора; d – відстань між пластинами.

Електроємність C батареї конденсаторів:

$$\text{а) } \frac{1}{C} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \quad (\text{при послідовному з'єднанні});$$

$$\text{б) } C = \sum_{i=1}^N C_i \quad (\text{при паралельному з'єднанні}),$$

де N – кількість конденсаторів у батареї.

Енергія зарядженого конденсатора:

$$W = \frac{QU}{2}; \quad W = \frac{CU^2}{2}; \quad W = \frac{Q^2}{2C}.$$

Об'ємна густина енергії електричного поля

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2.$$

Сила постійного електричного струму:

$$I = \frac{Q}{t},$$

де Q – заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час t .

Густина струму:

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

де S – площа поперечного перерізу провідника.

Зв'язок густини струму з середньою швидкістю $\langle \vec{v} \rangle$ направлено руху заряджених частинок:

$$\vec{j} = qn \langle \vec{v} \rangle,$$

де q – заряд частинки; n – концентрація заряджених частинок.

Закон Ома:

а) для однорідної ділянки кола (на якій на діють сторонні сили):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R},$$

де $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – різниця потенціалів (напруга) на кінцях ділянки кола;
 R – опір ділянки;

б) для повного (замкнутого) кола:

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

де \mathcal{E} – електрорушійна сила джерела струму (е. р. с.); R – опір зовнішньої ділянки кола; r – внутрішній опір джерела.

Правила Кірхгофа:

$$\text{а) } \sum_{i=1}^n I_i = 0 \text{ (перше правило);}$$

$$\text{б) } \sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_i^m \mathcal{E}_i \text{ (друге правило),}$$

де $\sum_{i=1}^n I_i$ – алгебраїчна сума сил струмів, які сходяться у вузлі;

$\sum_{i=1}^n I_i R_i$ – алгебраїчна сума добутків сил струму на опори (суми падіння напруги); $\sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i$ – алгебраїчна сума е. р. с.

Опір R та провідність G провідника:

$$R = \frac{\rho l}{S}; \quad G = \frac{\gamma S}{l},$$

де ρ – питомий опір; $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – питома провідність; l – довжина

провідника; S – площа поперечного перерізу провідника.

Опір системи провідників:

$$\text{а) } R = \sum_{i=1}^n R_i \text{ (при послідовному з'єднанні);}$$

$$\text{б) } \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \text{ (при паралельному з'єднанні),}$$

де R_i – опір i -го провідника.

Робота постійного струму:

$$A = IUt, \quad A = I^2 R t, \quad A = \frac{U^2 t}{R}.$$

Перша формула дійсна для будь-якої ділянки кола, на кінцях якого підтримується напруга U , останні дві – для ділянки, яка не включає джерела струму.

Потужність струму:

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

Закон Джоуля-Ленца:

При протіканні постійного струму силою I в провіднику з опором R за час t виділяється кількість теплоти Q .

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

Якщо сила струму в провіднику змінюється, то закон Джоуля-Ленца справедливий для нескінченно малого інтервалу часу:

$$dQ = I^2 R dt,$$

де $I = f(t)$. У випадку лінійної залежності сили струму від часу $I = kt$ кількість теплоти, що виділиться за деякий час $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I^2 R dt = \int_{t_1}^{t_2} [f(t)]^2 R dt.$$

Закон Ома в диференціальній формі:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E},$$

де γ – питома провідність провідника; \vec{E} – напруженість електричного поля; \vec{j} – густина електричного струму.

Зв'язок питомої провідності з рухливістю b заряджених частинок (іонів):

$$\gamma = qn(b_+ + b_-),$$

де q – заряд іона; n – концентрація іонів; b_+ і b_- – рухливість позитивних та негативних іонів.

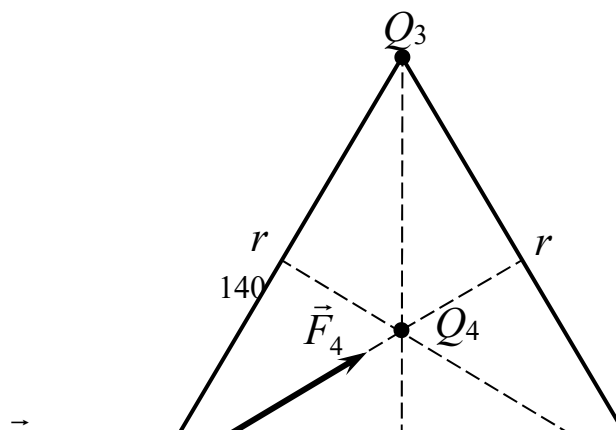
3.2. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ МОДУЛЬ 3. „ЕЛЕКТРИКА”

Приклад 1. Три точкових позитивних заряди $Q_1 = Q_2 = Q_3$ закріплені у вершинах рівностороннього трикутника. Який заряд по величині та по знаку Q_4 потрібно розмістити в центрі трикутника, щоб ця система зарядів знаходилася в рівновазі.

Розв'язання. Між одноіменними зарядами спостерігається відштовхування. Всі три заряди, що розміщені по вершинах трикутника, знаходяться в однакових умовах (рис. 1). Тому достатньо пояснити, який заряд треба розмістити в центрі трикутника, для того, щоб один із трьох зарядів, наприклад Q_1 , знаходився б в рівновазі. Заряд Q_1 буде знаходитись в рівновазі, коли векторна сума діючих на нього сил буде дорівнювати нулю:

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = \vec{F} + \vec{F}_4 = 0 \quad (1)$$

де $\vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4$ – сили, з якими відповідно діють на заряд Q_1 заряди Q_2, Q_3, Q_4 ; \vec{F} – рівнодіюча сил \vec{F}_2 та \vec{F}_3 . Зрозуміло (див. рис.1), що сила, що зрівноважить силу \vec{F} , повинна бути силою притягування, тобто заряд Q_4 повинен бути негативним. Знайдемо його величину.



Оскільки сили \vec{F} та \vec{F}_4 направлені по одній прямій у протилежні сторони, то векторне рівняння (1) можна замінити скалярним: $F - F_4 = 0$, звідки $F = F_4$. Виразивши в останньому рівнянні F через F_2 та F_3 та приймаючи до уваги, що $F_3 = F_2$, одержимо $F_4 = 2F_2 \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$. Тут враховано, що паралелограм побудований на рівних по величині сторонах F_2 та F_3 є ромбом, в якого діагоналі взаємно - перпендикулярні і діляться пополам.

Запишемо закон Кулона, враховуючи, що заряди у вершинах трикутника рівні $Q_2 = Q_3 = Q_1$:

$$\frac{Q_1 Q_4}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} = 2 \cdot \frac{Q_1^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Звідси:

$$Q_4 = 2 \cdot \frac{Q_1 r_1^2}{r^2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Врахуємо, що в рівносторонньому трикутнику $\alpha = 60^\circ$, а тому відстань r_1 між зарядами Q_4 та Q_1 дорівнює:

$$r_1 = \frac{r}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{r}{2 \cos 30^\circ} = \frac{r}{\sqrt{3}},$$

З врахуванням цього з формули (3) знайдемо величину заряду:

$$Q_4 = \frac{Q_1}{\sqrt{3}}.$$

Цей заряд – негативний. Треба також відмітити, що рівновага такої системи зарядів буде нестійкою.

Приклад 2. Визначити прискорюючу різницю потенціалів, яку повинен пройти в електричному полі електрон, що має швидкість 10^6 м/с, для того, щоб швидкість його збільшилася в 2 рази.

Розв'язання. Прискорюючу різницю потенціалів можна знайти, якщо вирахувати роботу сил електростатичного поля. Ця робота визначається добутком заряду електрона на різницю потенціалів:

$$A = eU. \quad (1)$$

Робота сил електростатичного поля в даному випадку дорівнює зміні кінетичної енергії електрона:

$$A = W_2 - W_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}, \quad (2)$$

де W_1 та W_2 – кінетичні енергії електрона до та після проходження прискорюючої різниці потенціалів; m – маса електрона; v_1 та v_2 – початкова та кінцева швидкості. Прирівнявши праву частину рівняння (1) та (2), одержимо:

$$eU = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{mn^2v_1^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

де $n = v_2 / v_1$. Звідси різниця потенціалів дорівнює:

$$U = \frac{mv_1^2(n^2 - 1)}{2e}. \quad (3)$$

Провівши розрахунки, отримаємо:

$$U = \frac{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot (10^6)^2}{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} (2^2 - 1) \text{В} = 8,53 \text{В}.$$

Приклад 3. Знайти швидкість та кінетичну енергію (в Дж та еВ), якої набуде електрон, що пройшов різницю потенціалів $\Delta\varphi = 100 \text{В}$.

Розв'язання. Робота електричного поля щодо збільшення швидкості (кінетичної енергії)

$$A = e \cdot \Delta\varphi. \quad (1)$$

Ця робота йде на збільшення кінетичної енергії:

$$A = \Delta W_k. \quad (2)$$

Якщо в початковий момент $V = 0$, $W_k = 0$, $\hat{o}i$ $A = W_k = \frac{mv^2}{2}$.

(3)

Отже:

$$e \cdot \Delta\varphi = W_k \quad (4)$$

та

$$e \cdot \Delta\varphi = \frac{mv^2}{2}. \quad (5)$$

Підставивши числові значення в (4), отримаємо:

$$W_k = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 100 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} ; \quad (\text{Дж} = \text{Кл} \cdot \text{В}).$$

Оскільки за визначенням 1 електрон-вольт (1eВ) – це енергія, яку отримає електрон, що пройде різницю потенціалів в 1 В, то

$$W_k = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} = 100 \text{ eВ}.$$

З формули (5) знайдемо швидкість, яку отримає електрон:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \Delta\varphi}{m}}. \quad (6)$$

Підставимо числові значення:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Кл}}} = \sqrt{\frac{320}{9,1} \cdot 10^{12}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right) = 5,9 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Приклад 4. Сила струму в провіднику опором 20 Ом зростає протягом 2 с за лінійним законом від 0 до 6 А. Визначити теплоту, яка виділилася в цьому провіднику за першу та за другу секунду, а також знайти співвідношення теплоти, що виділилася за першу та другу секунди.

Розв'язання. Закон Джоуля-Ленца у вигляді $Q = I^2 R t$ справедливий для постійного струму ($I = \text{const}$). Якщо ж сила струму в провіднику змінюється, то вказаний закон справедливий для нескінченно малого інтервалу часу та записується у вигляді:

$$dQ = I^2 R dt. \quad (1)$$

Тут сила струму I є деякою функцією часу. В даному випадку

$$I = kt, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який характеризує швидкість зміни сили струму:

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{6}{2} = 3 \text{ А/с}.$$

З урахуванням (2) формула (1) приймає вигляд:

$$dQ = k^2 R t^2 dt. \quad (3)$$

Для визначення теплоти, що виділиться за інтервал часу Δt , вираз (3) треба інтегрувати в межах від t_1 до t_2 :

$$Q = k^2 R \int_{t_1}^{t_2} t^2 dt = \frac{1}{3} k^2 R (t_2^3 - t_1^3).$$

Проведемо розрахунки:

$$Q_1 = \frac{1}{3} \cdot 3^2 \cdot 20 \cdot (1 - 0) = 60 \text{ Дж};$$

$$Q_2 = \frac{1}{3} \cdot 3^2 \cdot 20 \cdot (8 - 1) = 420 \text{ Дж}.$$

Значить $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{420}{60} = 7$, тобто за другу секунду виділиться теплоти в

7 раз більше, ніж за першу.

Приклад 5. Простір між пластинами плоского конденсатора має об'єм 375 см^3 і заповнений воднем, який частково іонізовано. Площа кожної пластини конденсатора 250 см^2 . При якій напрузі сила струму, що проходить, досягне значення 2 мкА , якщо концентрація іонів у газі рівна $5,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$?

Розв'язання. Напряга на пластинах конденсатора зв'язана з напруженістю електричного поля та відстанню між пластинами співвідношенням:

$$U = E \cdot d. \quad (1)$$

Напряга поля може бути визначена з виразу для густини струму:

$$j = Qn(b_+ + b_-)E,$$

де Q - заряд іона; n - концентрація іонів; b_+ і b_- - рухливість позитивних та негативних іонів. Звідси:

$$E = \frac{j}{Qn(b_+ + b_-)} = \frac{1}{Qn(b_+ + b_-) \cdot S}.$$

Оскільки об'єм простору між пластинами дорівнює Sd , то підставляючи вираз E та d у формулу (1), одержимо:

$$U = \frac{IV}{Qn(b_+ + b_-)S^2}. \quad (2)$$

Проведемо розрахунки, приймаючи до уваги, що рухомість іонів $b_+ = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$; $b_- = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$:

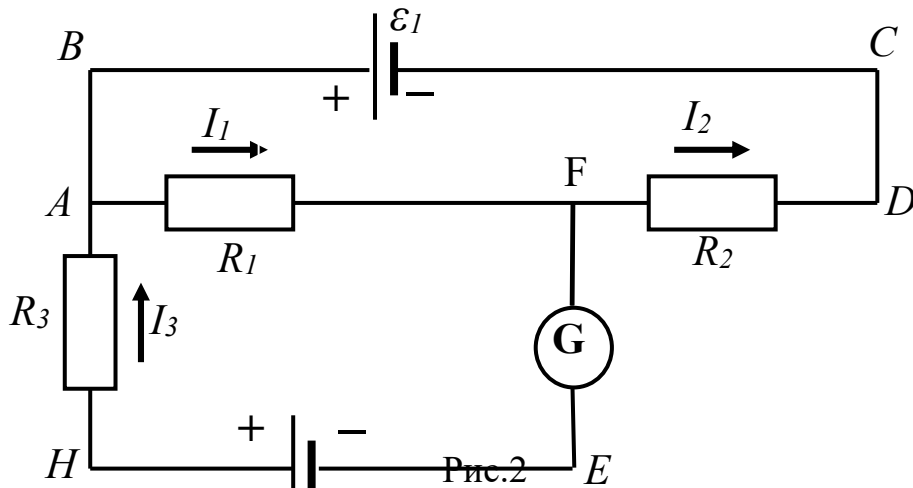
$$U = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 3,75 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,3 \cdot 10^{13} (5,4 + 7,4) \cdot 10^{-4} \cdot 6,26 \cdot 10^{-4}} B = 110 B.$$

Приклад 6. Електричне коло складається з двох гальванічних елементів, трьох опорів та гальванометра (рис. 2). У цьому колі $R_1=100$ Ом, $R_2=50$ Ом; $R_3=20$ Ом; е. р. с. елемента $\varepsilon_1 = 2$ В. Гальванометр реєструє силу струму $I_3 = 50$ мА, в напрямку, який вказано стрілкою. Визначити е. р. с. ε_2 другого елемента. Опором гальванометра та внутрішнім опором елементів знехтувати.

Вказівка. Для розрахунку розгалужених кіл застосовують закони Кірхгофа. Відмітимо деякі особливості складання рівнянь за цими законами.

1. Перед складанням рівняння доволіно вибрати: а) напрямки струмів (якщо вони не задані умовою задачі) та показати їх стрілками на схемі; б) напрямки обходу контурів.

2. При складанні рівнянь за першим законом Кірхгофа вважати струми, що входять у вузол позитивними, а струми з вузла - негативними. Число рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа, повинно бути на одиницю менше від числа вузлів, які знаходяться в колі.



3. При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа треба вважати: а) падіння напруги (тобто добуток IR), що входить у рівняння зі знаком плюс, якщо напрямок струму на даній ділянці збігається з вибраним напрямком обходу контуру; в протилежному разі добуток IR входить у рівняння зі знаком мінус; б) е. р. с. входить у рівняння зі знаком плюс, якщо вона підвищує потенціал у напрямку обходу контуру, тобто при обході йдемо від мінуса до плюса джерела струму; в протилежному разі е. р. с. входить в рівняння зі знаком мінус.

Число незалежних рівнянь, які можуть бути складені за другим законом Кірхгофа, повинно бути менше числа замкнених контурів, які є в колі.

Для складання рівнянь перший контур можна вибрати довільно. Всі наступні контури слід вибрати так, щоб у кожний новий контур входила хоча б одна частина кола, яка не брала участі ні в одному із раніше використаних контурів. Якщо при розв'язанні рівнянь, що складені вищевказаним способом, одержано від'ємні значення сили струму, то це означає, що струм через даний опір у дійсності тече в напрямку, протилежному довільно вибраному.

Розв'язання. Виберемо напрямки струмів так, як їх показано на рис. 1, і умовимося обходити контури за годинниковою стрілкою.

За першим законом Кірхгофа для вузла F маємо:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

За другим законом Кірхгофа для контура $ABCDFA$ маємо:

$$-I_1 R_1 - I_2 R_2 = -\varepsilon_1 \quad \text{або} \quad I_1 R_1 + I_2 R_2 = \varepsilon_1 \quad (2)$$

Відповідно для контура $AFEHA$

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = \varepsilon_2. \quad (3)$$

Після підстановки числових значень у формули (1), (2) та (3) одержимо:

$$I_1 - I_2 - 0,05 = 0; \quad 50 I_1 + 25 I_2 = 1; \quad 100 I_1 + 0,05 \cdot 20 = \varepsilon_2.$$

Якщо перенесемо в цих рівняннях невідомі величини в ліві частини, а відомі – в праві, одержимо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= 0,05; \\ 50 I_1 - 25 I_2 &= 1; \\ 100 I_1 - \varepsilon_2 &= -1. \end{aligned}$$

Цю систему з трьома невідомими можна вирішити звичайними прийомами алгебри, але оскільки за умовою задачі треба визначити тільки одне невідоме - ε_2 з трьох, то скористаємося методом визначників.

Складаємо та вираховуємо визначник Δ системи:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 50 & 25 & 0 \\ 100 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 1 \begin{vmatrix} 25 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} - (-1) \begin{vmatrix} 50 & 0 \\ 100 & -1 \end{vmatrix} = -25 - 50 = -75.$$

Складаємо та вираховуємо визначник Δ_{ε_2} :

$$\Delta_{\varepsilon_2} =$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0,05 \\ 50 & 25 & 1 \\ 100 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 1 \begin{vmatrix} 25 & 1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} - (-1) \begin{vmatrix} 50 & 1 \\ 100 & -1 \end{vmatrix} + 0,05 \begin{vmatrix} 50 & 25 \\ 100 & 0 \end{vmatrix} = -25 - 50 - 100 - 125 = -300.$$

Поділимо визначник Δ_{ε_2} на визначник Δ , знайдемо числове значення ε_2 :

$$\varepsilon_2 = \Delta_{\varepsilon_2} / \Delta = -300 / (-75) = 4.$$

Таким чином $\varepsilon_2 = 4$ В.

3.3. ЗАВДАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ №3 МОДУЛЬ 3. „ЕЛЕКТРИКА”

301. Точкові заряди 2 мкКл та 5 мкКл знаходяться на відстані 5 см один від одного. Визначити напруженість поля в точці, віддаленій на 3 см від першого і 4 см від другого заряду. Визначити силу, що діє в цій точці на точковий заряд 10 мкКл.

302. Три однакових точкових заряди по 5 нКл кожний знаходяться в вершинах рівностороннього трикутника зі стороною 1 см. Визначити модуль і напрямок сили, що діє на один із зарядів зі сторони двох інших.

303. Чотири однакових точкових заряди по 10 нКл кожний закріплені в вершинах квадрата зі стороною 10 см. Знайти силу, що діє на один із цих зарядів зі сторони трьох інших.

304. Відстань між двома точковими однойменними зарядами 0,9 нКл та 1,6 нКл дорівнює 50 см. Визначити точку, в яку треба помістити третій заряд так, щоб система зарядів знаходилась в рівновазі. Визначити розмір і знак заряду. Стійка чи нестійка буде рівновага?

305. Заряджена пилинка масою 0,01 г перебуває в рівновазі в однорідному електричному полі плоского конденсатора. Напруга між пластинами 400 В, а відстань між пластинами 4 мм. Визначити величину заряду пилінки та напруженість поля.

306. На якій відстані один від одного потрібно розмістити два однойменні точкові заряди в воді, щоб вони відштовхувались з такою ж силою, з якою вони відштовхуються в вакуумі на відстані 9 см. Відносна діелектрична проникність води 81.

307. В теорії атома водню прийнято, що електрон обертається навколо протона (ядра) по коловій орбіті радіусу $0,53 \cdot 10^{-10}$ м. Чому буде дорівнювати лінійна швидкість електрона при такому обертанні? Знайти силу взаємодії між електроном та протоном.

308. На тонкому провіднику, що зігнутий в кільце з радіусом 5 см, рівномірно розподілений заряд 10 нКл. Знайти напруженість та потенціал поля в центрі кільця (в площині кільця).

309. На тонкому стержні довжиною 10 см знаходиться рівномірно розподілений заряд з лінійною густиною заряду 5 нКл/м. На продовженні осі стержня на відстані 20 см від ближнього кінця стержня розміщено точковий заряд 10 нКл . Знайти силу взаємодії точкового заряду з стержнем.

310. Точковий заряд 10 нКл розміщений в електричному полі, що створене прямим довгим (рахуємо - нескінченно довгим) циліндром радіуса 5 см, який рівномірно заряджений з поверхневою густиною заряду 1 мкКл/м². Визначити силу, що діє на заряд в точці, що відстоїть від осі циліндра на відстані 10 см.

311. Який заряд треба помістити на пластини конденсатора площею 200 см, щоб вони притягуються з силою 0,5 м? Електричне поле рахувати однорідним, а між пластинами діелектрик слюда.

312. Поле створене точковим диполем з електричним моментом 0,5 нКл м. Визначити напруженість поля в точках, що розміщені симетрично відносно центру диполя на його осі на відстані 50 см від центру диполя. Знайти різницю потенціалів між цими точками.

313. Електричне поле в повітрі створене прямим довгим (рахуємо- нескінченно довгим) циліндром радіуса 10 см, який рівномірно заряджений з лінійною густиною заряду 0,5 мкКл/м. Визначити поверхневу густину заряду циліндра та напруженість поля на відстані 20 см від осі циліндра.

314. На пластинках плоского конденсатора розміщений заряд 20 нКл. Площа кожної пластини 50 см², а діелектриком є фарфор. Вважаючи поле однорідним знайти силу, з якою притягуються пластини.

315. На тонкому стержні довжиною 25 см знаходиться рівномірно розподілений заряд. На продовженні осі стержня на відстані 25 см від ближнього кінця стержня розміщено точковий заряд 20 нКл . Знайти лінійну густину заряду на стержні, якщо сила взаємодії точкового заряду з стержнем дорівнює 10 мкН.

316. Електричне поле в повітрі створене прямим довгим (рахуємо- нескінченно довгим) циліндром радіуса 2 см, який рівномірно заряджений з поверхневою густиною заряду 1 мкКл/м². Визначити лінійну густину заряду циліндра та напруженість поля на відстані 10 см від осі циліндра.

317. Електричне поле в вакуумі створене нескінченно довгим тонким зарядженим провідником з лінійною густиною заряду 10 нКл/м. Визначити напруженість поля в точках, що знаходяться на відстані 5 см та 10 см від провідника, а також різницю потенціалів між цими точками.

318. В поле точкового заряду величиною 10 нКл поміщають на деякій відстані інший точковий заряд величиною 5 нКл. Під дією сил поля другий заряд перемістився так, що відстань до першого заряду збільшилась вдвічі. Виконана при цьому робота дорівнює 1 мкДж. На якій відстані розміщалися заряди?

319. Потенціал в деякій точці поля, що розміщена на відстані 1 см від точкового заряду в повітрі, дорівнює 200 В. Визначити величину цього заряду та напруженість поля в цій точці. Яку роботу потрібно виконати, щоб перемістити цей заряд в точку з потенціалом 100 В?

320. Визначити потенціальну енергію системи двох точкових зарядів 2 нКл та 5 нКл, що знаходяться на відстані 10 см один від одного. Як зміниться потенціальна енергія, якщо знак одного із зарядів поміняти на негативний.

321. Електрон влітає в однорідне електричне поле з напруженістю 100 В/м з початковою швидкістю 10^6 м/с так, що вектор швидкості перпендикулярний до ліній напруженості електричного поля. Визначити: а) силу, що діє на електрон; б) прискорення руху електрона; в) швидкість електрона через 10^{-7} с.

322. Електрон з енергією $1,6 \cdot 10^{-17}$ Дж рухається з нескінченності вздовж силової лінії по напрямку до металеві зарядженої кульки радіусом 1 см. Визначити мінімальну відстань, на яку наблизиться електрон до поверхні кульки, якщо її заряд-100 нКл.

323 Електрон, що пройшов в плоскому конденсаторі шлях від однієї пластини до іншої, набув швидкість 10^5 м/с. Відстань між пластинами 10 мм. Знайти: 1) різницю потенціалів між пластинами; 2) поверхневу густину заряду на пластинах.

324. Яку прискорюючу різницю потенціалів повинен пройти електрон, що має швидкість 10^6 м/с, щоб його швидкість зросла втричі?

325. Яку різницю потенціалів повинен пройти протон, що має швидкість 10^5 м/с, щоб його швидкість зросла вдвічі?

326. Знайти відношення швидкостей іонів Cu^{2+} та K^+ , що пройшли однакову різницю потенціалів.

327. Іон атома літію Li^+ пройшов різницю потенціалів 500 В, а іон атому натрію Na^+ - різницю потенціалів 200 В. Знайти відношення швидкостей цих іонів.

328. Електрон, що мав кінетичною енергією, $1,6 \cdot 10^{-18}$ Дж влетів в однорідне електричне поле в напрямі силових ліній поля. З якою швидкістю буде рухатись електрон, що пройшов в цьому полі різницю потенціалів 10 В? Як зміниться швидкість руху, якщо електрон влітатиме в напрямі, протилежному силовим лініям поля.

329. Пилінка масою 10^{-8} кг, що несе на собі заряд рівний заряду 100 електронів, пройшла в вакуумі прискорюючи різницю потенціалів $U=500$ В. Яка кінетична енергія цієї пилінки? Яку швидкість набула пилінка?

330. Знайти швидкість та кінетичну енергію (в Дж та еВ), якої набуває електрон, що пройшов різницю потенціалів в 500 В.

331. Плоский конденсатор заряджений до різниці потенціалів 200 В, а потім відключений від джерела. Відстань між пластинами конденсатора 5 мм. Як зміниться напруга між пластинами, якщо відстань між ними зросте вдвічі? Вважати, що втрат заряду після відключення конденсатора немає.

332. Плоский конденсатор, що має площу пластин 100 см^2 та відстань між ними 5 мм, заряджений до різниці потенціалів 200 В. Визначити енергію електростатичного поля та її об'ємну густину. Відносна діелектрична проникливість діелектрика між пластинами дорівнює 7 (слюда).

333. Відстань між пластинами плоского конденсатора 5 мм, різниця потенціалів 500 В. Заряд кожної пластини 40 нКл. Визначити енергію поля конденсатора та силу взаємодії між пластинами.

334. Два однакових плоских повітряних конденсатора ємністю 200 пФ кожний з'єднані послідовно в батарею. Визначити на скільки зміниться ємність батареї, якщо простір між пластинами одного із конденсаторів заповнити слюдою з відносною діелектричною проникливістю 7.

335. Плоский конденсатор, відстань між пластинами якого дорівнює 5 мм, заряджений до різниці потенціалів 250 В. Площа кожної пластини 50 см^2 . Знайти напруженість та об'ємну густину енергії поля конденсатора. Діелектрик – слюда, з відносною діелектричною проникливістю 7.

336. Напруга між пластинами плоского конденсатора 100 В. Площа кожної пластини 50 см^2 , а заряд на пластині 5 нКл. Чому дорівнює відстань між пластинами, якщо між пластинами а) повітря, б) фарфор, з відносною діелектричною проникливістю 5.

337. Між пластинами плоского конденсатора знаходиться слюдяна пластинка, що щільно прилягає до пластин. Як зміниться напруга між пластинами конденсатора, що заряджений до напруги 50 В, якщо слюдяну пластинку витягнути? Відносна діелектрична проникливість слюди - 7.

338. Різниця потенціалів між пластинами плоского конденсатора 200 В, а відстань між ними 5 мм. Площа кожної пластини 100 см^2 . Який

заряд знаходиться на кожній пластині, якщо між пластинами а) повітря, б) фарфор, з відносною діелектричною проникливістю 5.

339. Плоский конденсатор з пластинами по 100 см^2 кожна та відстанню між ними в 3 мм заряджений до різниці потенціалів в 300 В. Знайти енергію та об'ємну густину енергії поля конденсатора якщо між пластинами а) повітря, б) фарфор, з відносною діелектричною проникливістю 5.

340. Конденсатор ємністю 5 мкФ заряджений до різниці потенціалів 100 В. Після відключення від джерела струму конденсатор підключили паралельно з іншим, незарядженим, конденсатором такої ж ємності. Яка енергія піде на створення іскри під час під'єднання другого конденсатора?

341. Електрорушійна сила джерела струму 12 В. Внутрішній опір менший зовнішнього в 5 разів. Визначити напругу на клеммах джерела.

342. Акумулятор дає струм 2 А при замиканні на опір 4 Ом та 1А при замиканні на 10 Ом. Визначити електрорушійну силу, внутрішній опір елемента та струм короткого замикання.

343. Гальванічний елемент з електрорушійною силою 1,5 В дає струм 0,1 А при замиканні його на опір 14 Ом. Визначити струм короткого замикання ?

344. Акумулятор дає струм 1 А при замиканні на опір 10 Ом та 0,5 А при замиканні на 22 Ом. Визначити електрорушійну силу, внутрішній опір елемента та струм короткого замикання.

345. Який повинен бути діаметр залізного провідника довжиною 5 м, щоб при замиканні ним елемента з електрорушійною силою 1,5 В та внутрішнім опором 0,2 Ом, одержати струм 0,6 А? Питомий опір провідника дорівнює $9,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

346. Лампа потужністю 500 Вт розрахована на напругу 110 В. Визначити опір лампи в робочому стані. Який додатковий опір необхідний для того, щоб ввімкнути цю лампу в мережу з напругою 127 В.

347. Котушка та амперметр підключені до джерела живлення послідовно. До клем котушки підключений вольтметр з опором 4 кОм. Амперметр показує силу струму 0,3 А, вольтметр - напругу 120 В. Визначити опір котушки. Визначити відносну похибку, яка буде допущена при вимірюванні опоры, якщо знехтувати силою струму, що проходить через вольтметр.

348. В коло з напругою 100 В підключили котушку з опором 2 кОм та вольтметр, що з'єднані послідовно. Покази вольтметра були 80 В. Коли котушку замінили іншою, вольтметр показав 60 В. Визначити опір другої котушки.

349. Електрорушійна сила батареї дорівнює 80 В. Внутрішній опір батареї 5 Ом. Зовнішнє коло споживає потужність 100 Вт. Визначити силу струму в колі, напругу, під яким знаходиться зовнішнє коло, та зовнішній опір.

350. Від джерела з електрорушійною силою 400 В, потрібно передати енергію на відстань 500 м. Потужність, що споживається, дорівнює 4 кВт. Знайти мінімальні втрати потужності в колі, якщо діаметр мідних провідників 0,4 см.

351. За час рівний 10 с струм в колі рівномірно виріс з 2 А до 5 А. Яка кількість теплоти при цьому виділиться на опорі 4 кОм?

352. В провіднику за час 5 с при рівномірному зростанні сили струму від 2 А до 5 А виділилося кількість теплоти 10 кДж. Знайти опір провідника.

353. Визначити кількість теплоти, що виділилась за час 5 с в провіднику опором 1 кОм, якщо сила струму в ньому рівномірно зменшувалась від 10 А до 5 А.

354. Сила струму в провіднику з опором 100 Ом за 2 с лінійно зростає від 0 до 4 А. Визначити кількість теплоти, що виділиться за першу та другу секунди проходження струму.

355. Сила змінного струму змінюється по синусоїдальному закону з частотою 50 Гц. Знайти заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час рівний четверті періоду, якщо при цьому сила струму зросла з 0 до 5 А.

356. Сила змінного струму з частотою 50 Гц, зросла за четверть періоду від 0 до 4 А. Яка кількість теплоти при цьому виділиться на провіднику з опором 1 кОм ?

357. Сила змінного струму з частотою 50 Гц, зменшилась за четверть періоду від 10 А до 0. Яка кількість теплоти при цьому виділиться на провіднику з опором 2 кОм?

358. За час рівний 5 с струм в колі рівномірно зменшився з 10 А до 5 А. Яка кількість теплоти при цьому виділиться на опорі 5 кОм?

359. За час рівний 15 с струм в колі рівномірно виріс з 2 А до 5 А. Яка кількість теплоти при цьому виділиться на опорі 10 кОм?

360. Сила струму в провіднику з опором 1 кОм за 5 с лінійно зменшується від 5 А до 0. Визначити кількість теплоти, що виділиться за першу, другу та п'ять секунд проходження струму.

361. Простір між пластинами плоского конденсатора, що має об'єм 500 см^3 , заповнено частково іонізованим воднем. Площа пластин конденсатора рівна 200 см^2 . При якій напрузі сила струму, що проходить через конденсатор, досягне значення 1 мкА, якщо концентрація іонів в газі дорівнює $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$?

362. Водень іонізується в іонізаційній камері під дією рентгенівського випромінювання, так, що в кожному кубічному міліметрі газу знаходиться в умовах рівноваги 10^5 пар іонів. Знайти питому провідність азоту.

363. Посередині між електродами іонізаційної камери влетіла α -частинка. Рухаючись паралельно електродам, вона створила на своєму шляху ланцюжок іонів. За який час після прольоту α -частинки іони дійдуть до електродів, якщо відстань між електродами 2 см, різниця потенціалів 6 кВ і рухомість іонів обох знаків в середньому дорівнює $1,5 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$?

364. Знайти опір трубки довжиною 0,5 м і площею поперечного перерізу 5 мм^2 , що наповнена азотом, іонізованим так, що в об'ємі 1 см^3 його знаходиться при рівновазі 10^8 пар іонів. Іони одновалентні.

366. Повітря іонізується рентгенівським випромінюванням. Визначити питому провідність повітря, якщо в одному см^3 газу знаходиться в умовах рівноваги 10^8 пар іонів.

367. Азот між плоскими електродами іонізаційної камери іонізується рентгенівським випромінюванням. Сила струму, що проходить через камеру, 1,5 мкА. Площа кожного електрода 200 см^2 , відстань між ними 1,5 см, різниця потенціалів 150 В. Визначити концентрацію іонів між пластинами, якщо струм далекий від насичення. Заряд кожного іона дорівнює елементарному заряду.

368. Газ, що знаходиться в іонізаційній камері між плоскими пластинами, опромінюється рентгенівським випромінюванням. Визначити густину струму насичення, якщо іонізатор створить в об'ємі 1 см^3 газу $5 \cdot 10^6$ пар іонів в секунду. Рахувати, що кожний іон несе на собі елементарний заряд. Відстань між пластинами камери 2 см.

369. Об'єм газу, що знаходиться між електродами іонізаційної камери, дорівнює 1 літр. При іонізації рентгенівським випромінюванням сила струму насичення рівна 5 нА. Скільки пар іонів виникне за одну секунду в об'ємі рівному 1 см^3 газу? Заряд кожного іона рівний елементарному заряду.

370. На відстані 1 см одна від одної розміщені дві пластини площею 200 см^2 кожна. Водень між пластинами іонізують рентгенівським випромінюванням. При напрузі 100 В між пластинами проходить далекий від насичення струм силою 2 мкА. Визначити концентрацію іонів одного знаку між пластинами. Заряд кожного іона вважати рівним елементарному заряду.

3.4. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 3

РОБОТА 3.1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи: ознайомитись з методом моделювання електростатичного поля, побудувати картину електростатичного поля за допомогою кривих рівного потенціалу та силових ліній.

Метод моделювання використовується для експериментального вивчення полів, утворених електродами складної конфігурації різних електронних, іонних та інших приладів (ламп, конденсаторів тощо). Збільшені моделі електродів розміщують один відносно одного так, як і в реальному приладі. Подають на них потенціали, пропорційні потенціалам відповідних електродів приладу. Модель відтворює у збільшеному масштабі силові лінії та екіпотенціальні поверхні електростатичного поля заряджених електродів приладу. Необхідність моделювання зумовлена тим, що вимірювання характеристик електростатичних полів безпосередньо всередині самих приладів часто є утрудненим через малі розміри окремих деталей. Крім того, деякі області простору всередині приладу можуть бути недоступними для зондування.

Установка для вивчення картини електростатичного поля складається з ванни, наповненої слабким електролітом (водопровідною водою) з двома електродами a і b довільної форми (рис. 1,а). Досліджують поле, створене цими електродами, за допомогою зонда Z .

Зонд (кінець тонкої металічної дротини), який з'єднують через нуль-гальванометр G з рухомою точкою C потенціометра. Переміщуючи зонд, занурений в електроліт, можна знайти таку точку поля, потенціал якої дорівнює потенціалу точки C . У цьому випадку струм, що проходить через гальванометр G дорівнює нулю. Потенціал точки поля в місці розташування зонда визначають за вольтметром V .

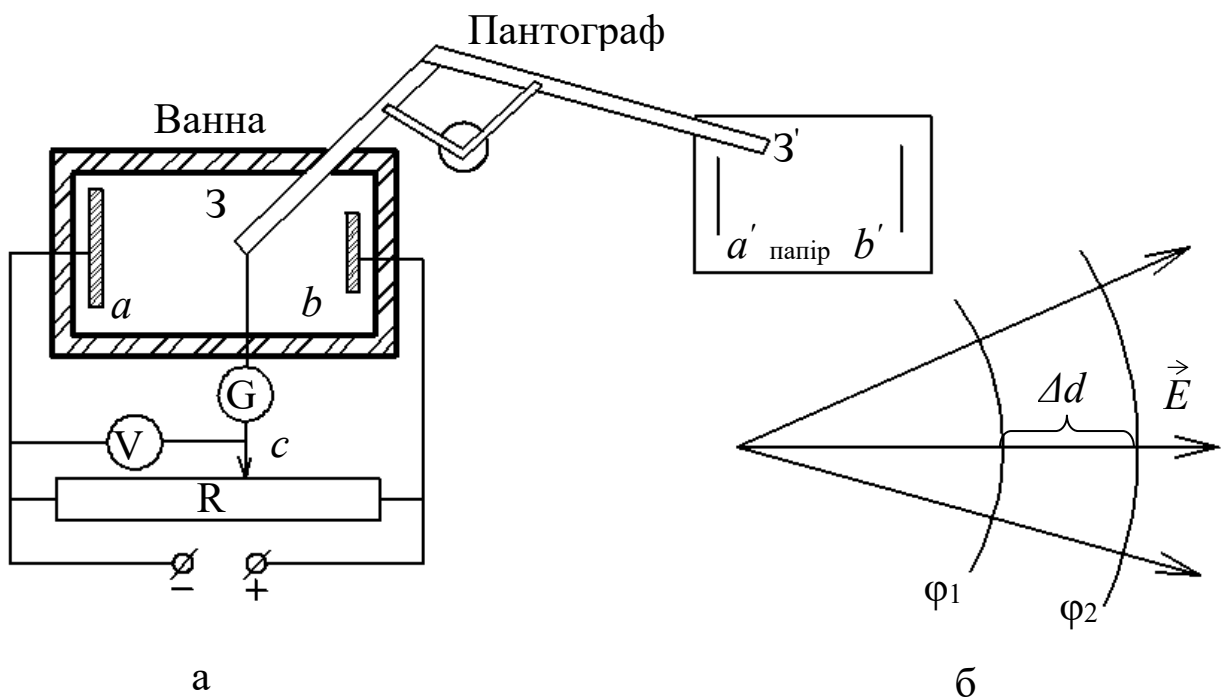
Потенціал φ у довільної точки поля – скалярна функція її координат x , y , z : $\varphi = \varphi(x, y, z)$. Він є енергетичною характеристикою поля і визначається величиною роботи, що її виконують сили поля при переміщенні одиничного позитивного заряду з даної точки (x, y, z) до тієї, потенціал якої беруть за початок відліку і умовно вважають рівним нулю.

На схемі (рис. 1, а) потенціал зонду, вимірюваний вольтметром V , відраховують відносно потенціалу лівого електрода. Екіпотенціальні лінії (лінії рівного потенціалу) рисують за

допомогою пантографа на папері. Зміна потенціалу на одиницю відстані у напрямку, перпендикулярному до поверхні рівного потенціалу $\varphi(x, y, z) = \text{const}$, визначає величину вектора **напруженості** \vec{E} електростатичного поля. Вектор напруженості \vec{E} у будь-якій точці поля перпендикулярний до поверхні рівного потенціалу, що проходить через цю точку, і спрямований у напрямку зменшення потенціалу. Зв'язок між напруженістю і потенціалом описується співвідношенням $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$. Для наближеного обчислення напруженості користуються формулою:

$$E \approx \frac{|\Delta\varphi|}{|\Delta d|} = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{\Delta d}, \quad (1)$$

де Δd – відстань між двома близько розташованими екіпотенціальними поверхнями, а φ_1 та φ_2 – їх потенціали (рис. 1, б).



Порядок виконання роботи

1. Складають схему (рис.1, а), записують у зошит характеристики вольтметра (ціну поділки, граничне значення, клас точності). У пантографі закріплюють декілька аркушів паперу (відповідно до кількості студентів, що виконують роботу).

2. Встановлюють електроди а та в та, не вимикаючи джерела струму, обводять їх зондом, відтворюючи їх обриси а' і в' на папері

(кінцем пантографа проколюють папір у кількох точках і з'єднують точки плавною лінією).

3. Подають на електроди різницю потенціалів 10 В.

4. Обертаючи ручку потенціометра, встановлюють потенціал точки С рівним $\varphi_1 = 1$ В. Переміщуючи зонд, відшуковують у ванні точку із таким самим потенціалом. У цьому випадку стрілка нуль-гальванометра встановлюється на нулі. Відмічають відповідну точку на папері.

5. Переміщуючи зонд, знаходять 8-10 точок з потенціалом φ_1 . З'єднуючи їх, викреслюють першу еквіпотенціальну криву і записують поряд з нею значення потенціалу φ_1 .

6. Збільшують потенціал до значення $\varphi_2, = 2$ В і аналогічно відшуковують наступну еквіпотенціальну криву. Так продовжують далі, збільшуючи кожного разу потенціал зонда на 1 В. Біля кожної кривої вказують її потенціал. Залежно від умов, значення потенціалів можуть бути іншими.

7. На основі отриманих еквіпотенціальних кривих будують сімейство ліній напруженості (силових ліній). Вказують напрямок кожної з них. При побудові враховують, що лінії напруженості перпендикулярні до поверхонь електродів і до еквіпотенціальних ліній.

8. За формулою (1) з урахуванням масштабу пантографа розраховують напруженості поля в кількох точках вздовж однієї з ліній напруженості (лінію вкаже викладач).

Запитання для самоперевірки та контролю

1. Що називають напруженістю електричного поля? В яких одиницях системи СІ вимірюється її величина?

2. Навести означення силових ліній (ліній напруженості) електричного поля.

3. Який фізичний зміст має різниця потенціалів між двома точками електростатичного поля?

4. Навести означення еквіпотенціальної поверхні та еквіпотенціальної лінії. Використовуючи силові та еквіпотенціальні лінії, образити на рисунку електростатичні поля точкового заряду, плоского конденсатора.

5. Що називають градієнтом фізичної величини?

6. Як зв'язані між собою напруженість і потенціал електростатичного поля? Якого вигляду набуває співвідношення між ними, якщо поле однорідне?

РОБОТА 3.2 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ (Е.Р.С.) ДЖЕРЕЛА СТРУМУ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦІЇ

Мета роботи: ознайомитися з компенсаційним методом визначення е. р. с. джерела струму, виміряти е. р. с. гальванічного елемента.

Відомо, що е. р. с. (\mathcal{E}) джерела дорівнює різниці потенціалів між його полюсами при розімкненому зовнішньому колі. Однак виміряти цю різницю потенціалів звичайним (неелектростатичним) вольтметром не можна. При підключенні до джерела струму вольтметра з опором R_g через вольтметр буде проходити струм. За законом Ома для повного (замкнутого) кола сила струму визначається за формулою

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

де r – внутрішній опір джерела струму.

Напруга, виміряна вольтметром $U = IR_g$. Тому

$$U = \mathcal{E} - I r .$$

Отже, виміряна вольтметром напруга U , менша від е.р.с. джерела на величину падіння напруги $I r$ на внутрішньому опорі джерела. Тому для вимірювання е.р.с. створюють умови, за яких струм через джерело не проходить ($I = 0$). При цьому $\mathcal{E} = U$. Саме цього досягають компенсаційним методом, що ґрунтується на компенсації (врівноважуванні) е.р.с, яку вимірюють, напругою, створеною на відомому опорі струмом від допоміжного джерела.

У даній роботі для здійснення методу компенсації використовують три джерела: з невідомою е.р.с \mathcal{E}_x , з е.р.с. \mathcal{E}_0 (еталон) і допоміжне з е.р.с. \mathcal{E} , яка більша від \mathcal{E}_x та \mathcal{E}_0 . Ці джерела включені однойменними полюсами назустріч один одному (рис 1). У колі джерела \mathcal{E} тече струм I , який створює падіння напруги на компенсаційному опорі R . У прецизійних вимірюваннях опором R є

спеціальні магазини опорів. У нашому випадку опір R – це реохорд ab , виконаний з однорідного тонкого дроту, натягнутого на масштабну лінійку, вздовж якої переміщується контактний повзунок C . При вимірюванні невідомої е.р.с. \mathcal{E}_x відшуковують таке положення контактного повзунка C , при якому стрілка гальванометра G встановлюється на нулі. Це означає, що е.р.с. \mathcal{E}_x скомпенсована падінням напруги Ir_x на ділянці ac , тобто:

$$\mathcal{E}_x = Ir_x \quad (1)$$

де I – сила струму на ділянці ab ; r_x – опір ділянки ac .

Якщо замість джерела \mathcal{E}_x у схему включити джерело з відомою е.р.с. \mathcal{E}_0 , то для її компенсації треба перемістити контактний повзунок у нове положення C_1 . Тоді замість співвідношення (1) матимемо:

$$\mathcal{E}_0 = Ir_0, \quad (2)$$

де r_0 – опір ділянки ac_1 .

Розділивши (1) на (2), отримаємо:

$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_0} = \frac{r_x}{r_0} \quad (3)$$

Ця рівність і лежить в основі порівняння е.р.с. за допомогою методу компенсації.

Для каліброваного дроту опори ділянок ac і ac_1 пропорційні їх довжинам: $r_x \sim l_x$, $r_0 \sim l_0$, тобто:

$$\frac{r_x}{r_0} = \frac{l_x}{l_0}. \quad (4)$$

Тому співвідношення (3) можна записати у вигляді:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 \frac{l_x}{l_0}. \quad (5)$$

У даній роботі еталоном є ртутно-кадмієвий нормальний елемент з $\mathcal{E}_0 = 1,01836 \text{ В}$.

УВАГА! Нормальний елемент не можна перевертати.

Порядок виконання роботи

1. Складають електричне коло за схемою (рис 1).

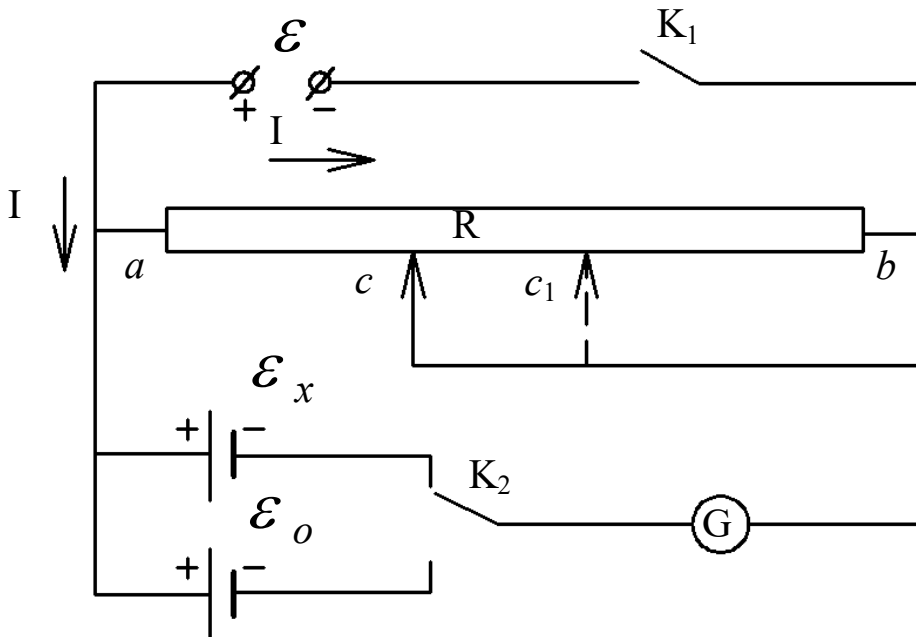


Рис. 1

2. Замикають ключ K_1 .
 3. Замикають ключ K_2 у коло з джерелом \mathcal{E}_x . Переміщують повзунок реохорда до відсутності струму (стрілка гальванометр G відхиляється) у колі елемента \mathcal{E}_x .

4. Вимірюють довжину плеча реохорда l_x між точками a і c .

5. Перемикають ключ K_2 у коло з джерелом \mathcal{E}_0 . Вимірюють l_0 , повторюючи п. п. 3,4.

6. Виміри l_x та l_0 , повторюють не менше трьох разів. Ключ K_2 замикають тільки на час визначення l_x і l_0 , тобто на час встановлення стрілки гальванометра на нуль, після чого його розмикають.

7. Обчислюють е.р.с. досліджуваного джерела за формулою :

$$\langle \mathcal{E}_x \rangle = \mathcal{E}_0 \frac{l_x}{l_0} .$$

8. Визначають відносну похибку $\varepsilon_{\varepsilon_x}$ за формулою:

$$\varepsilon_{\varepsilon_x} = \varepsilon_{l_x} + \varepsilon_{l_0} + \varepsilon_{\varepsilon_0}.$$

9. Розраховують довірчу границю сумарної похибки при довірчій імовірності $P \geq 0,95$:

$$\Delta_{\varepsilon_x} = < \varepsilon_x > \varepsilon_{\varepsilon_x}.$$

10. Заносять дані до таблиці

№ п/п	Табличні та задані величини	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань
	$\varepsilon_0, \text{В}$	$l_0, \text{м}$	$l_x, \text{м}$	$\varepsilon_x, \text{В}$

Запитання для самоперевірки та контролю

1. Поясніть роль сторонніх сил у колі постійного струму.
2. Що називають електрорушійною силою?
3. Що називають напругою на ділянці кола?
4. Запишіть і сформулюйте закон Ома для неоднорідної ділянки кола і для замкнутого кола.
5. Запишіть і сформулюйте перше і друге правила Кірхгофа.
6. Сформулюйте суть методу компенсації.

РОБОТА 3.3. ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ МЕТАЛІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

Мета роботи: набути навиків вимірювання опорів за допомогою містка Уїнстона, визначити температурний коефіцієнт опору металу.

Причиною електричного опору металу є розсіювання електронів на дефектах кристалічної решітки (дефект решітки – це будь-яке порушення періодичності її структури). Природним джерелом дефектів решітки є коливальний рух атомів. Тому при підвищенні температури опір металу зростає.

Температурний коефіцієнт опору провідника α визначає відносний приріст опору R , при збільшенні температури T на один кельвін

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}.$$

У загальному випадку α є функцією температури. Однак для металів зміна α з температурою незначна. Тому для температур, значно нижчих від температури плавлення, наближено можна вважати α сталим коефіцієнтом, який дорівнює його середньому значенню у досліджуваному температурному інтервалі. Отже, якщо R_0 – це опір металу при 0°C , а R – його значення при $t^\circ\text{C}$, то :

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

У цьому наближенні опір лінійно зростає із зростанням температури, а константа α визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot t}. \quad (1)$$

Вивчення залежності опору металу від температури і визначення константи α становить зміст даної роботи. Опір провідника, що досліджується, визначають за допомогою містка Уїнстона (рис. 1). Він складається з реохорда ab , чутливого нуля-гальванометра G і двох опорів – відомого R (магазин опорів) і невідомого R_t (відрізок дроту, намотаний на каркас у вигляді котушки і поміщений у нагрівач – електричну піч). Реохорд ab – це однорідна дротина, укріплена на масштабній лінійці, вздовж якої може переміщуватись контактний повзунок C . Опори R_t , R , r_1 , r_2 утворюють плечі містка.

Переміщаючи контакт C , можна знайти на реохорді таку точку, потенціал якої φ_c дорівнює потенціалу φ_d у точці D . У цьому випадку сила струму I через гальванометр G зменшується до нуля ($I = 0$). Таке положення називається рівновагою містка, при якому падіння напруги на ділянках ac і ad однакові:

$$I_1 \cdot R_t = I_2 \cdot r_1. \quad (2)$$

і падіння напруги на ділянках cb і cd теж однакові:

$$I_1 \cdot R = I_2 r_2. \quad (3)$$

Розділивши (2) на (3), отримаємо умову рівноваги містка:

$$\frac{R_t}{R} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (4)$$

Для каліброваної дротини відношення r_1/r_2 можна замінити відношенням плечей реохорда l_1/l_2 ($l_1 = ac$, $l_2 = cb$).

Після цього рівність (4) набуває вигляду:

$$R_t = R \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (5)$$

Це співвідношення використовується для порівняння опору R_t , що досліджується, з відомим опором R . Найточнішими є вимірювання при $l_1 = l_2$ та $R_t = R$.

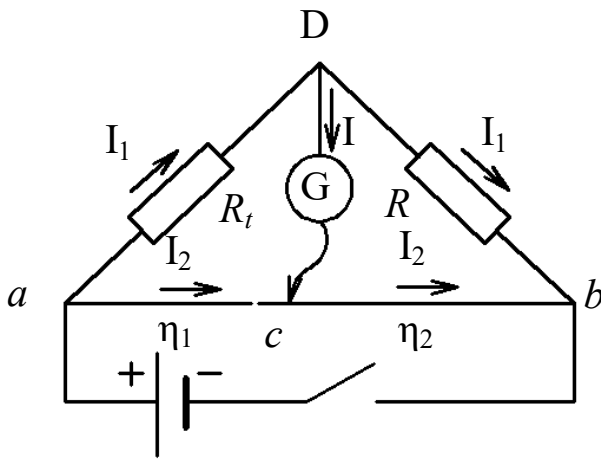


Рис. 1

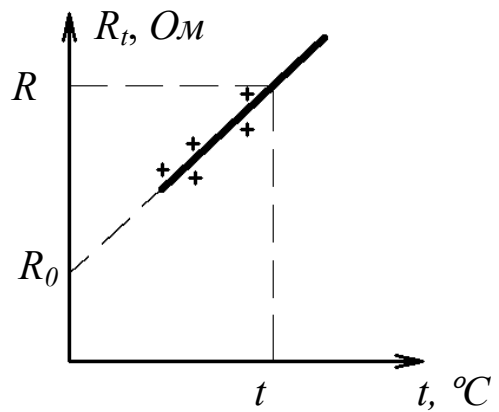


Рис. 2

Порядок виконання роботи

1. Складають коло містка Уїнстона.
2. Вимірюють температуру провідника термометром і визначають його опір R_t . Для цього контакт C ставлять на середину реохорда ($l_1 = l_2$), а декади опорів магазину – на нульові відмітки. Замикають ключ K . Стрілка гальванометра відхилиться, бо $R_t \geq R$. Врівноважують місток, збільшуючи опір магазину R доти, поки сила струму через гальванометр G не стане дорівнювати нулю. У цьому випадку згідно з формулою (5) $R_t = R$. Значення l_1 , l_2 , R_t , R і t заносять до таблиці.

№ п/п	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань	
	l_1 , см	l_2 , см	t , °С	R , Ом	R_t , Ом	α , К ⁻¹

3. Вмикають нагрівач і аналогічно визначають опір R_t при різних температурах t з інтервалом 5–10 °С. До таблиці заносять дані для 6–7 значень температури. Вимірювання проводять до температури 80 – 90 °С.

4. На міліметровому папері будують графік залежності $R_t = f(t)$, відкладаючи по осі абсцис значення температури, а по осі ординат – значення опору. Пряму лінію проводять так, щоб експериментальні точки розміщувались приблизно симетрично по обидва боки від неї.

5. За графіком знаходять значення R_0 , продовжуючи пряму до перетину з віссю R_t при $t = 0$ °С (рис.2), точка перетину визначає значення R_0 . Користуючись даними графіка, обчислюють значення α за формулою:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot t}.$$

Запитання для самоперевірки та контролю

1. Як і чому опір металу залежить від температури?
2. Навести означення температурного коефіцієнту опору. Порядок його величини для металів.
3. Чому гальванометр у містку Уїнстона повинен мати двобічну шкалу з нулем посередині?
4. Виведіть умову рівноваги містка Уїнстона.
5. Які переваги методу визначення опору містком Уїнстона порівняно з методом амперметра і вольтметра?
6. Сформулюйте правила Кірхгофа, застосуйте їх до вузлів і контурів містка Уїнстона.

4. МОДУЛЬ 4. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ.

4.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ

Силовою характеристикою магнітного поля є векторна фізична величина – **магнітна індукція** \vec{B} .

Напрямок вектора магнітної індукції встановлюється за результатом дії магнітного поля на: 1) провідник зі струмом; 2) магнітну стрілку; 3) заряджену частинку, що рухається в магнітному полі; 4) рамку зі струмом.

За напрям вектора \vec{B} у даній точці магнітного поля приймається напрям, вздовж якого розташовується позитивна нормаль \vec{n} вільної рамки зі струмом, вміщеної у цю точку поля. В цьому ж напрямку вказує і північний полюс магнітної стрілки, вміщеної в цю точку поля.

Напрямок позитивної нормалі рамки зв'язаний з напрямком струму правилом правого гвинта (правилом свердлика): якщо обертальний рух головки гвинта збігається з напрямком струму в рамці, то поступальний рух вістря вказує напрямком нормалі \vec{n} , отже напрямком лінії магнітної індукції \vec{B} , що проходить через дану точку поля.

Вектор \vec{B} у даній точці збігається з дотичною в цій точці до лінії магнітної індукції. Магнітне поле є **вихровим**, його **силові лінії замкнені**.

Модуль вектора магнітної індукції у будь-якій точці поля визначається максимальним обертальним моментом, який діє з боку поля на рамку, по якій протікає одинична сила струму, з одиничною площею поверхні, коли нормаль \vec{n} рамки перпендикулярна до напрямку ліній магнітного поля:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS} . \quad (1)$$

Одиниця вимірювання магнітної індукції в СІ – тесла (Тл).

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1} .$$

Зв'язок магнітної індукції \vec{B} з напруженістю \vec{H} магнітного поля:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна стала (абсолютна магнітна проникність вакууму), μ – магнітна проникність ізотропного середовища;. У вакуумі $\mu = 1$, тоді магнітна індукція у вакуумі

$$\vec{B}_0 = \mu_0\vec{H}.$$

Принцип суперпозиції.

З досліду витікає, що в будь-якій точці магнітного поля, створеного замкнутим провідником зі струмом довільної форми, магнітна індукція \vec{B} залежить від форми провідника. Це означає, що в будь-якій точці поля магнітна індукція \vec{B} створюється кожною ділянкою цього провідника, тобто для магнітних полів виконується принцип суперпозиції:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \Delta\vec{B}_i. \quad (2)$$

Вектор магнітної індукції \vec{B} у будь-якій точці магнітного поля, створеного замкненим провідником зі струмом довільної форми, являє собою геометричну суму індукцій $\Delta\vec{B}_i$ полів, створених у цій точці кожною окремою ділянкою даного провідника зі струмом.

Закон Біо-Савара-Лапласа визначає вектор магнітної індукції $d\vec{B}$, створений окремим нескінченно малим елементом dl замкнутого провідника зі струмом I в довільній точці:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}. \quad (3)$$

Магнітна індукція dB , створена елементом dl довільного замкнутого провідника зі струмом, прямо пропорційна силі струму в провіднику I , довжині елемента провідника dl , обернено пропорційна квадрату відстані від елемента dl до точки спостереження і залежить від орієнтації цього елемента в просторі.

У векторному вигляді цей закон можна записати так:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}, \quad (4)$$

Напрямок вектора $d\vec{B}$ визначається за правилом правого гвинта. Вектор $d\vec{B}$ перпендикулярний до площини, в якій лежать вектори $d\vec{l}$ і \vec{r} (рис. 1).

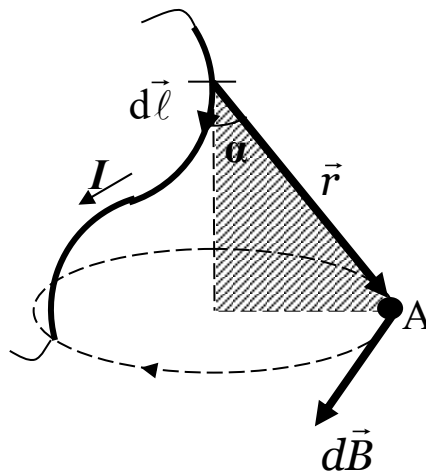


Рис. 1

Магнітна індукція в центрі колового струму:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}, \quad (6)$$

де R – радіус колового витка зі струмом, I – сила струму.

Магнітна індукція на осі колового струму:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + h^2)^{3/2}}, \quad (7)$$

де h – відстань від центра витка до точки, в якій визначається магнітна індукція.

Магнітна індукція поля, створеного нескінченно довгим прямолінійним провідником зі струмом:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0}, \quad (8)$$

де r_0 – відстань від осі провідника до точки, в якій визначається магнітна індукція.

Магнітна індукція поля, яке створюється відрізком провідника зі струмом (рис. 2, а):

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \quad (9)$$

Напрямок вектора магнітної індукції \vec{B} позначено крапкою \odot , яка означає, що вектор \vec{B} направлений перпендикулярно до площини рисунка (в напрямку “на нас”). У випадку, коли вектор \vec{B} направлений перпендикулярно до площини рисунка, але в напрямку „від нас” вектор \vec{B} позначаємо \otimes .

При симетричному розташуванні кінців провідника відносно точки, в якій визначається магнітна індукція (рис. 2, б), $-\cos\alpha_2 = \cos\alpha_1 = \cos\alpha$, тоді

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r_0} \cos\alpha.$$

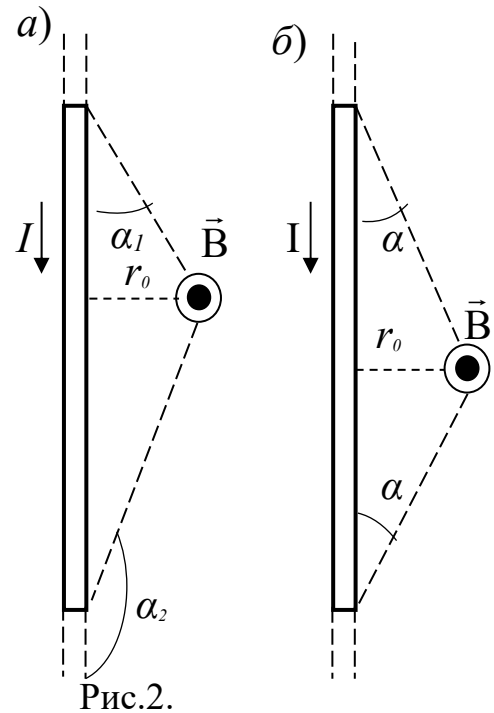


Рис.2.

Магнітна індукція поля соленоїда:

$$B = \mu\mu_0 nI,$$

де n – відношення числа витків соленоїда до його довжини.

Сила Ампера

Сила Ампера – це сила, що діє з боку магнітного поля на окрему ділянку dl провідника зі струмом I , що поміщений у магнітне поле:

Сила, що діє на провідник зі струмом в магнітному полі (закон Ампера):

$$\vec{F} = I[\vec{l} \times \vec{B}] \text{ або } F = IBl \sin\alpha,$$

де l – довжина провідника; α – кут між напрямком струму в провіднику та вектором магнітної індукції \vec{B} . Цей вираз дійсний для однорідного магнітного поля та прямого відрізка провідника. Коли поле неоднорідне і провідник не є прямим, то закон Ампера можна застосувати до кожного елемента провідника окремо:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \times \vec{B}] \text{ або} \quad (10)$$

$$dF_A = B I dl \sin \alpha, \quad (11)$$

де α – кут між вектором $d\vec{l}$ і \vec{B} ; напрямок вектора $d\vec{l}$ збігається з напрямком струму I в провіднику, а його модуль є нескінченно мала довжина провідника.

Напрямок сили Ампера визначається за правилом лівої руки, яке є наслідком правила векторного добутку (рис. 3).

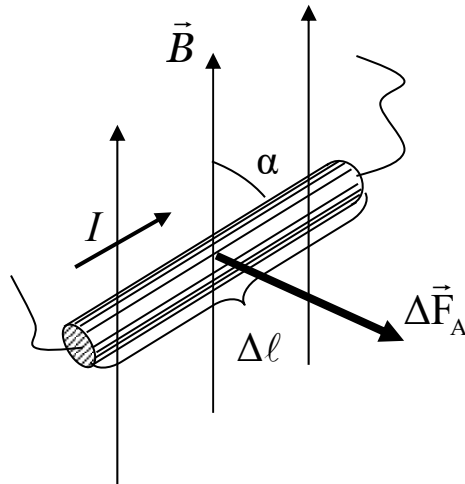


Рис. 3

Визначити індукцію магнітного поля B у будь-якій точці можна із закону Ампера, аналогічно (1):

$$B = \frac{F_A^{\max}}{Il}. \quad (12)$$

Взаємодія паралельних провідників зі струмами

Два електричних струми I_1 і I_2 взаємодіють між собою. Ця взаємодія здійснюється через магнітне поле. Сила F , з якою взаємодіють два паралельних струми I_1 та I_2 , прямо пропорційна добутку сил струмів, довжині l взаємодіючих провідників і обернено пропорційна відстані між ними:

$$F = k \frac{2I_1 I_2 l}{d}, \quad (13)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від вибору одиниць вимірювання і магнітних властивостей середовища, в якому здійснюється взаємодія. Для вакууму k визначається експериментально і у СІ його зручно записати так:

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала. Тому для сили взаємодії паралельних провідників зі струмами

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}, \quad (14)$$

де d – відстань між провідниками.

Магнітне поле струмів. Закон повного струму у вакуумі для магнітного поля

В основу сучасних методів розрахунку магнітних полів постійних струмів покладена теорема про циркуляцію вектора індукції (**закон повного струму**).

Циркуляція вектора магнітної індукції \vec{B} по довільному замкненому контуру l дорівнює добутку магнітної сталої μ_0 на алгебричну суму струмів, охоплених цим контуром:

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i. \quad (15)$$

Цей закон є аналогом теореми Гауса для електростатичного поля.

Магнітний момент плоского контуру зі струмом:

$$\vec{p}_m = \vec{n}IS, \quad (16)$$

де \vec{n} – одиничний вектор нормалі (позитивний) до площини контуру; I – сила струму, яка протікає по контуру; S – площа контуру.

Механічний (обертальний) момент, який діє на контур зі струмом, що поміщений в однорідне магнітне поле:

$$M = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \text{ або } M = p_m B \sin \alpha, \quad (17)$$

де α – кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} .

Потенціальна (механічна) енергія контуру зі струмом у магнітному полі, або точніше – частина повної потенціальної енергії, яка обумовлена наявністю механічного (обертального) моменту:

$$\Pi_{\text{мех}} = -\vec{p}_m \vec{B}, \quad \text{або} \quad \Pi_{\text{мех}} = -p_m B \cos \alpha. \quad (18)$$

Відношення магнітного моменту p_m до механічного L моменту імпульсу зарядженої частинки, яка рухається по коловій орбіті:

$$\frac{p_m}{L} = \frac{1}{2} \frac{q}{m}, \quad (19)$$

де q – заряд частинки; m – маса частинки.

Сила Лоренца – це сила, яка діє з боку магнітного поля з індукцією \vec{B} на частинку, що рухається в цьому полі зі швидкістю \vec{v} і має електричний заряд q , і визначається за формулою:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (21)$$

Модуль сили Лоренца визначається за формулою:

$$F_L = qvB \sin \alpha, \quad (20)$$

де α – кут між векторами \vec{v} і \vec{B} .

Напрямок сили \vec{F}_L визначається за правилом лівої руки: лінії вектора магнітної індукції \vec{B} входять у долоню, чотири пальці збігаються з напрямком вектора швидкості \vec{v} для позитивних зарядів ($q > 0$), у протилежному напрямку для негативних зарядів ($q < 0$), відігнутий великий палець вказує напрямок сили Лоренца (рис. 4).

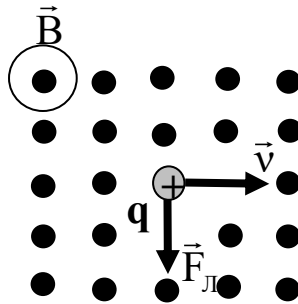


Рис. 4

Сила Лоренца завжди перпендикулярна до швидкості руху, отже вона змінює тільки напрямок швидкості частинки. Сила Лоренца роботи не виконує. Під дією сили Лоренца траєкторія викривляється.

Коли частинка знаходиться одночасно в електричному та магнітному полях, то під силою Лоренца (називають ще й узагальненою силою Лоренца) розуміють вираз:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (22)$$

Магнітний потік:

а) у випадку однорідного магнітного поля та плоскої поверхні

$$\Phi = BS \cos \alpha \text{ або } \Phi = B_n S,$$

де S – площа контуру; α – кут між нормаллю до площини контуру та вектором магнітної індукції:

б) у випадку неоднорідного поля і довільної поверхні

$$\Phi = \int_S B_n dS$$

(інтегрування ведеться по всій поверхні).

Потокозчеплення (повний потік):

$$\psi = N\Phi.$$

Ця формула використовується для соленоїда та тороїда з рівномірною намоткою N витків, які щільно прилягають один до одного.

Закон Фарадея-Максвелла для електромагнітної індукції

Явище електромагнітної індукції полягає в тому, що в замкнутому контурі при зміні магнітного потоку через поверхню, обмежену цим контуром, виникає електричний струм.

Виникнення індукційного струму в замкненому провіднику означає, що в колі діє електрорушійна сила, яка називається електрорушійною силою електромагнітної індукції.

Електрорушійна сила електромагнітної індукції \mathcal{E}_i , що створює струм у замкнутому контурі, чисельно дорівнює швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, охоплену цим контуром:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (23)$$

Знак мінус у формулі (23) є математичним виразом **правила Ленца**, згідно з яким індукційний струм, що виникає в замкнутому контурі, створює таке власне магнітне поле, яке протидіє причині виникнення даного індукційного струму, тобто зміні магнітного потоку, що збуджує цей струм (рис. 5).

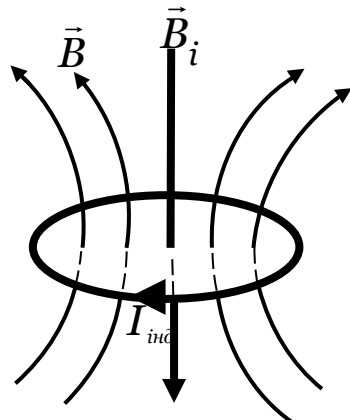


Рис. 5

Зовнішній магнітний потік збільшується:

$$\frac{d\Phi}{dt} > 0.$$

Робота магнітного поля при переміщенні замкнутого контуру в магнітному полі:

$$A = I\Delta\Phi.$$

Різниця потенціалів на кінцях провідника, який рухається зі швидкістю \vec{v} в магнітному полі:

$$U = Blv \sin\alpha.$$

Заряд, який протікає по замкнутому контуру при зміні магнітного потоку, що пронизує цей контур:

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \text{ або } Q = \frac{N\Delta\Phi}{R} = \frac{\Delta\psi}{R},$$

де R – опір контуру.

Індуктивність контуру:

$$L = \frac{\psi}{I}.$$

Електрорушійна сила самоіндукції:

$$\mathcal{E}_S = -L \frac{dI}{dt}. \quad (24)$$

Індуктивність соленоїда:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (25)$$

де n – відношення числа витків соленоїда до його довжини; V – об'єм соленоїда.

Миттєве значення сили струму в колі, що має опір R та індуктивність L :

$$\text{а) } I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right) \quad (\text{при вмиканні е.р.с.}),$$

де \mathcal{E} – е. р. с. джерела струму; t – час, який пройшов після вмикання е.р.с.;

$$\text{б) } I = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (\text{при вимиканні е.р.с.}),$$

де I_0 – сила струму в колі при $t = 0$; t – час, який пройшов з моменту вимикання е.р.с.

Енергія магнітного поля

Магнітне поле є матеріальним носієм енергії. Енергія магнітного поля провідника зі струмом I дорівнює:

$$W_B = \frac{LI^2}{2}, \quad (26)$$

де L – індуктивність провідника.

Енергію магнітного поля можна визначити через характеристики поля.

Враховавши, що для соленоїда

$$B = \mu\mu_0 nI; \quad (27)$$

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (28)$$

де n – кількість витків на одиницю довжини соленоїда, V – об'єм простору, охопленого полем (об'єм соленоїда), формулу (26) можна записати так:

$$W_B = \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2 V. \quad (29)$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля – енергія одиниці об'єму простору, охопленого полем:

$$\omega = \frac{BH}{2},$$

або
$$\omega = \frac{B^2}{2\mu\mu_0},$$

або
$$\omega = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}, \quad (30)$$

де B – магнітна індукція; H – напруженість магнітного поля.

Вільні гармонічні коливання в коливальному контурі

Диференціальне рівняння вільних гармонічних коливань заряду Q у контурі:

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{1}{LC}Q = 0. \quad (31)$$

Величина заряду Q змінюється за гармонічним законом:

$$Q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (32)$$

де ω_0 – власна частота контуру, тобто

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Період власних коливань контуру визначається за формулою Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (33)$$

Сила струму у коливальному контурі та напруга на обкладках конденсатора теж змінюється за гармонічним законом, відповідно:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}), \quad (34)$$

та

$$U_c = \frac{Q}{C} = \frac{Q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (34')$$

де

$$I_m = \omega_0 Q_m$$

та

$$U_m = \frac{Q_m}{C}$$

– амплітудні значення сили струму та напруги, відповідно.

4.2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 4 „ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ. ”

РОБОТА 4 - 1 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Мета роботи: вивчення законів руху заряджених частинок в електричному і магнітному полях; визначення питомого заряду електрона методом магнетрона (індикаторної лампи).

У даній роботі потрібно визначити питомий заряд електрона (відношення заряду електрона до його маси – $\frac{e}{m}$).

Принцип визначення питомого заряду ґрунтується на відхиленні електрона, що рухається в радіальному електричному полі, магнітним полем (метод магнетрона).

Магнетроном називається високовакуумна електронна лампа з розжареним катодом, у якій потік електронів керується одночасно електричним і магнітним полями. Як магнетрон у даній роботі використовується ламповий діод з циліндричним анодом A і прямолінійним катодом K , розміщеним вздовж осі симетрії анода (індикаторна лампа, рис. 1). Лампа вміщена в аксіальне (спрямоване паралельно до осі анода) однорідне магнітне поле \vec{B} , створене соленоїдом.

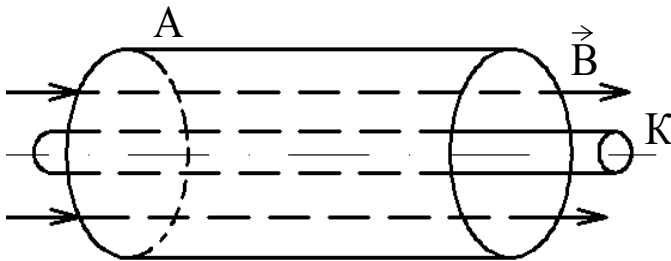


Рис. 1

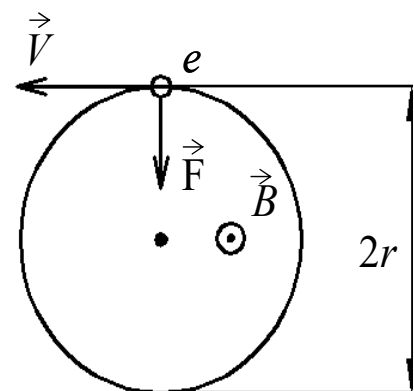


Рис. 2

На частинку із зарядом q , що рухається з швидкістю \vec{v} в магнітному полі, діє сила Лоренца.

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}].$$

Сила Лоренца перпендикулярна вектору швидкості \vec{v} частинки і вектору магнітної індукції \vec{B} , тому вона не виконує роботи, а лише змінює напрямок швидкості, не змінюючи її величини.

Якщо електрон рухається в однорідному магнітному полі перпендикулярно до лінії магнітної індукції, то величина сили Лоренца становить $F = evB$, де e – заряд електрона. В цьому випадку електрон рухається по колу (рис. 2, вектор \vec{B} перпендикулярний площині рисунка і спрямований "до нас"), а сила Лоренца грає роль доцентрової сили. Радіус кола r визначається із рівності:

$$evB = \frac{mv^2}{r}. \quad (1)$$

З формули (1) випливає, що радіус кола обернено пропорційний модулю вектора магнітної індукції :

$$r \sim \frac{1}{B}.$$

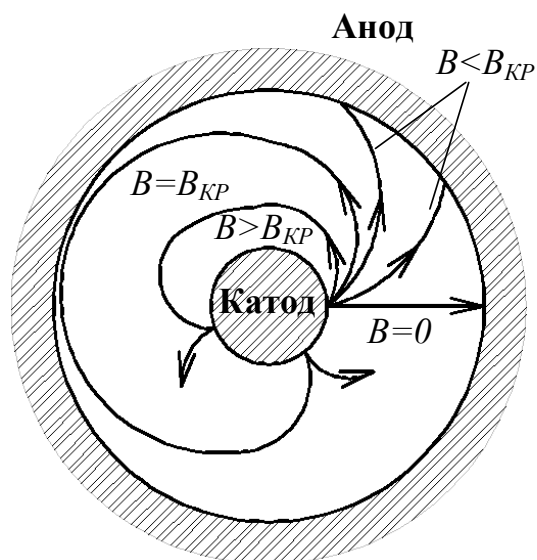


Рис. 3

У магнетроні джерелом електронів є розжарений катод. Електрони, що вилітають з катода, під дією прискорюючої різниці потенціалів U (анодної напруги) рухаються до анода і набувають кінетичної енергії $\frac{mv^2}{2}$, що дорівнює роботі сил електричного поля:

$$\frac{mv^2}{2} = e \cdot U. \quad (2)$$

За відсутності магнітного поля у соленоїді траєкторії цих електронів являють собою радіальні лінії. При включенні струму I через соленоїд у ньому виникає магнітне поле з індукцією

$$B = \mu_0 I n, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна стала ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$); n – число витків на одиниці довжини соленоїда. Магнітне поле викривляє траєкторії електронів. Тепер форма траєкторії є більш складною, ніж коло (або частина кола), оскільки на шляху від катода до анода швидкість електрона не є сталою величиною, а збільшується під дією радіального електричного поля.

У міру підсилення індукції магнітного поля траєкторії руху електронів все більше викривлятимуться і при деякому "критичному" значенні $B_{\text{кр.}}$ вони не досягатимуть анода і по замкнених траєкторіях повертатимуться на катод.

Після точного розрахунку критичного значення магнітної індукції одержуємо співвідношення:

$$B_{\text{кр.}}^2 = \frac{8U}{\frac{e}{m} \cdot r_A^2 \cdot \left(1 - \frac{r_K^2}{r_A^2}\right)^2}, \quad (4)$$

де r_K та r_A – відповідно радіуси циліндрів анода і катода. При $r_K \ll r_A$ відношенням r_K / r_A у формулі (4) можна знехтувати. В цьому наближенні з формули (4) знаходимо:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{\text{кр.}}^2 \cdot r_A^2} \quad (5)$$

(зазначимо, що останнє співвідношення формально можна одержати з формул (1) та (2), приймаючи $r = r_A$ (2).

Критичну індукцію $B_{кр}$ визначають, поступово збільшуючи силу струму I через соленоїд за допомогою реостата (рис. 4). При цьому електронний пучок все більше закручується у просторі між катодом і анодом і при $I = I_{кр}$ перестає досягати внутрішніх стінок катода.

Підставивши у формулу (5) значення $B_{кр} = \mu_0 I_{кр} n$, знаходимо питомий заряд електрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{\mu_0^2 \cdot n^2 I_{кр}^2 \cdot r_A^2} \quad (6)$$

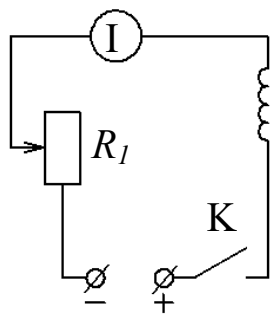


Рис. 4

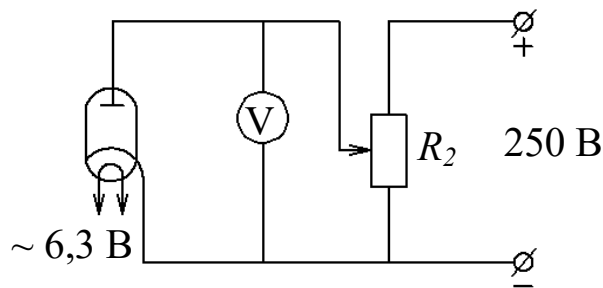


Рис. 5

Установка складається з двох незалежних електричних кіл: живлення соленоїда (рис. 4) і живлення та зміни анодного струму діода (рис. 5).

Порядок виконання роботи

1. Складають електричні кола за схемами (рис. 4 та 5).
2. Подають напругу розжарювання 6,3 В.
3. Включають анодну напругу 250 В. Потенціометром R_2 встановлюють напругу U , яку вимірюють вольтметром V .

4. Включають живлення соленоїда. Реостатом R_1 поступово збільшують силу струму I , стежачи за "вічком" лампи, щоб відмітити момент відриву пучка від внутрішніх стінок анода (анод темніє). Фіксують величину струму $I_{кр}$, що проходить через соленоїд.

5. Записують значення U та $I_{кр}$ до таблиці.

№ п/п	Задані величини		Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань
	$n, \text{м}^{-1}$	$r_A, \text{м}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$e/m, \text{Кл/кг}$
1					
2					
3					
$\langle x \rangle$					
$X_{\text{гр}}, \gamma$					
Δ					
ε					

6. Дослід повторюють три рази для різних значень анодної напруги, змінюючи напругу потенціометром R_2 .

7. Для кожного дослідів визначають величину питомого заряду електрона за формулою (6).

8. Обчислюють середнє значення $\langle \frac{e}{m} \rangle$ і порівнюють його з наведеним у довідниках.

9. Враховуючи лише систематичні похибки, визначають відносну похибку $\varepsilon_{e/m}$ одного з вимірювань:

$$\varepsilon_{e/m} = \varepsilon_u + 2\varepsilon_r + 2\varepsilon_I .$$

Визначають довірчу границю похибок:

$$\Delta_{e/m} = \langle \frac{e}{m} \rangle \cdot \varepsilon_{e/m} .$$

10. Оформляють звіт і роблять висновки.

Запитання для самоперевірки та контролю

1. Дайте означення магнітної силової лінії і графічно зобразіть магнітне поле соленоїда.
2. Запишіть вираз для магнітної індукції поля всередині соленоїда, поясніть зміст позначень. Одиниця її вимірювання в СІ.
3. Запишіть векторний вираз для сили Лоренца та вкажіть її напрямок.

4. Яку форму має траєкторія руху зарядженої частинки в однорідному магнітному полі?

РОБОТА 4 - 2

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи: вивчити взаємодію магнітних полів колового струму та Землі; визначити горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.

Прилади та обладнання: тангенс-гальванометр, джерело струму, реостат, перемикач.

Силовою характеристикою магнітного поля є вектор індукції магнітного поля \vec{B} . Індукція магнітного поля Землі невелика і змінюється від $0,4 \cdot 10^{-7}$ Тл на екваторі до $0,7 \cdot 10^{-7}$ Тл поблизу магнітних полюсів. Вектор магнітної індукції \vec{B} Землі можна розкласти на дві складові: горизонтальну $\vec{B}_Г$ та вертикальну $\vec{B}_В$. Закріплена на вертикальній осі магнітна стрілка встановлюється в напрямку горизонтальної складової $\vec{B}_Г$.

Горизонтальну складову магнітного поля Землі $\vec{B}_Г$ можна визначити за допомогою тангенс-гальванометра, що складається з тонкої котушки, в центрі якої розміщена стрілка (рис. 1). Котушка має кілька колових вертикальних витків. Перед початком роботи котушку встановлюють так, щоб магнітна стрілка розмістилась у площині витків. Якщо через котушку пропустити струм, то він створить магнітне поле $\vec{B}_К$. Вектор магнітної індукції $\vec{B}_К$ цього поля в центрі котушки спрямований перпендикулярно до $\vec{B}_Г$ – горизонтальної складової вектора індукції магнітного поля Землі. Стрілка приладу встановлюється вздовж рівнодійної \vec{B} обох векторів. Із рис. 2 видно, що:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_K}{B_G},$$

отже,

$$B_G = \frac{B_K}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (1)$$

Магнітна індукція \vec{B}_K у центрі тонкої котушки зі струмом визначається за виразом:

$$B_K = \mu_0 \frac{I}{2r} N, \quad (2)$$

де N – число витків котушки; r – її радіус, I – сила струму в котушці $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна стала.

З формул (1) і (2) випливає, що:

$$B_T = \mu_0 \frac{I N}{2r \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

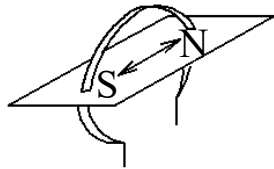


Рис. 1

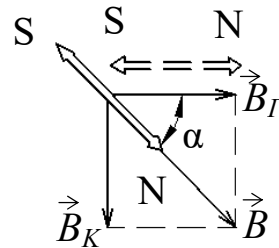


Рис. 2

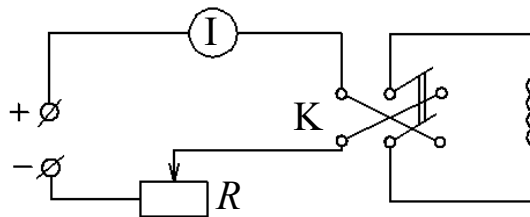


Рис. 3

Порядок виконання роботи

1. Складають електричне коло за схемою, зображеною на рис. 3.
2. Повертаючи підставку тангенс-гальванометра, встановлюють його витки в площині магнітного меридіана. У цьому випадку один із кінців магнітної стрілки повинен знаходитись на відмітці 0° або 180° .
3. Вмикають джерело струму і встановлюють реостатом силу струму I . Для двох напрямків установленого струму (напрямок струму в колі змінюють на протилежний перемикачем К) за лімбом бусолі відмічають кути повороту магнітної стрілки α_1 і α_2 , визначають α :

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}. \quad (4)$$

4. Вимірювання повторюють для трьох різних значень струму I і двох його протилежних напрямків. Для кожного заданого струму знаходять середнє значення кута повороту $\langle \alpha \rangle$.

5. За формулою (3) для кожного значення струму знаходять горизонтальну складову магнітного поля Землі \vec{B}_r .

6. Для одного із вимірів \vec{B}_r визначають відносну похибку:

$$\varepsilon_{B_r} = \varepsilon_r + \varepsilon_I + \varepsilon_{\text{tg}\alpha}, \quad \varepsilon_{\text{tg}\alpha} = \frac{2 \cdot \Delta_\alpha}{\sin 2\alpha}$$

де Δ_α виражається в радіанах.

7. Розраховують довірчу границю похибок:

$$\Delta_{B_r} = \langle B_r \rangle \cdot \varepsilon_{B_r}$$

8. Оформляють звіт та роблять висновки.

№ п/п	Задані величини	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань		
		N	I, A	R, m	α_1	α_2	α	$\text{tg } \alpha$
1								
2								
3								
$\langle x \rangle$								
$x_{гр}, \gamma$								
Δ								
E								

Запитання для самоперевірки та контролю

1. Визначення та одиниці вимірювання магнітної індукції в системі СІ.

2. Запишіть і сформулюйте Закон Біо-Савара-Лапласа, дайте ілюстрацію рисунком.

3. Отримайте вираз для напруженості та індукції магнітного поля в центрі колового витка зі струмом, використовуючи закон Біо-Савара-Лапласа.

4. Виведіть робочу формулу.

РОБОТА 4 - 3 ВИМІРЮВАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЇ ВЕКТОРА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА

Мета роботи: вивчити один з основних законів магнітного поля постійних струмів – закон повного струму; визначити циркуляцію вектора напруженості та напруженість магнітного поля соленоїда за допомогою пояса Роговського.

Прилади та обладнання: дзеркальний гальванометр, джерело постійного струму, міліамперметр, перемикач, соленоїд з відомим числом витків N_0 , досліджуваний соленоїд, пояс Роговського.

Джерелом магнітного поля є електричний струм (струм провідності, струм зміщення, або окремий рухомий електричний заряд. За своєю природою магнітне поле вихрове: його силові лінії замкнуті і завжди охоплюють провідник зі струмом. Характер поля (вихрове чи потенціальне) визначається циркуляцією вектора відповідного поля.

Циркуляцією вектора поля називають криволінійний інтеграл по замкненому контуру від скалярного добутку вектора поля на нескінченно малий елемент довжини контуру.

Отже, за визначенням циркуляція вектора напруженості магнітного поля \vec{H} запишеться у вигляді:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_L H_1 \cdot dl, \quad (1)$$

де $H_1 = H \cdot \cos(\vec{H} \cdot d\vec{l})$ – проекція вектора \vec{H} на $d\vec{l}$; L – замкнений контур, вздовж якого обчислюється циркуляція.

Якщо циркуляція вектора поля по довільному замкненому контуру дорівнює нулю, то поле називається **потенціальним** (наприклад, гравітаційне поле, електростатичне); для вихрового поля (магнітного) циркуляція відмінна від нуля.

В основу сучасних методів розрахунку магнітних полів постійних струмів покладена теорема про циркуляцію вектора напруженості \vec{H} , яка ще називається **законом повного струму**. Для

таких магнітних полів, як поле соленоїда, тороїда, прямолінійного струму, цей закон дозволяє розрахувати напруженість без застосування закону Біо-Савара-Лапласа.

Закон повного струму: циркуляція вектора напруженості \vec{H} магнітного поля по довільному замкненому контуру дорівнює алгебраїчній сумі струмів, охоплених цим контуром:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^N I_i, \quad (2)$$

де N – число струмів, охоплених контуром.

Метод вимірювання циркуляції вектора напруженості магнітного поля ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Якщо кінці невеликого дротяного витка замкнуті на балістичний гальванометр і розмістити виток у магнітному полі (з витком у цьому випадку зчеплений магнітний потік Φ), то при зникненні магнітного поля згідно з законом Ома через виток пройде короткочасний індукційний струм:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

де R – повний опір електричного кола витка; $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ – е.р.с індукції, що виникав у витку.

Повний заряд, який пройде в електричному колі витка за час зникнення магнітного потоку Φ :

$$q = \int_0^{\Phi} I dt = \frac{1}{R} \int_{\Phi}^0 d\Phi = \frac{\Phi}{R}. \quad (4)$$

Відхилення m світлового покажчика гальванометра пропорційне заряду q :

$$q = cm, \quad c = \text{const}. \quad (5)$$

Тому це відхилення дозволяє визначати заряд, а отже і магнітний потік:

$$\Phi = qR = c R m. \quad (6)$$

За означенням магнітний потік дорівнює:

$$\Phi = B S = \mu\mu_0 H \cdot S,$$

де S – площа витка, розміщеного перпендикулярно лініям індукції однорідного магнітного поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; μ – магнітна проникність середовища.

Якщо замість витка в магнітне поле помістити довгу котушку, то за час зникнення поля в колі котушки протече заряд, обумовлений короткочасною е.р.с. індукції у витках усієї котушки. Тоді:

$$\Phi = \mu\mu_0 \int_l S n \vec{H} d\vec{l},$$

n – густина намотки котушки; $n d\vec{l}$ – кількість витків на елементі довжини котушки $d\vec{l}$.

Якщо кінці котушки з'єднати (утворити замкнений контур L) і значення S та n вздовж усієї котушки вважати постійним, то:

$$\Phi = \mu\mu_0 S n \int_L \vec{H} d\vec{l}. \quad (7)$$

Цей магнітний потік вимірюється балістичним гальванометром так само, як і у випадку одного витка. Тобто, підставляючи у формулу (7) значення Φ із (6), знайдемо:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = km, \quad k = \frac{cR}{\mu\mu_0 S n} = \text{const}.$$

Циркуляцію вектора \vec{H} вимірюють за допомогою пояса Роговського (вузька двошарова котушка, намотана на гнучкий пас). Кінці обмотки приєднуються до балістичного гальванометра G (рис.1,а). Таку котушку можна представити як сукупність замкнутих витків і прямолінійних відрізків, що їх з'єднують (рис. 1,б та 1,в).

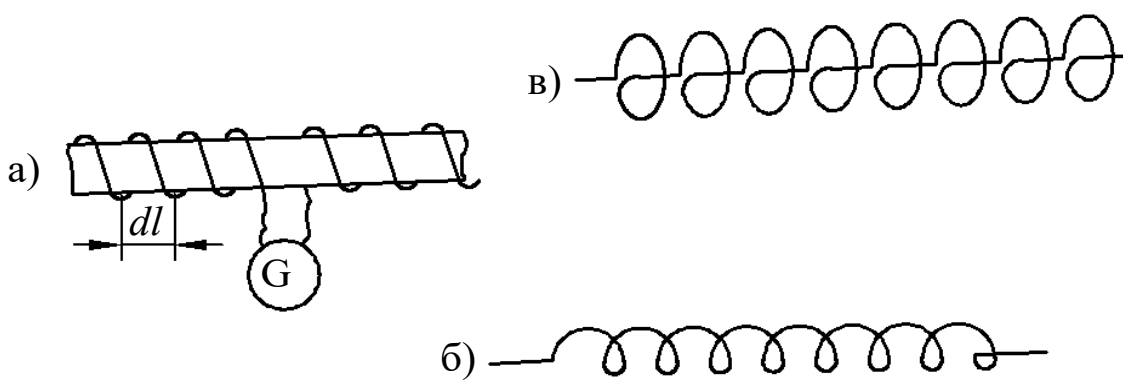


Рис. 1

Оскільки обмотка котушки двошарова, усувається дія прямолінійних відрізків і підвідних проводів (магнітні поля їх взаємно компенсуються), а магнітне поле пояса Роговського складається тільки з магнітних полів колових витків, які враховуються при визначенні потоку Φ (формула 6).

Для вимірювань пояс Роговського пропускають спочатку через еталонний соленоїд з числом витків N_0 , по якому проходить струм силою I , потім через досліджуваний соленоїд з невідомим числом витків для того ж значення струму.

Фіксуючи відхилення m і m_0 світлового покажчика гальванометра, запишемо формулу (8) для обох соленоїдів:

$$\oint_L \vec{H}_0 d\vec{l} = km_0, \quad (9)$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = km. \quad (10)$$

Із закону повного струму (2), записаного для магнітного поля еталонного соленоїда, одержимо:

$$\oint_L \vec{H}_0 d\vec{l} = N_0 I, \quad (11)$$

де контур L збігається з віссю пояса Роговського.

Враховуючи (11), із співвідношенням для циркуляції вектора напруженості магнітного поля досліджуваного соленоїда маємо:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_0 I \frac{m}{m_0}. \quad (12)$$

Підрахуємо значення циркуляції вектора \vec{H} магнітного поля досліджуваного соленоїда. Якщо соленоїд достатньо довгий, то його магнітне поле сконцентроване практично тільки всередині. А отже, в значення циркуляції вектора \vec{H} для такого поля внесок зробить тільки активна частина контуру L , рівна довжині соленоїда l .

Тоді для досліджуваного соленоїда, вважаючи його достатньо довгим, наближено можна записати:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot l, \quad (13)$$

звідки напруженість \vec{H} магнітного поля досліджуваного соленоїда дорівнює:

$$H = \frac{L}{l} \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}. \quad (14)$$

Порядок виконання роботи

1. Складають електричне коло за схемою рис. 2. 2. Вмикають у коло еталонний соленоїд з відомим числом витків N_0 .

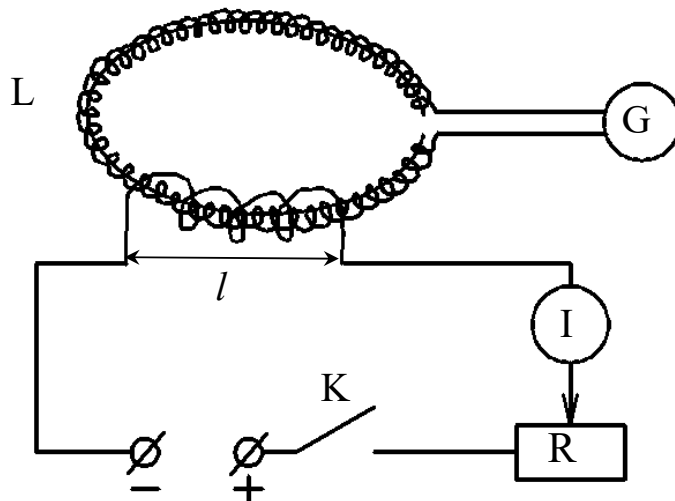


Рис. 2

2. Через соленоїд пропускають пояс Роговського, приєднуючи виходи його обмотки до дзеркального гальванометра G . Вимірюють довжину соленоїда l .

3. Встановлюють у колі соленоїда значення сили струму.

4. При розмиканні кола соленоїда ключем K відмічають максимальне відхилення m_0 світлового покажчика гальванометра G . Для даного значення сили струму I дослід повторюють тричі, обчислюють середнє значення $\langle m_0 \rangle$.

5. Замінюють еталонний соленоїд досліджуваним. Для того ж самого струму I вимірюють максимальне відхилення m світлового

показника гальванометра при розмиканні кола соленоїда. Дослід повторюють тричі. Обчислюють середнє значення $\langle m \rangle$.

6. Вимірювання за п. 4 та п. 5 повторюють для трьох різних значень сили струму I . Результати дослідів заносять до таблиці.

7. Для кожного із значень сили струму I обчислюють середнє значення циркуляції та напруженості поля всередині досліджуваного соленоїда за формулами (12) та (14).

8. Для одного із значень сили струму I оцінюють похибки вимірювань циркуляції та напруженості за формулами:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\oint \vec{H} d\vec{l}} &= \varepsilon_m + \varepsilon_{m_0} + \varepsilon_I + \varepsilon_{N_0}; & \varepsilon_H &= \varepsilon_{\oint \vec{H} d\vec{l}} + \varepsilon_I; \\ \Delta_{\oint \vec{H} d\vec{l}} &= \langle \oint \vec{H} d\vec{l} \rangle \cdot \varepsilon_{\oint \vec{H} d\vec{l}}; & \Delta_H &= \langle H \rangle \cdot \varepsilon_H. \end{aligned}$$

№ п/п	Задані величини	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань	
		N_0	$L, \text{ м}$	$I, \text{ А}$	m_0	m	$\oint \vec{H} d\vec{l}, \text{ А}$
1							
2							
3							
$\langle x \rangle$							
Δ							
ε							
1							
2							
3							
$\langle x \rangle$							
1							
2							
3							
$\langle x \rangle$							

Запитання для самоперевірки та контролю

1. Сформулюйте і запишіть закон Біо-Савара-Лапласа.
2. Дайте означення циркуляції вектора поля, поясніть рисунком.

3. Укажіть основну різницю між вихровим та потенціальним полями.
4. Сформулюйте закон повного струму та застосуйте його до розрахунку напруженості магнітного поля соленоїда.
5. В чому полягає явище електромагнітної індукції? Запишіть та сформулюйте основний закон електромагнітної індукції.
6. Поясніть необхідність подвійної намотки у поясі Роговського.
7. З означення циркуляції вектора \vec{H} виведіть формулу (14).

РОБОТА 4 - 4 ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТОНКОЇ КОТУШКИ

Мета роботи: дослідити магнітне поле колового струму за допомогою осцилографа; визначити силову характеристику магнітного поля – магнітну індукцію \vec{B} .

Прилади та обладнання: тонка котушка діаметром 30–40 см з панелью, датчик-котушка, джерело змінного струму, осцилограф, амперметр.

Силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції \vec{B} , величину і напрямок якого можна визначити за дією поля на розміщений у ньому достатньо малий елемент із струмом або замкнутий виток із струмом.

Одиницею вимірювання магнітної індукції в СІ є тесла (Тл):

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Індукція магнітного поля колового струму на осі витка на відстані h від центра витка (рис. 1) спрямована вздовж цієї осі і виражається формулою:

$$B = \mu\mu_0 \frac{IR^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

З формули (1) випливає, що в центрі витка (точка O , $h = 0$) індукція магнітного поля дорівнює:

$$B_0 = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (2)$$

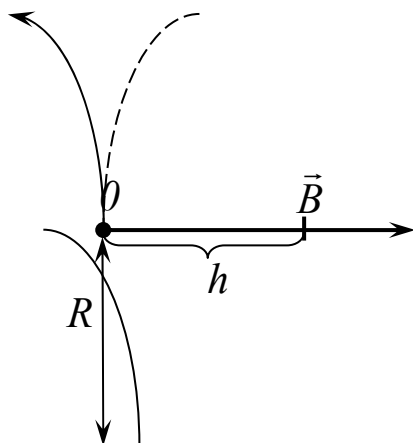


Рис. 1

Метод дослідження магнітного поля колового струму (тонка котушка зі струмом) за допомогою датчик-котушки ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Якщо в котушці, магнітне поле якої досліджується, струм змінюється за гармонічним законом, то відповідно до закону електромагнітної індукції у датчик-котушці виникатиме електрорушійна сила індукції \mathcal{E}_i , амплітудне значення якої (в наближенні малого розміру датчик-котушки) пропорційне значенню вектора індукції магнітного поля $\mathcal{E}_i \sim B$. Величина \mathcal{E}_i реєструватиметься підключеним до датчик-котушки осцилографом.

Очевидно, що величина індукції магнітного поля B у деякій точці на осі досліджуваної котушки буде зв'язана з величиною індукції в центрі котушки (в точці O , де $h = 0$) простим співвідношенням:

$$B = B_0 \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_{i0}}. \quad (3)$$

Із формули (3) випливає, що \mathcal{E}_i та \mathcal{E}_{i0} можна вимірювати як у вольтах, так і у відносних величинах сигналів на екрані осцилографа.

Тому:

$$B = B_0 \frac{l}{l_0}, \quad (4)$$

де l – довжина відповідної світової смужки на екрані осцилографа; l_0 – максимальна довжина смужки, що відповідав положенню датчика в центрі котушки.

Порядок виконання роботи

1. Складають електричну схему (рис.2). Підключають досліджувану котушку до блока живлення і встановлюють указану викладачем силу струму; підключають датчик-котушку до осцилографа.

2. Закріплюють на панелі досліджуваної котушки міліметровий папір.

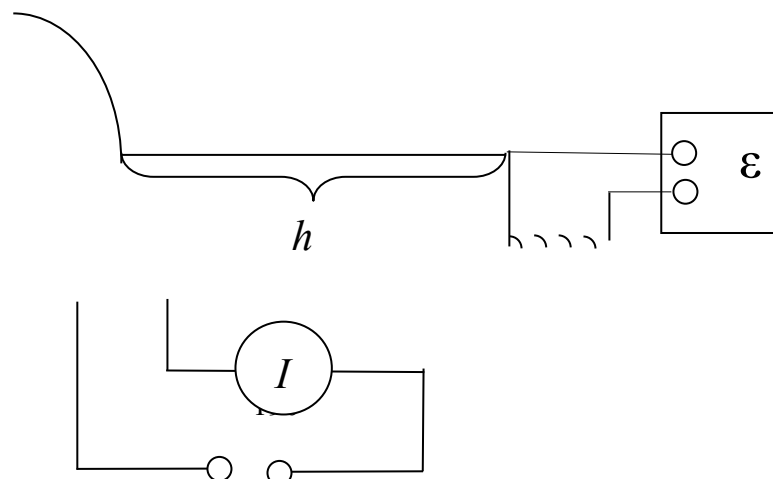


Рис. 2

3. Встановлюють датчик-катушку в центрі досліджуваної катушки в одній площині з нею.

4. За допомогою ручки "Підсилення" на осцилографі домагаються того, щоб максимальне значення е.р.с. \mathcal{E}_{i0} , що виникає в датчик-катушці, відповідало сигналу на всю шкалу на екрані осцилографа l_0 .

5. Розраховують значення магнітної індукції в центрі досліджуваної катушки за формулою:

$$B_0 = \mu_0 \frac{I_0 N}{2R}, \quad (5)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; N – кількість витків у катушці; R – її радіус; I_0 – амплітудне значення сили струму в досліджуваній катушці.

Значення I_0 розраховується за формулою:

$$I_0 = \sqrt{2} \cdot I_{ef.},$$

де $I_{ef.}$ – ефективне значення сили струму, яке показує прилад.

6. Визначають значення е.р.с. електромагнітної індукції в датчик-катушці (довжину сигналу l на екрані осцилографа) на різних відстанях від центра досліджуваної катушки на її осі через 1 см. Результати вимірювань l заносять до таблиці.

7. Визначають і заносять до таблиці значення магнітної індукції B у різних точках на осі досліджуваної катушки за формулою (4).

8. Будують графік залежності $B = f(h)$. На цьому ж графіку будують теоретично одержану за формулою (1) криву залежності $B^{теор.} = f(h)$, враховуючи кількість витків у катушці.

№ п/п	Прямі вимірювання					Непрямі вимірювання			
	$R, \text{ м}$	N	$I_{ef.}, \text{ А}$	$h, \text{ м}$	l	l/l_0	$I_0, \text{ А}$	$B, \text{ Тл}$	$B_{теор.}, \text{ Тл}$

Запитання для самоперевірки та контролю

1. Дайте визначення векторів магнітної індукції та напруженості магнітного поля.

2. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
3. Запишіть та сформулюйте закон електромагнітної індукції.
4. Запишіть та сформулюйте закон Біо-Савара-Лапласа.
5. Запишіть вираз для обчислення величини магнітної індукції в центрі колового струму.

5. МОДУЛЬ 5 „Оптика”

5.1. Основні положення теорії

Видиме світло (світлове випромінювання)

Світлове випромінювання (видиме світло) є електромагнітними хвилями з діапазоном довжин хвиль у вакуумі від $\lambda_{\text{фіол.}}$ (фіолетове) ≈ 390 нм до $\lambda_{\text{черв.}}$ (червоне) ≈ 780 нм. Як правило, заокруглюючи, вважають цей діапазон рівним (400 – 800) нм, тобто (0,4 – 0,8) мкм або $(0,4 - 0,8) \cdot 10^{-6}$ м.

Враховуючи зв'язок між довжиною хвилі, швидкістю розповсюдження c і частотою коливань ν , можна записати:

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

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі.

Довжинам хвиль видимого світла відповідає частотний інтервал від $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц (фіолетове) до $4 \cdot 10^{14}$ Гц (червоне).

Швидкість світла в середовищі:

$$V = \frac{c}{n},$$

де c – швидкість світла у вакуумі; n – абсолютний показник заломлення середовища.

За електромагнітною теорією Максвелла швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль в ізотропному середовищі дорівнює:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

Абсолютним показником заломлення світла називається величина, яка показує в скільки разів швидкість світла у вакуумі більша, ніж у даному середовищі:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Рівняння плоскої електромагнітної хвилі має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} E_z &= E_{\max} \cdot \sin(\omega t - ky); \\ H_x &= H_{\max} \sin(\omega t - ky), \end{aligned} \right\}$$

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\omega = 2\pi\nu$ – хвильове число та циклічна частота, відповідно.

Вектор густини потоку електромагнітної енергії (**вектор Пойнтінга**) характеризує перенесення електромагнітної енергії в напрямку розповсюдження хвилі (вздовж осі y) і має вигляд:

$$\vec{J} = [\vec{E} \times \vec{H}],$$

а модуль вектора \vec{J} дорівнює:

$$\vec{J} = \left(\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2} E^2 + \frac{\mu\mu_0}{2} H^2 \right) \cdot \nu,$$

де ν – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в середовищі.

Графічно “моментальну фотографію” розподілу величини та напрямку векторів напруженості електричного та магнітного полів у світловій хвилі можна представити так, як показано на рис.1.

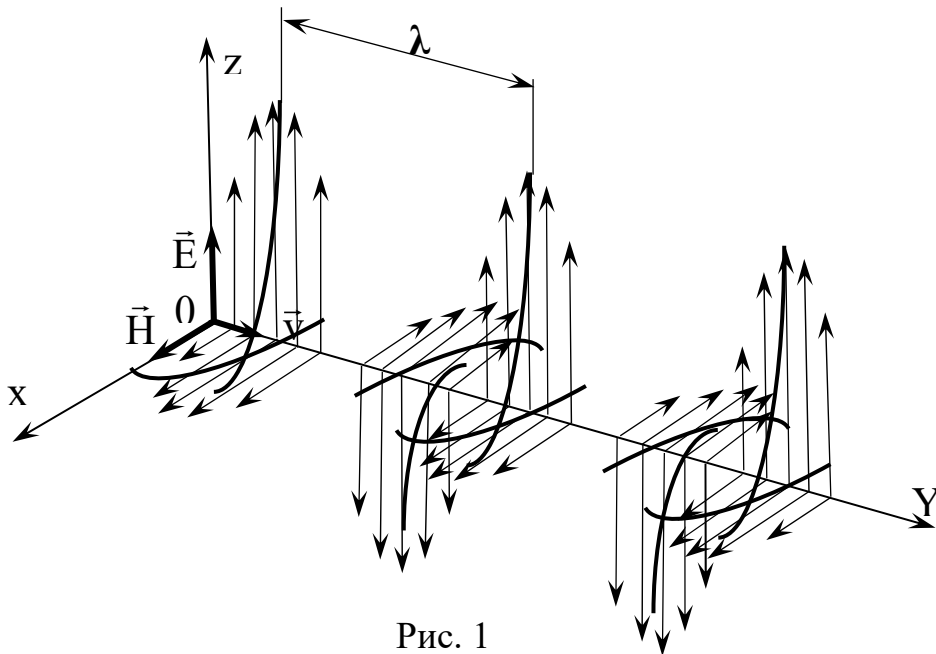


Рис. 1

Закони геометричної оптики

В ізотропному середовищі світло поширюється прямолінійно. Лінія, вздовж якої переміщується фронт хвилі, називається **променем**.

Напрямок поширення світла змінюється на межі поділу середовищ з різними оптичними густинами (рис. 2).

Розглянемо закони, яким підпорядковуються оптичні явища, що відбуваються на межі поділу двох прозорих середовищ. Ці оптичні явища описуються законами геометричної оптики.

1. Закон відбивання світла:

а) промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр, поставлений до поверхні у точці падіння променя лежать в одній площині;

б) кут відбивання променя дорівнює куту його падіння.

2. Закон заломлення світла:

а) промінь падаючий і промінь заломлений лежать в одній площині з перпендикуляром, поставленим у точці падіння променя до поверхні поділу двох середовищ;

б) відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для даних середовищ є величина стала і називається показником заломлення другого середовища відносно першого (відносний показник заломлення n_{21}):

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

де v_1 і v_2 – швидкості поширення світла в першому і другому середовищах; n_1 і n_2 – абсолютні показники заломлення.

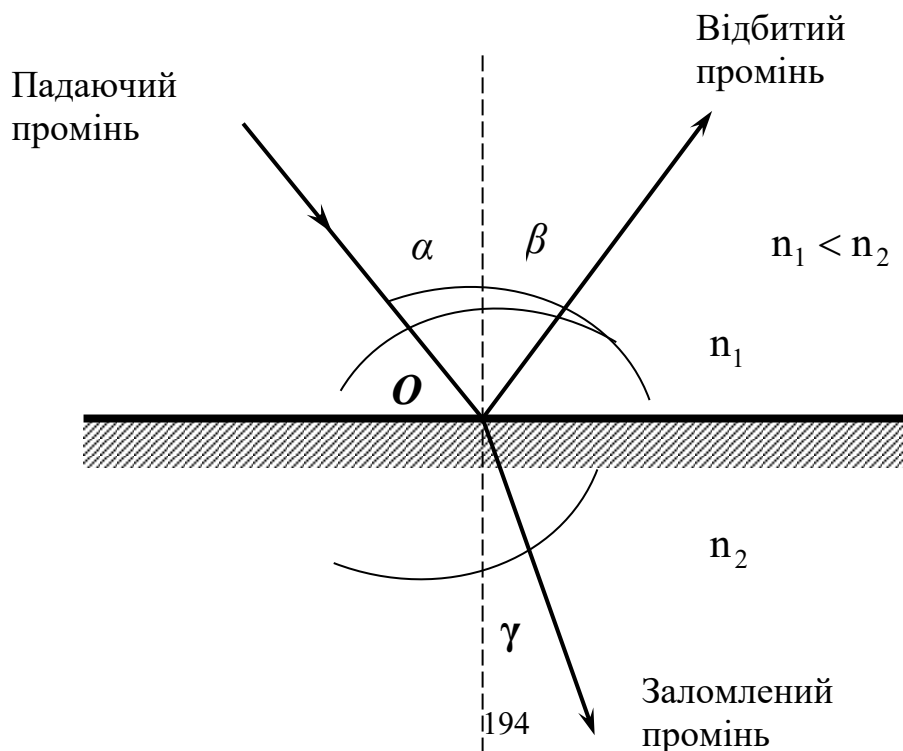


Рис. 2

Явище повного внутрішнього відбивання – відбивання світлових хвиль, які йдуть із середовища з більшою оптичною густиною на межі із середовищем менш оптично густим, повністю повертаються в перше середовище. Повне внутрішнє відбивання має місце при переході світлового променя з оптично більш густого середовища n_1 в оптично менш густе середовище n_2 ($n_1 > n_2$). При граничному куті падіння γ_{gp} заломлений промінь $1O1'$ ковзає вздовж поверхні поділу цих середовищ (рис. 3).

Якщо промінь $1O1'$ піде в зворотному напрямку (із оптично менш густого середовища n_2 в оптично густіше n_1), то на основі принципу оборотності світлових променів картина залишається такою ж: падаючий і заломлений промені лише поміняються ролями. Для ковзаючого променя в точці O маємо:

$$\sin \gamma_{gp} = \frac{n_2}{n_1}.$$

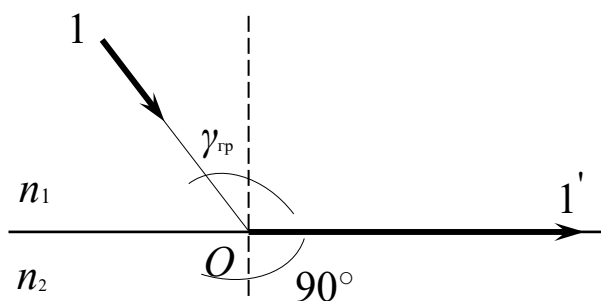


Рис. 3

Хвильова оптика

Оптична довжина ходу світлової хвилі:

$$L = nl,$$

де l – геометрична довжина ходу світлової хвилі в середовищі з показником заломлення n .

Оптична різниця ходу двох світлових хвиль:

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

Залежність різниці фаз від оптичної різниці ходу світлових хвиль:

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{\Delta}{\lambda}\right),$$

де λ – довжина світлової хвилі.

Умова максимального підсилення світла при інтерференції:

$$\Delta = \pm\kappa\lambda = \pm 2\kappa\frac{\lambda}{2} (\kappa = 0, 1, 2, \dots).$$

Умова максимального ослаблення світла:

$$\Delta = \pm(2\kappa + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Оптична різниця ходу світлових хвиль, яка виникає при відбиванні монохроматичного світла від тонкої плівки:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} + \frac{\lambda}{2}$$

чи

$$\Delta = 2dn \cos i_2 + \frac{\lambda}{2},$$

де d – товщина плівки; n – показник заломлення плівки; i_1 – кут падіння; i_2 – кут заломлення світла в плівці.

Радіус світлових кілець Ньютона у відбитому світлі:

$$r_k = \sqrt{(2\kappa - 1)R\lambda/2} (\kappa = 1, 2, 3, \dots),$$

де κ – номер кільця; R – радіус кривизни.

Радіус темних кілець Ньютона у відбитому світлі:

$$r_k = \sqrt{\kappa R\lambda}.$$

Кут φ відхилення променів, які відповідають максимумам (світлі смуги) при дифракції на одній щілині, визначається з умови:

$$a \sin \varphi = (2\kappa + 1)\lambda/2 (\kappa = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

де a – ширина щілини; κ – порядковий номер максимумів.

Детальніше розглянемо **явище інтерференції та дифракції на дифракційній решітці (гратці)**, оскільки це явище вивчається також детально і в лабораторному практикумі.

Дифракційна решітка – це сукупність великої кількості паралельних, рівновіддалених один від одного штрихів, нанесених на прозору поверхню. Штрихи повністю розсіюють падаюче на них світло і є для нього непрозорими ділянками, а проміжки між штрихами пропускають світло і виконують роль щілин. Штрихи

можуть бути нанесені механічним, фото- та голографічним методами тощо. Кількість штрихів N на одиницю довжини визначає можливість застосування дифракційної решітки для роботи в різних областях спектра. Так, у рентгенівській області $N = 6000$, в ультрафіолетовій – 2000, у видимій – 300, в інфрачервоній – 0,25 штрихів на 1 мм. Відстань d , через яку повторюються штрихи (рис.4), називається постійною (або періодом) решітки, $d = 1/N$.

Розглянемо проходження світла через дифракційну решітку з періодом d .

Для того, щоб визначити положення максимумів у дифракційній картині, розглянемо дві сусідні щілини (рис. 4) і виберемо в першій щілині будь-яку точку 1. Другу точку 2 виберемо на відстані d від точки 1 (такі точки називають відповідними).

Промені, які виходять з відповідних точок і поширюються під кутом φ до напрямку падаючого світла, максимально підсилюють один одного при накладанні, якщо різниця ходу Δ цих променів ($\Delta = d \cdot \sin \varphi$) вміщує ціле число довжин хвиль:

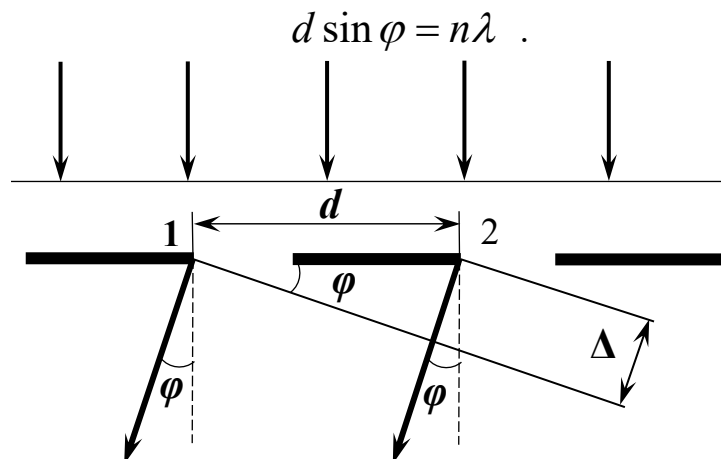


Рис. 4

Виконання цієї умови, наприклад для першої і другої щілин, автоматично означає виконання його для другої і третьої, третьої і четвертої щілин і т. д., тобто для всієї решітки в цілому. Тому цю формулу називають **формулою дифракційної решітки**. Вона визначає напрямок головних максимумів у дифракційній картині. Дифракційний спектр складається з центральної білої смуги і розміщених симетрично від неї максимумів першого, другого і більш високих порядків.

Ціле число n у формулі називається порядком максимумів, оскільки воно визначає порядковий номер максимуму, відрахованого

від центра екрана (не рахуючи центрального, $n = 0$).

Для спостереження дифракційної картини в лабораторному практикумі використовують схему, зображену на рис. 5.

Перед джерелом світла L (лампю розжарення) розміщують екран E , в центрі якого є вертикальна щілина $Щ$. Дифракційна решітка встановлюється між екраном та оком спостерігача так, щоб її штрихи були паралельні щілині $Щ$. Дифракційна картина проектується кришталиком на сітчатку ока, куди одночасно проектується і зображення міліметрової шкали, розміщеної на екрані в площині щілини. Складається враження, що дифракційний спектр розміщений на поверхні шкали. Але це не так, у площині шкали спектра немає. В цьому легко впевнитись, розглянувши її збоку. В площині шкали розміщено тільки уявне зображення, яке є повною копією дифракційного спектра.

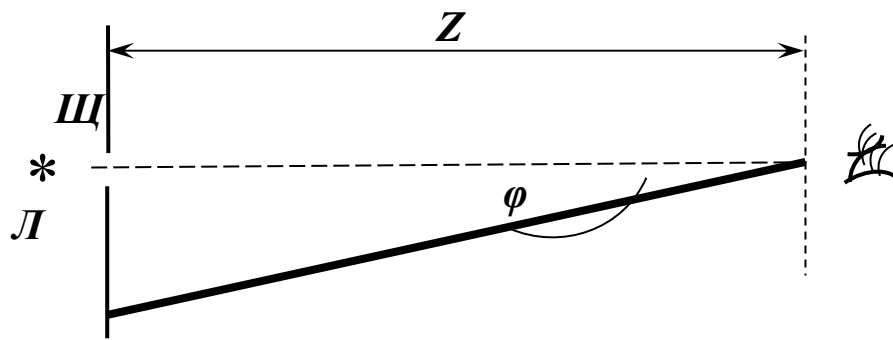


Рис.5

З формули для максимумів дифракційної решітки випливає, що

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{n},$$

де d – період решітки; n – порядок спектра; φ – кут дифракції (рис.5). При малих його значеннях

$$\sin \varphi \cong \operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{z},$$

де l – відстань від центрального максимуму до лінії в уявному спектрі; z – відстань від решітки до щілини.

Використовуючи останній вираз, отримаємо формулу для визначення довжини хвилі:

$$\lambda = \frac{l \cdot d}{n \cdot z}.$$

Роздільна здатність дифракційної решітки:

$$R = \lambda / \Delta\lambda = nN,$$

де $\Delta\lambda$ – найменша різниця довжини хвиль двох сусідніх спектральних ліній (λ та $\lambda + \Delta\lambda$), при якій ці лінії можуть бути видимі роздільно в спектрі, який одержаний за допомогою даної решітки; N – повне число щілин решітки.

Формула Вульфа - Бреггів:

$$2d \sin \theta = \kappa\lambda,$$

де θ – кут ковзання (кут між напрямком паралельного пучка рентгенівського випромінювання, що падає на кристал, та атомною площиною в кристалі: d – відстань між атомними площинами кристала).

Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} i_1 = n_{21},$$

де i_1 – кут падіння, при якому відбившись від діелектрика промінь стає повністю поляризованим; n_{21} – відносний показник заломлення другого середовища відносно першого.

Закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

де I_0 – інтенсивність плоскополяризованого світла, що падає на аналізатор; I – інтенсивність цього світла після аналізатора; α – кут між напрямком коливань електричного вектора, який падає на аналізатор, та площиною пропускання аналізатора. Коли напрям коливання електричного вектора падаючого світла збігається з площиною, то аналізатор пропускає це світло без ослаблення.

Кут повороту площини поляризації монохроматичного світла при проходженні крізь оптично активну речовину:

$$\text{а) } \varphi = \alpha d \text{ (у твердих тілах),}$$

де α – постійна обертання; d – довжина шляху, який пройшло світло в оптично активній речовині;

$$\text{б) } \varphi = [\alpha] \rho d \text{ (в сумішах),}$$

де $[\alpha]$ – питоме обертання; ρ – масова концентрація оптично активної речовини в розчині.

Квантова оптика

Аналіз складу світлового випромінювання показав, що його розподіл за частотами коливань не відповідає законам

випромінювання, виведеним із хвильової теорії світла. Для пояснення цього факту Планк сформулював гіпотезу, що світло випромінюється певними **порціями енергії – квантами**. Енергія кванта визначається за формулою Планка:

$$\varepsilon = h\nu,$$

де $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; ν – частота коливань електромагнітного випромінювання.

Ейнштейн в 1905 р. висунув гіпотезу щодо дискретної природи світлового випромінювання, тобто про можливість розповсюдження світлової хвилі в просторі окремими **квантами** (частинками світлового випромінювання, що названі **фотонами**).

Закони теплового випромінювання

Випромінювання нагрітими тілами електромагнітних хвиль за рахунок їхньої внутрішньої енергії називається **тепловим випромінюванням**.

Теплове випромінювання характеризується неперервним спектром. Інтенсивність і спектральний склад теплового випромінювання визначається в першу чергу температурою тіла.

Теплове випромінювання – єдиний вид випромінювання, який може бути рівноважним. До рівноважних станів і процесів застосовуються закони термодинаміки. Наведемо деякі характеристики теплового випромінювання.

1. Спектральна густина енергетичної світності (випромінюваність) тіла – це потужність випромінювання з одиниці площі поверхні тіла в інтервалі частот одиничної ширини:

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{випр.}}{d\nu}.$$

Одиниця спектральної густини енергетичної світності $(R_{\nu,T}) - \frac{Дж}{м^2}$.

2. Здатність тіл поглинати падаюче на них випромінювання характеризується спектральною поглинальною здатністю:

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{погл.}}{dW_{\nu,\nu+d\nu}}.$$

Ця величина показує, яка доля енергії електромагнітних хвиль, що падає на одиницю площі поверхні тіла за одиницю часу з частотою

від ν до $\nu+dv$, поглинається тілом. Тіло, яке здатне поглинати повністю при будь-якій температурі усе падаюче на нього випромінювання будь-якої частоти, називається **абсолютно чорним тілом**. Отже, спектральна поглинальна здатність чорного тіла для усіх частот і температур тотожно рівна одиниці: $A_{\nu,T}^{чорне} \equiv 1$. Поряд з поняттям абсолютно чорного тіла використовують поняття сірого тіла. **Сіре тіло** – це тіло, поглинальна здатність якого менша одиниці, вона однакова для всіх частот і залежить тільки від температури, матеріалу і стану поверхні тіла ($A_{\nu,T}^{сіре} = A_T = const < 1$).

Знаючи спектральну густину енергетичної світності можна визначити **інтегральну енергетичну світність (інтегральну випромінювальність)**, яку називають **енергетичною світністю тіла**:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu,T} d\nu.$$

Енергетична світність тіла – це енергія, випромінювана з одиниці площі поверхні тіла, що світиться, за одиницю часу у всьому інтервалі частот (довжин хвиль) від 0 до ∞ .

Закон Кірхгофа

Відношення спектральної густини енергетичної світності до спектральної поглинальної здатності не залежить від природи тіла; це відношення є універсальною функцією частоти (довжини хвилі) для всіх тіл при даній температурі:

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}.$$

Із цього закону витікає, що $r_{\nu,T}$ – універсальна функція Кірхгофа – є **спектральна густина енергетичної світності чорного тіла**.

Використовуючи закон Кірхгофа, запишемо вираз для енергетичної світності чорного тіла.

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu.$$

Теплове випромінювання чорного тіла підлягає **законам Стефана-Больцмана і Віна**, а розподіл енергії в спектрі теплового випромінювання чорного тіла підлягає розподілу, що називається **функцією Планка**.

Закон Стефана-Больцмана

Енергетична світність чорного тіла пропорційна четвертому степеню його термодинамічної температури:

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

де R – інтегральна енергетична світність абсолютно чорного тіла;
 σ – стала Стефана-Больцмана, що має значення $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴;
 T – абсолютна термодинамічна температура, виражена в Кельвінах (К).

Закон Стефана-Больцмана не відповідає на питання про спектральний розподіл випромінювання чорного тіла. Аналіз експериментальних кривих залежності $r_{\lambda,T}$ від довжини λ при різних температурах показав, що розподіл енергії в спектрі чорного тіла є нерівномірним. Всі криві мають явно виражений максимум, який зі зростанням температури зміщується в більш високочастотну область. Для максимуму кривої розподілу встановлений **закон зміщення Віна**:

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

де λ_{\max} – довжина хвилі, на яку приходить максимум енергії випромінювання; b – стала Віна. Цей закон свідчить, що довжина хвилі λ_{\max} , яка відповідає максимальному значенню спектральної густини енергетичної світності $r_{\lambda,T}$ чорного тіла, обернено пропорційна його термодинамічній температурі (рис.6). Експериментальне значення сталої Віна $b=2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К.

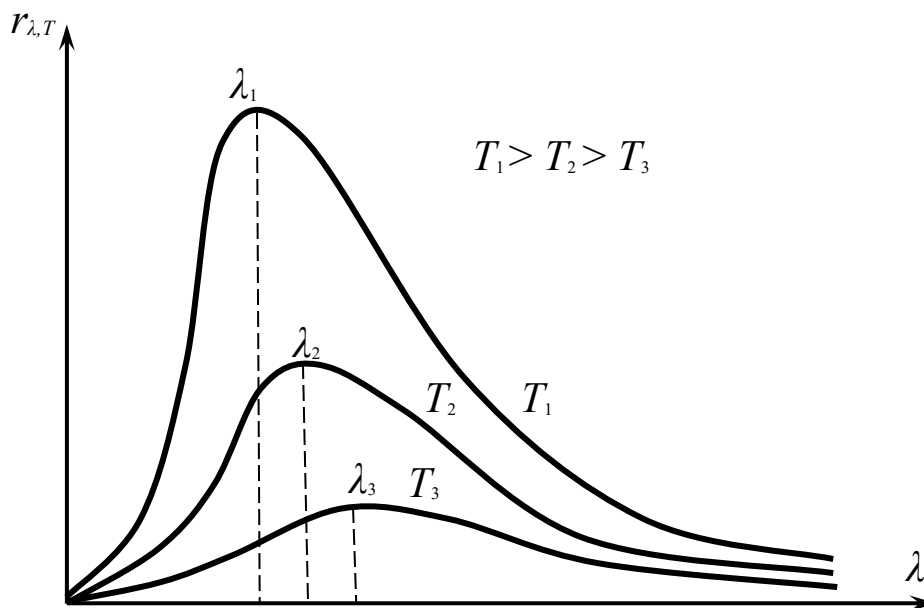


Рис.6

Закони Стефана-Больцмана і Віна є експериментальними законами теплового випромінювання. На основі квантової гіпотези, згідно з якою електромагнітна енергія випромінюється і поглинається у вигляді квантів, Планк **теоретично** вивів формулу для спектральної густини енергетичної світності чорного тіла:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Ця формула Планка не тільки узгоджується з експериментом, але містить усі часткові закони теплового випромінювання, а також дозволяє розрахувати сталі величини в законах теплового випромінювання.

Гіпотеза світлових квантів випромінювання чорного тіла отримала підтвердження і подальший розвиток при поясненні явища **фотоефекту**.

Явище зовнішнього фотоефекту полягає у випусканні речовиною електронів під дією падаючого світла.

Закони зовнішнього фотоефекту

1. Сила фотоструму насичення пропорційна освітленості фотокатода.
2. Максимальна кінетична енергія фотоелектронів не залежить від інтенсивності падаючого світла, а визначається тільки його частотою ν .
3. Для кожної речовини існує “червона межа” фотоефекту, тобто мінімальна частота ν_0 світла, нижче якої фотоефект неможливий (або, існує максимальна довжина хвилі, вище якої фотоефект неможливий).

Важливо відмітити, що фотоефект є безінерційним.

У рамках квантової теорії фотоефекту кожний світловий квант (фотон) взаємодіє лише з **одним** електроном. Енергія падаючого фотона $h\nu$ витрачається на здійснення електроном роботи виходу A з речовини та на надання фотоелектрону кінетичної енергії.

Формула Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = A + T_{\max} = A + mV_{\max}^2/2,$$

де $h\nu$ – енергія фотона, що падає на поверхню металу; A – робота виходу електрона; T_{\max} – максимальна кінетична енергія фотоелектрона.

Червона границя фотоефекту (червона межа фотоефекту):

$$\nu_0 = A/h, \text{ чи } \lambda_0 = hc/A,$$

де ν_0 – мінімальна частота світла, при якій фотоэффект ще можливий; λ_0 – максимальна довжина хвиль світла, при якій ще можливий фотоэффект; h – стала Планка; c – швидкість світла у вакуумі.

В явищах фотоэффекту світло виявляє свої корпускулярні властивості. З рівняння Ейнштейна для фотоэффекту випливає, що фотоэффект може спостерігатись тільки тоді, коли енергія $h\nu$ світлового кванта (фотона), що падає на поверхню речовини, не менша роботи виходу A . Отже, якщо освітлювати речовину світлом різних частот, поступово переходячи від менших до більших (тобто від довших до коротших довжин хвиль), то фотоэффект виникатиме тільки після досягнення червоної границі фотоэффекту, $\nu_0 = A/h$ – межі, що відповідає нульовому значенню швидкості фотоелектронів, $V = 0$.

Як приклад, у таблиці наведено значення роботи виходу та червоної границі $\lambda_0 = c/\nu_0$ для деяких чистих металів.

Метал	Cs	K	Na	Li	Ta	Hg	Au	Fe	Ag
A , еВ	1,88	2,26	2,20	2,48	4,07	4,54	4,68	4,74	4,76
λ_0 , нм	660	550	540	500	305	273,5	265	262	261

Фотон, що падає на метал, може поглинатися (повністю) одним з його вільних електронів. Це означає, що енергія $h\nu$, яка існувала до цього моменту у формі кванта світла (електромагнітна енергія), перетворюється в кінетичну енергію електрона. Якщо частота світла ν перевищує червону границю (тобто $\nu > \nu_0$), то за рахунок поглинутої енергії електрон може виконати роботу виходу A і вилетіти з металу. Однак не всі, а лише деякі фотони дають такий ефект: один вирваний світлом електрон (фотоелектрон) припадає приблизно на тисячу фотонів, що падають на метал. Інші фотони поглинаються вільними електронами, не вириваючи їх з металу (навіть при $\nu > \nu_0$). Енергія, що отримується таким способом електронами, передається атомам металу і перетворюється в енергію теплового руху – метал нагрівається.

Позначимо через N_e число електронів, які вириваються щосекунди світлом з одиниці площі поверхні металу, а через N_ϕ – число фотонів, які падають щосекунди на одиницю площі тієї ж поверхні. Природно вважати, що ці величини пропорційні одна одній:

$$N_e \sim N_\phi. \quad (1)$$

Інтенсивність світла I визначається кількістю електромагнітної енергії, що переноситься за одиницю часу через одиничну площадку, перпендикулярну напрямку розповсюдження енергії. Отже, для монохроматичного світла $I = h\nu \cdot N_\phi$, таким чином,

$$N_e \sim I. \quad (2)$$

Співвідношення (2) виражає одну з перелічених закономірностей фотоефекту: кількість фотоелектронів пропорційна інтенсивності світла. Для спостереження фотоефекту використовується схема, показана на рис. 7. Тут K – пластинка металу, що освітлюється; A – друга пластинка, яку приєднано разом з першою через гальванометр Γ до відповідних полюсів батареї B . Електрони, що звільняються світлом частотою $\nu > \nu_0$ з пластини K (катода), під дією різниці потенціалів летять до пластини A (анода) і далі проходять по провідниках через гальванометр, замикаючи струм батареї B . Як бачимо, фотоефект дозволяє перетворювати енергію світла в електричну. Таке перетворення відбувається в будь-якому фотоелементі.

На рис. 8 наведено типову вольт-амперну характеристику вакуумного фотоелемента – залежність сили струму I , що проходить через фотоелемент (фотоструму), від прикладеної до нього напруги U , $I = I(U)$.

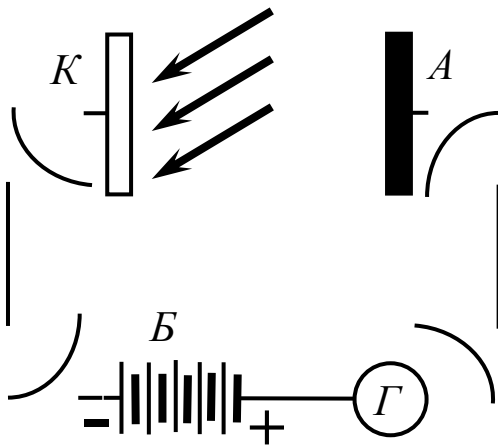


Рис. 7

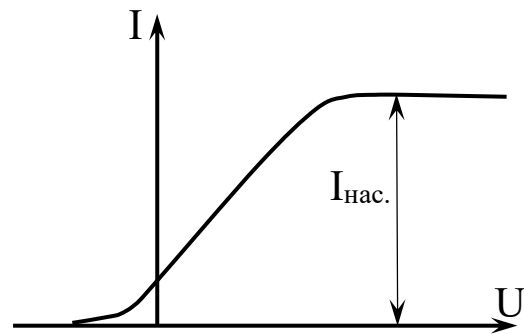


Рис. 8

У разі збільшення прискорюючої (на катоді “ - “, на аноді “ + ”) напруги фотострум I зростає, досягаючи постійного значення $I_{нас}$ (струм насичення). Навпаки, поле направлене так, щоб гальмувати рух електронів від катода до анода (на катоді “+”, на аноді “-“), зменшує струм і навіть може звести його до нуля. Насичення струму настає, тоді коли всі звільнені світлом електрони досягають анода. Це означає, що

$$I_{нас} = eN_e S, \quad (3)$$

де e – заряд електрона; S – площа поверхні катода, що освітлюється. Таким чином, кількість вирваних світлом електронів можна визначити, вимірюючи фотострум насичення.

Беручи до уваги співвідношення (2), робимо висновок, що

$$I_{нас} \sim I, \quad (4)$$

тобто фотострум насичення пропорційний інтенсивності світла.

Для експериментальної перевірки цієї закономірності в роботі використовується те, що інтенсивність I світла, яке випромінює точкове джерело, при збільшенні відстані r від нього зменшується за законом:

$$I \sim \frac{1}{r^2}. \quad (5)$$

Відповідно до (4) така ж залежність повинна спостерігатися і для величини $I_{нас}$.

Ефект Комптона (розсіяння кванта рентгенівського випромінювання на вільному або слабозв’язаному електроні).

Формула для зсуву довжини хвилі розсіяного кванта рентгенівського випромінювання:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

або

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

де λ – довжина хвилі фотона, що зустрівся з вільним чи слабо – зв’язаним електронем; λ' – довжина хвилі фотона, розсіяного на кут θ після зіткнення з електронем; m_0 – маса електрона, який знаходиться у спокої.

Коефіцієнт, що входить у цю формулу називається КОМПТОНІВСЬКОЮ ДОВЖИНОЮ ХВИЛІ:

$$\Lambda = h/(m_0 c) \quad .$$

Коефіцієнт Λ є сталою величиною, що дорівнює:

$$\Lambda = 2,430 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 2,430 \text{ нм}$$

Тиск світла при нормальному падінні на поверхню:

$$p = E_0(1 + \rho)/c = \omega(1 + \rho),$$

де E_0 – енергетична освітленість; ω – об’ємна густина енергії випромінювання; ρ – коефіцієнт відбивання.

Маса, імпульс фотона. Корпускулярно–хвильовий дуалізм світла

Енергія фотона:

$$\varepsilon = h\nu, \quad \varepsilon = \hbar\omega,$$

де h – стала Планка; \hbar – стала Планка, що поділена на 2π ; ν – частота фотона; ω – циклічна частота.

Маса фотона визначається універсальним співвідношенням маси та енергії Ейнштейна:

$$m_\gamma = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Фотон – елементарна частинка, яка рухається зі швидкістю світла c і має масу спокою, рівну нулю.

Імпульс P_γ визначається співвідношенням:

$$P_\gamma = m_\gamma c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

де c – швидкість світла у вакуумі; λ – довжина хвилі фотона.

Із наведених формул витікає, що фотон, як і будь-яка інша частинка речовини, характеризується енергією, масою та імпульсом. Ці формули зв’язують корпускулярні характеристики фотона – масу, імпульс, енергію – з хвильовою характеристикою світла – його частотою ν . Отже, для світла, як і будь-якого електромагнітного випромінювання притаманні одночасно корпускулярні і хвильові властивості – **корпускулярно-хвильовий дуалізм**.

5.2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 5 „Оптика”

РОБОТА 5 - 1. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОСКОПА

Мета роботи: вивчити принцип дії мікроскопа і за його допомогою визначити показник заломлення n скляної пластинки.

Прилади та обладнання: мікроскоп, скляна плоскопаралельна пластинка, мікрометр.

Обґрунтування методу вимірювання

Світловий промінь, який падає на межу поділу двох прозорих середовищ, частково відбивається, а частково заломлюється (рис.1)

Згідно з законом заломлення світла заломлений промінь лежить у площині падіння, а відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ для двох даних середовищ з різною оптичною густиною є величиною сталою:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} . \quad (1)$$

Стала величина n_{21} називається **відносним показником заломлення другого середовища відносно першого.**

Відносний показник заломлення n_{21} зв'язаний з абсолютними показниками першого і другого середовищ n_1 і n_2 співвідношенням:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} . \quad (2)$$

Абсолютним показником заломлення середовища називається величина n , яка вимірюється відношенням швидкості C світлових хвиль у вакуумі до їх фазової швидкості V у середовищі:

$$n = \frac{c}{V} . \quad (3)$$

Оптична густина середовища характеризує залежність швидкості світла від природи середовища і вимірюється абсолютним показником заломлення. Оптична густина вакууму (повітря) дорівнює

одиниці.

Якщо предмет розглядати через плоскопаралельний шар прозорої речовини з більшою, ніж у повітря оптичною густиною, то зображення цього предмета спостерігається на відстані, ближчій до очей спостерігача, ніж сам предмет.

Це явище використовується при вимірюванні показника заломлення скла.

На рис.2 показано як утворюється зображення світної точки O (мітка), яка знаходиться на нижній поверхні плоскопаралельної скляної пластинки. Зображення O_1 цієї точки спостерігається між нижньою і верхньою поверхнями пластинки. Це пояснюється заломленням світла на межі поділу “скло – повітря”. Промінь світла OA , пройшовши крізь пластинку, заломлюється і потрапляє в око спостерігача. Продовження заломленого променя (показано штриховою лінією) на перетині з променем OB дає уявну точку O_1 . Ця точка знаходиться на відстані d_1 – уявній товщині пластинки.

З рис.2 видно, що $d_1 < d$, де d – дійсна товщина пластинки, а

$$\operatorname{tg} \alpha = AB / d_1, \quad \operatorname{tg} \gamma = AB / d.$$

При малих кутах α і γ значення їх тангенсів можна замінити на синуси цих кутів:

$$\operatorname{tg} \alpha \cong \sin \alpha, \quad \operatorname{tg} \gamma \cong \sin \gamma.$$

Таким чином, із закону заломлення і рис.2 випливає, що

$$n \equiv n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \cong \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \gamma} = \frac{d}{d_1},$$

тобто

$$\boxed{n = \frac{d}{d_1}} \quad (4)$$

Як бачимо, визначення показника заломлення n скла зводиться до вимірювання дійсної d і уявної d_1 товщини пластинки.

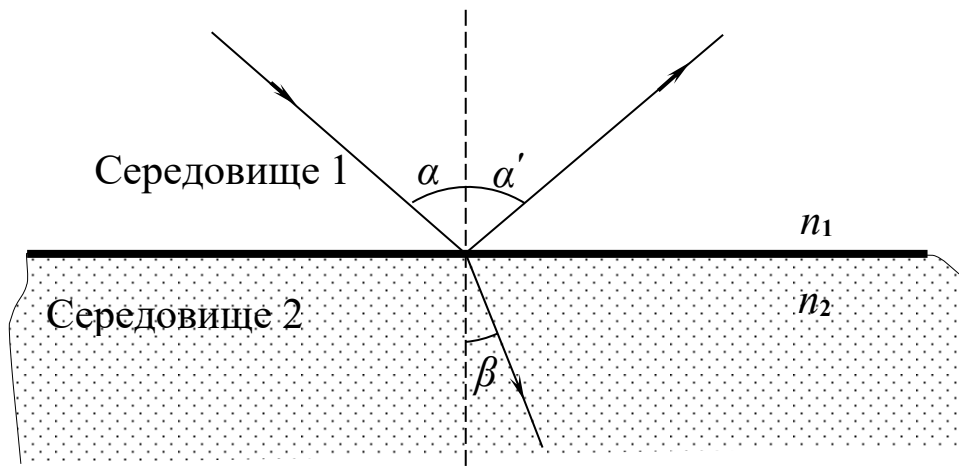


Рис. 1

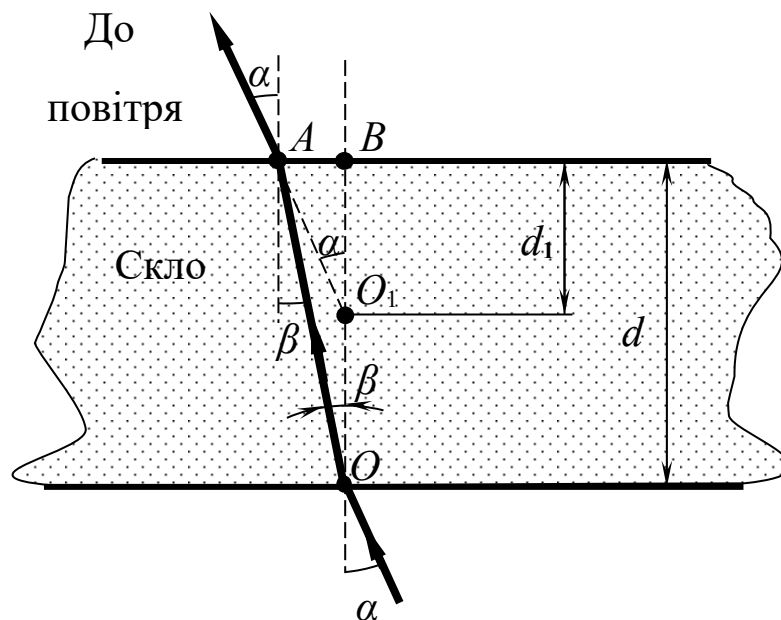


Рис. 2

Порядок виконання роботи

1. Заносять до таблиці ціни поділок мікрометра ($c=0,01$ мм/под) і мікрометричного гвинта мікроскопа ($c_1=0,0028$ мм/под $\cong 0,003$ мм/под).

2. Вимірюють мікрометром дійсну товщину d скляної пластинки не менше трьох разів. Результати заносять до таблиці.

3. Готують мікроскоп:

- за допомогою освітлювального дзеркала домагаються

рівномірного освітлення поля зору (дивляться в окуляр і повертають дзеркало);

- обертають мікрометричний гвинт мікроскопа проти годинникової стрілки до крайнього положення (обертати слід плавно, без зусилля, щоб не зірвати різьбу);

- обертаючи мікрометричний гвинт кремальєри за годинниковою стрілкою, опускають трубу мікроскопа вниз.

4. Наносять на поверхню скляної пластинки чорнильну мітку.

5. Кладуть пластинку на предметний столик мікроскопа міткою догори і намагаються отримати різке її зображення, обертаючи макрогвинт проти годинникової стрілки. Забороняється опускати тубус, спостерігаючи в окуляр, бо при цьому можна пошкодити об'єктив і об'єкт.

6. Повертають пластинку міткою **вниз**. Добиваються різкого зображення мітки, обертаючи мікрометричний гвинт за годинниковою стрілкою. Визначають число поділок, на яке при цьому повертається гвинт. Перемноживши одержане число поділок на ціну поділки, визначають уявну товщину d_1 . Вимірювання повторюють не менше трьох разів. Результати заносять до табл.1.

7. Використовуючи формулу (4), за середніми значеннями $\langle d \rangle$ і $\langle d_1 \rangle$ розраховують показник заломлення $\langle n \rangle$ пластинки.

8. Розраховують довірчі границі і відносні похибки прямих і непрямих вимірювань при заданих довірчих ймовірностях. У даній роботі

$$\varepsilon_n = \varepsilon_d + \varepsilon_{d_1}, \quad \Delta_n = \langle n \rangle \cdot \varepsilon_n.$$

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні експериментальні закони геометричної оптики, сформулюйте їх і поясніть.

2. Який фізичний зміст абсолютного і відносного показників заломлення?

3. Нарисуйте хід променів у мікроскопі, поясніть зображення, дане об'єктивом і окуляром.

4. Поясніть, чому уявна товщина скляної пластинки менша за істинну.

5. Опишіть розвиток уявлень про природу світла.

6. Який діапазон довжин хвиль видимого світла?

7. Поясніть залежність швидкості світла від фізичних характеристик середовища.

Таблиця

№ п/п	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань
	d , мм	d_1 , мм	n
	$C=$	$C=$	
1			
2			–
3			
$\langle x \rangle$			
$\Delta_c, P_c = 1$			–
$\overset{\circ}{\Delta}, P = 0,95$			–
$\Delta, P \geq 0,95$			
$\varepsilon = \frac{\Delta}{\langle x \rangle}$			

Додаток до роботи 5 - 1

Хід променів у мікроскопі

Мікроскоп – оптична система, що складається в найпростішому випадку із короткофокусної збиральної лінзи (об'єктива) O_1 і довгофокусної збиральної лінзи (окуляра) O_2 . Хід променів у мікроскопі показано на рис.3. Буквами F_1 і F_2 позначено фокуси об'єктива та окуляра. Об'єкт MN розміщують поблизу фокальної площини об'єктива на відстані трохи більшій за фокусну. Об'єктив дає дійсне, обернене і збільшене зображення M_1N_1 , яке знаходиться в фокусі або майже в фокусі окуляра. При цьому окуляр використовується як лупа і дає уявне збільшене зображення M_2N_2 об'єкта на відстані найкращого бачення для очей.

заломлення рідин і концентрації розчинів побудований на явищі повного внутрішнього відбиття.

Повне внутрішнє відбиття має місце при переході світлового променя із оптично більш густого середовища n_1 в оптично менш густе середовище n_2 ($n_1 > n_2$). При граничному куті падіння γ_{gp} заломлений промінь $O1'$ ковзає вздовж поверхні поділу цих середовищ (рис.1).

Якщо промінь $O1'$ піде в зворотному напрямку (із оптично менш густого середовища n_2 в оптично густіше n_1), то на основі принципу оборотності світлових променів картина залишається такою ж: падаючий і заломлений промені лише поміняються ролями. Для ковзаючого променя в точці O маємо:

$$\sin \gamma_{gp} = \frac{n_2}{n_1} . \quad (1)$$

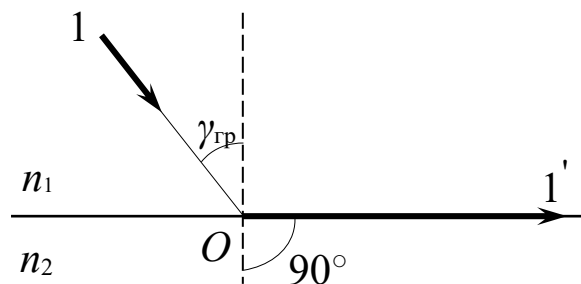


Рис. 1

Основною частиною рефрактометра (зовнішній вигляд якого наведено на рис.3) є дві призми $A'B'C'$ і ABC (рис.2), виготовлені із скла з великим показником заломлення ($n \cong 1,7$).

Між призмами вводиться декілька крапель досліджуваної рідини. При опусканні верхньої призми на нижню вони розпливаються тонким шаром по поверхні AB . У випадку прозорії рідини світло спрямовується в рефрактометр через віконце 1 (рис.3). Далі воно потрапляє на матову грань $A'B'$ освітлювальної призми. Розсіяне на цій поверхні світло проходить через плоскопаралельний шар досліджуваної рідини 4 (рис.2 і рис.3) і під різними кутами (в

межах від 0° до 90°) падає на діагональну грань AB нижньої призми. Промінь, кут падіння якого 90° (ковзаючий промінь $O1'$), у призмі заломиться під граничним кутом γ_{zp} повного внутрішнього відбиття. Всі інші промені, що падають на грань AB під кутом, меншим 90° , заломляться у призмі під кутом меншим γ_{zp} .

У полі зору зорової труби, встановленої на шляху променів, що пройшли систему двох призм, спостерігаються дві області: світла (нижня половина) і темна. Межа поділу утворюється граничним променем $O1$.

Отже положення межі світлотіні поля зору залежить від граничного кута γ_{zp} і визначається виразом:

$$\sin \gamma_{zp} = \frac{n}{n_c}, \quad (2)$$

де n – показник заломлення розчину; n_c – показник заломлення призми.

Показник заломлення призми n_c – величина стала, тому положення межі світлотіні визначається лише показником заломлення розчину n , який, у свою чергу, однозначно пов'язаний з концентрацією C розчину. Це дозволяє створити шкалу (рис.4) не тільки для визначення показника заломлення n розчину, а і для визначення концентрації C сухих речовин у розчині.

Оптична схема і зовнішній вигляд рефрактометра, використаного в даній роботі, представлені на рис.5 і рис.3. Позначення на рисунках:

1 – віконце для освітлення з боку рідини; 2 – відкидна призма, що притискує рідину 4 до нижньої призми 3; 5 – окуляр; 5а – об'єктив; 5б – поворотна призма зорової труби; 6 – компенсаційна призма, яка обертається. Призма 6 дозволяє компенсувати дисперсію призм та розчину і працювати з джерелом білого світла. Без такої призми межа поділу світлотіні була б різнобарвною і нечіткою, що значно знижувало б точність вимірів.

Порядок виконання роботи

1. Рисують табл. 1, в яку заноситимуться результати вимірів.
2. Освітлювальне віконце 1 рефрактометра (рис.3) розміщують біля джерела природного світла (вікна).
3. Відхиляють верхню призму 2 (рис.3). Піпеткою або оплавленою скляною паличкою наносять на поверхню призми 3 п'ять – шість крапель дистильованої води 4 і опускають призму 2 на своє місце. При цьому рідина рівномірно суцільним тонким шаром розподіляється між призмами.
4. Дивляться в окуляр 5 (рис.3) і, обертаючи його, настроюють зорову трубу до чіткого зображення шкали (рис.4).
5. У табл. 1 записують ціни поділок, відмічені відповідно на шкалі показника заломлення (зліва) і на шкалі концентрації (справа).
6. Дивляться в окуляр 5 (рис.3) і повертають ручку 6 компенсатора доти, поки не буде видно чіткого розділення межі “світло – тінь”.
7. Дивляться в окуляр 5 і повертають ручку 7 (рис.3) доти, поки три поперечні риски (рис.4) не збігатимуться з межею розділення “світло – тінь”.
8. Проти трьох рисок на шкалі зліва читають значення показника заломлення n , а на шкалі справа – концентрацією C . Для дистильованої води при $t=20^{\circ}\text{C}$ $n=1.333$; $C=0.0\%$.
Результати записують до таблиці.
9. Відхиляють верхню призму 2 і фільтрувальним папером промокають вологу на її поверхні та поверхні призми 3.
Щоб не пошкрябати поверхні призми, рідину треба обов'язково лише промокати, а не витирати.
10. Наносять на призму 3 п'ять – шість крапель досліджувального розчину й опускають призму 2 на своє місце.
Виконавши пункти 6, 7, 8, визначають показник заломлення n і концентрації C . Так проводять дослідження 6 – 7 розчинів.
11. Вимірюють та записують значення кімнатної температури t . При $t \neq 20^{\circ}\text{C}$, відповідно до таблиці, що представлена в додатку, до одержаного значення концентрації C вводиться поправка ΔC . Якщо поправка ΔC менша за ціну поділки шкали, то нею можна знехтувати.
12. Будують графік залежності n від C' .
13. Аналізують характер одержаної залежності між n і C' .

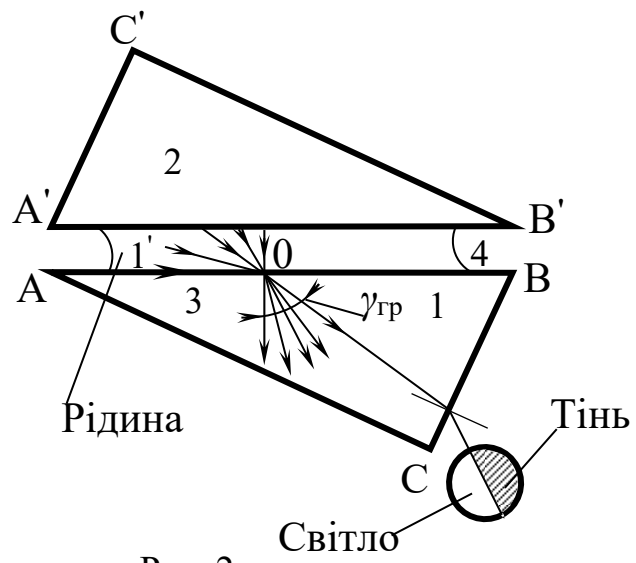


Рис. 2

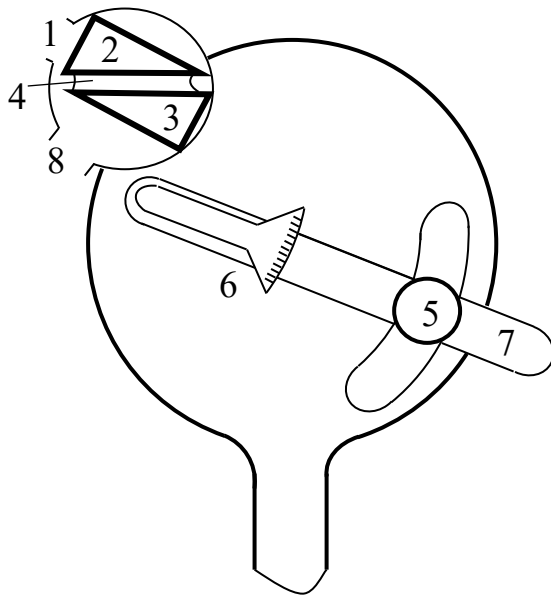


Рис. 3

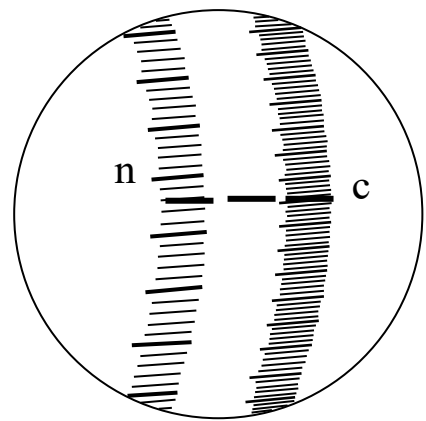


Рис. 4

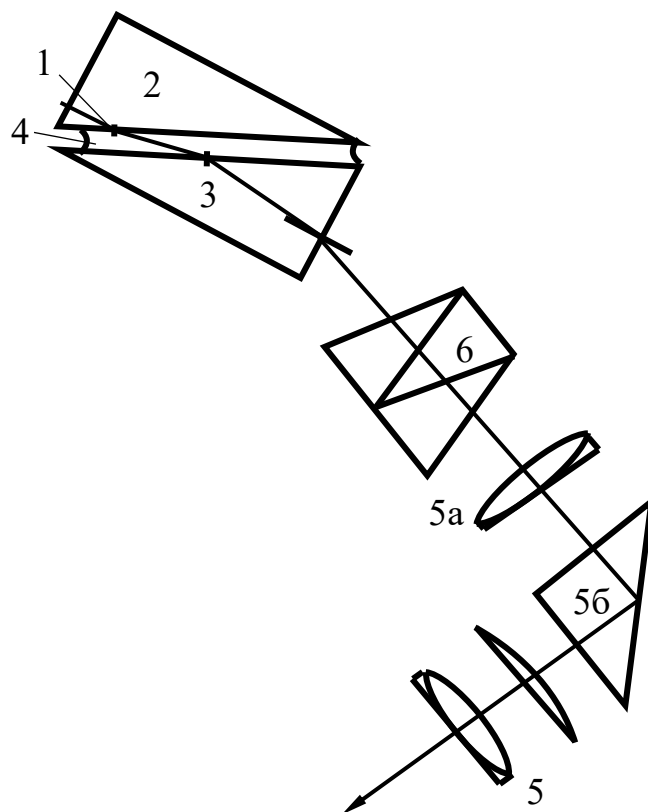


Рис. 5

Таблиця

№ п/п	Результати прямих вимірювань			Температурна поправка	Результати непрямих вимірювань
	n	$C, \%$	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta C, \%$	$C' = C \pm \Delta C, \%$
	$C =$	$C =$	$C =$	—	—
1					
2					
3					
·					
·					
·					

Запитання для самоконтролю

1. Запишіть і сформулюйте закони заломлення світла, дайте пояснюючий рисунок.
2. Поясніть явище повного внутрішнього відбиття світла; укажіть, де воно використовується; одержіть вираз для граничного кута падіння променів.
3. Поясніть принцип дії світловоду.
4. Поясніть принцип роботи рефрактометра.
5. Що таке дисперсія світла? Поясніть її причину.

РОБОТА 5 - 3 ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА

Мета роботи: вивчити закономірності явища інтерференції світла; визначити довжину світлової хвилі, вимірюючи діаметри кілець Ньютона.

Прилади та обладнання: пристрій для одержання кілець Ньютона, вимірювальний мікроскоп, джерело монохроматичного світла.

Кільця Ньютона

Якщо на скляну пластинку покласти збирну лінзу (рис. 1, а), то у відбитому світлі спостерігаються концентричні кільця (кільця Ньютона), що оточують темну пляму з центром у точці дотику лінзи і пластинки (рис. 1, б). При використанні монохроматичного світла спостерігаються лише темні і світлі кільця, якщо ж світло біле – кільця різнобарвні. Кільця Ньютона утворюються внаслідок інтерференції світлових хвиль, відбитих від верхньої і нижньої границь повітряного прошарку між лінзою і скляною пластинкою. В даній роботі для їх отримання використовують плоскоопуклу лінзу з великим радіусом кривизни R . Світло від лампи розжарення проходить через світлофільтр Φ (рис. 2) і, відбиваючись від напівпрозорої пластинки Π , освітлює плоску поверхню лінзи. Інтерференційну картину (кільця Ньютона) у відбитому світлі спостерігають у мікроскопі (на рис. 2 “Об” – об’єктив мікроскопа).

Утворення кілець Ньютона пояснюється на рис. 1, а і рис. 3. Промені, відбиті від верхньої і нижньої границь повітряного прошарку – наприклад, промені 2 і 3, що виникають при відбиванні променя 1 від точок a і b – є когерентними, оскільки мають спільне походження: вони виникли з **одного і того ж** променя 1. Тому при накладанні у точці їх зустрічі (точка P на рис. 3 або точка a на рис. 1, а), розташованої поблизу опуклої поверхні лінзи, промені 2 і 3 інтерферують. При великому радіусі R кривизни лінзи промені 1, 2 і 3 поширюються практично вздовж однієї прямої, як це зображено на рис. 1, а. Геометрична різниця ходу променів 2 і 3 дорівнює $2h$, де $h = ab$ – товщина повітряного прошарку в місці падіння променя 1.

Інтерференційний ефект, що спостерігається у точці a , залежить від того, скільки довжин хвиль λ укладається на відстані $2h$. Геометричним місцем точок, що відповідають однаковій товщині h повітряного прошарку, є коло. Тому в даному досліді лінії однакової інтенсивності світла – інтерференційні смуги – мають вигляд концентричних кілець.

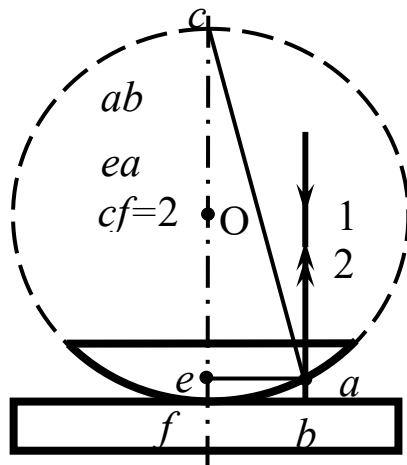
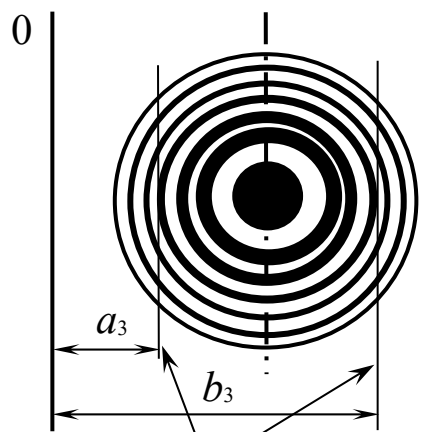


Рис. 1а



Положення визірної
нитки при вимірах

Рис. 1б

Як показують теорія і досвід, при відбитті від середовища з більшою оптичною густиною (тобто з більшим показником заломлення, в нашому випадку – від скла) фаза коливань електричного вектора світлової хвилі змінюється стрибком на π ; це рівнозначно додатково пройденій відстані $\lambda/2$. Таке явище називають “втратою півхвилі”. Внаслідок “втрати півхвилі” промені 2 і 3 при виконанні умови $2h = k\lambda$ мають протилежні фази і при накладанні гасять один одного. З врахуванням “втрати півхвилі” умови максимумів і мінімумів при інтерференції променів 2 і 3 мають наступний вигляд:

умова максимумів –

$$2h = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad (1)$$

умова мінімумів –

$$2h = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

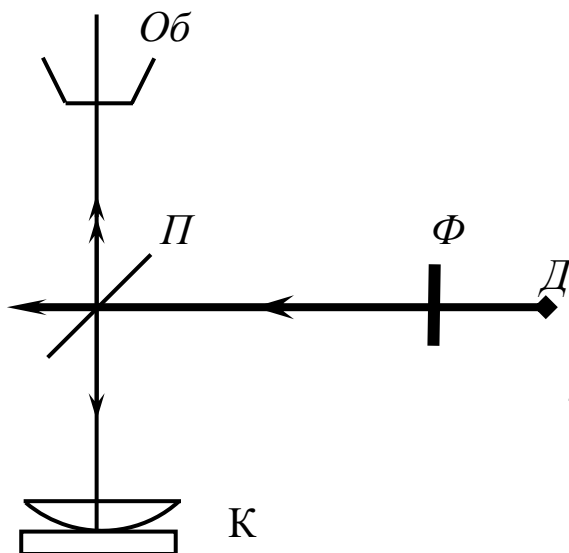


Рис. 2

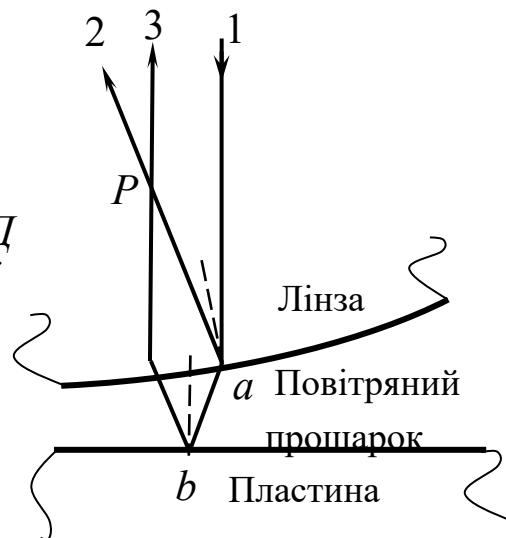


Рис. 3

У місці щільного дотикання лінзи і скляної пластинки товщина h повітряного прошарку є набагато меншою довжини хвилі світла, тобто $h \ll \lambda$. Тут результат інтерференції визначається фактично лише “втратою півхвилі“, тому центральна пляма завжди темна.

Радіус r інтерференційного кільця можна визначити із подібності трикутників aef і ace (рис. 1, а). Якщо ввести позначення $ef = ab = h$, $ae = r$ і $cf = 2R$, то

$$\frac{h}{r} = \frac{r}{2R - h};$$

отже,

$$r^2 = (2R - h) \cdot h. \quad (3)$$

Підставляючи у формулу (3) значення h , яке відповідає умові максимумів (1), і беручи до уваги, що $2R \gg h$, одержимо співвідношення для визначення радіусів $r_k = r_k^{\max}$ світлих кілець:

$$(r_k^{\max})^2 = \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \cdot R, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Аналогічно, використовуючи умову мінімумів (2), одержуємо співвідношення для визначення радіусів $r_k = r_k^{\min}$ темних кілець:

$$(r_k^{\min})^2 = k\lambda R, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Тут $k = 0$ відповідає центральній темній плямі.

Відповідно для діаметрів $d_k^{\max} = 2r_k^{\max}$ і $d_k^{\min} = 2r_k^{\min}$ світлих і темних кілець знаходимо:

$$(d_k^{\max})^2 = 4\left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \cdot R, \quad (4a)$$

$$(d_k^{\min})^2 = 4k \cdot \lambda \cdot R. \quad (5a)$$

У даній роботі при обробці експериментальних даних використовують графічний метод. Згідно з формулами (4а) і (5а) квадрат діаметра інтерференційного кільця (як темного, так і світлого) лінійно залежить від номера кільця k . При цьому коефіцієнт пропорційності A (кутовий коефіцієнт) обох залежностей визначається за формулою:

$$A = 4\lambda \cdot R. \quad (6)$$

Вимірявши діаметри кілець, будують графік залежності $(d_k^{\max})^2$ або $(d_k^{\min})^2$ від k , який має бути прямою лінією.

Визначене за цим графіком значення A підставляють у формулу (6) і знаходять довжину світлової хвилі λ :

$$\lambda = \frac{A}{4R} \quad (7)$$

Згідно з формулою (4) радіус k -го світлого кільця залежить від довжини світлової хвилі:

$$r_k^{\max} \sim \sqrt{\lambda}.$$

Тому при одному і тому ж k різним довжинам хвиль, тобто різним кольорам, відповідають кільця різних радіусів. Цим і пояснюється те, що інтерференційні кільця, утворені при використанні білого світла, є різнобарвними.

Порядок виконання роботи

1. Готують таблицю для запису результатів вимірювань.

$x \equiv k$	a_k , мм	b_k , мм	$d_k^{\min} = b_k - a_k$, мм	$y = (d_k^{\min})^2$, мм ²
	C =	C =	-	-
—				
7				
6				
5				
4				
3				
2				
1				

2. Вмикають джерело світла. Переміщують предметний столик до появи в полі зору мікроскопа інтерференційних кілець. Обертаючи окуляр мікроскопа, добиваються чіткого зображення кілець.

3. Заносять до таблиці ціну поділки шкали барабана вимірю-

вальної каретки мікроскопа, $C = 0,01$ мм.

4. Обертають барабан вимірювальної каретки і наводять візирну нитку окуляра на середину лівого краю 7-го або 6-го темного інтерференційного кільця. Записують до таблиці номер k цього кільця і значення a_k на шкалі барабана, що відповідає даному положенню візирної нитки.

5. Пересуваючи вимірювальну каретку до темної плями, послідовно виконують вимірювання a_k для решти кілець по перше кільце включно.

6. Продовжують пересувати вимірювальну каретку в тому ж напрямку, наводять візирну нитку на середину правого краю першого, потім другого і наступних темних кілець (аж до 7-го кільця включно) і заносять до таблиці відповідні значення b_k . Рис. 1, б ілюструє зняття вимірів a_k і b_k для третього ($k = 3$) темного кільця.

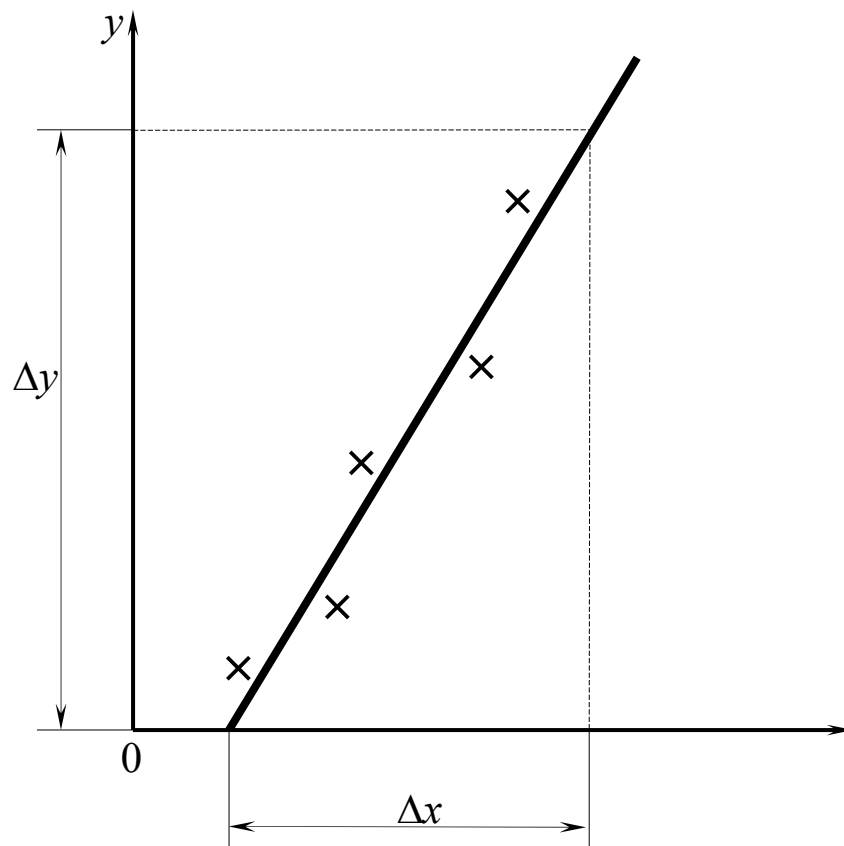


Рис. 4

7. Обчислюють діаметри $d_k^{\min} = b_k - a_k$ темних кілець, їх квадрати $(d_k^{\min})^2$ і результати заносять до таблиці.

8. Будують графік функції $y = Ax$, де $y = (d_k^{\min})^2$, $x = k$ (рис. 4).

Пряму лінію проводять так, щоб з обох боків від неї було приблизно однакове число експериментальних точок. Визначають кутовий коефіцієнт A за формулою:

$$A = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

9. Визначають довжину хвилі $\langle \lambda \rangle$ за формулою (7) (значення R вказано на лінзі) і виражають її в метрах і у нанометрах.

10. Визначають відносну систематичну похибку вимірювання довжини хвилі за формулою:

$$\varepsilon_\lambda = 4 \frac{C}{d} + \frac{\Delta R}{R}$$

(при цьому враховують, що $C = 0,01$ мм, $\Delta R = 5$ мм) і довірчу границю систематичних похибок за формулою:

$$\Delta_\lambda = \langle \lambda \rangle \cdot \varepsilon_\lambda;$$

записують результат вимірювання довжини хвилі у стандартній формі.

Запитання і вправи для самоконтролю

1. Запишіть рівняння хвилі і поясніть зміст позначень; підкресліть фазу хвилі.
2. Як зв'язані між собою різниця фаз і різниця ходу хвиль?
3. Які хвилі називаються когерентними?
4. У чому суть явища інтерференції хвиль?
5. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів при інтерференції.
6. Поясніть, чому випромінювання двох незалежних джерел світла не дає інтерференційної картини.
7. Поясніть, у чому полягає загальний принцип отримання когерентних джерел світла, і наведіть приклади інтерференційних схем.
8. Поясніть механізм утворення кілець Ньютона і наведіть інші приклади інтерференційних смуг рівної товщини.

РОБОТА 5 - 4.
ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ
ЗА ДОПОМОГОЮ БІПРИЗМИ ФРЕНЕЛЯ

Мета роботи: вивчити закономірності явища інтерференції світла; визначити довжину світлової хвилі за допомогою біпризми Френеля.

Прилади та обладнання: оптична лава (рис. 1), на якій встановлено джерело монохроматичного світла *ДЖ* (гелій - неоновий лазер ЛГН-105), поляроїд *П*, діафрагма *Д* з вузькою щілиною *S*, біпризма *Бп*, екран *Е* – аркуш білого паперу, збирна лінза та лінійка.

Біпризма Френеля

Загальне уявлення про форму біпризми Френеля дає рис. 2, а. Її можна уявити собі як таку, що складається з двох однакових призм із загальною основою і малими заломлювальними кутами γ . В перерізі біпризма має вид рівнобічного трикутника (рис. 2, б).

У даній роботі світло від лазера освітлює вузьку щілину *S*, паралельну ребру *АА* біпризми (на рис. 1 і 3 щілина *S* перпендикулярна площині рисунка). Циліндрична світлова хвиля, що виходить із джерела *S*, падає на велику грань біпризми (на рис. 3 вона обмежена променями *a* і *c*). Оскільки кут γ є малим ($\gamma \ll 1$), то кожна з призм відхиляє будь-який промінь, що падає на неї, в бік своєї основи на один і той же кут δ . Останній визначається співвідношенням

$$\delta = \gamma(n - 1),$$

де *n* – показник заломлення матеріала, з якого виготовлено біпризму (доведення цього співвідношення дано у дод. 1 до роботи).

Внаслідок цього світловий потік розділяється на два потоки, які виходять від бічних граней біпризми (на рис. 3 один із цих потоків обмежений променями *a*₁ і *b*₁, інший – променями *c*₂ і *b*₂). У кожному із заломлених світлових потоків продовження променів, що виходять з біпризми, перетинаються в одній точці – тобто біпризма

дає два уявних зображення S_1 і S_2 джерела S ; світло за біпризмою поширюється так, ніби воно виходить із двох когерентних джерел S_1 і S_2 . Ці джерела мають форму щілин, паралельних щілині S ; через малість заломлювального кута γ вони розташовані в одній площині із щілиною S .

За біпризмою в області, обмеженій променями b_1 і b_2 , світлові потоки накладаються, і тут відбувається їх інтерференція.

Результат інтерференції спостерігають на екрані E в області MN . Зображення інтерференційної картини показано на рис. 3 внизу. Для точок екрана, розташованих точно проти спільного ребра AA біпризми відстані до обох джерел S_1 і S_2 є однаковими і різниця ходу світлових хвиль дорівнює нулю. Тут відбувається підсилення коливань – на екрані видно центральну світлу смугу. По обидва боки від неї в точках, для яких різниця ходу хвиль $\Delta r = r_2 - r_1$ (рис. 4) дорівнює непарному числу півхвиль, відбувається взаємне ослаблення коливань – тут на екрані розташовані темні смуги. Між ними в точках, для яких різниця ходу Δr дорівнює парному числу півхвиль, розташовані світлі смуги.

Якщо екран розміщений паралельно площині, в якій знаходяться когерентні джерела S_1 і S_2 , то відстань l між сусідніми світлими (темними) смугами визначається співвідношенням:

$$l = \frac{L}{d} \lambda, \quad (1)$$

доведення якого дано у дод. 2; тут L – відстань від когерентних джерел світла S_1 і S_2 до екрана (див. рис. 4); d – відстань між джерелами S_1 і S_2 ; λ – довжина хвилі світла, що падає на біпризму.

Інтерференційна картина є чіткою лише за умови $L/d \gg 1$, тобто при $d \ll L$. При $d \cong L$ відстань між смугами була б порядку λ і розрізнити їх було б неможливо. Саме для забезпечення малої відстані d , а отже, і широких інтерференційних смуг, заломлювальні кути γ біпризми роблять малими – меншими 1° .

Для визначення відстані d між уявними корегентними джерелами світла S_1 і S_2 за біпризмою розміщують збирну лінзу L (рис. 5). Пересуваючи її, добиваються на екрані чітких зображень S'_1 і S'_2 джерел S_1 і S_2 . Із подібності трикутників OS_1S_2 і $OS'_1S'_2$ випливає, що

$$d = d' \frac{b}{a}, \quad (2)$$

тут $d' = S'_1S'_2$ – відстань між зображеннями джерел на екрані; a і b – відстані від лінзи відповідно до екрана E і до щілини S .

Із співвідношень (1) і (2) отримують формулу для визначення довжини світлової хвилі λ :

$$\lambda = \frac{d'}{L} \cdot \frac{b}{a} \cdot l. \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

1. Готують таблицю для запису результатів вимірювань.

№ п/п	Результати прямих вимірювань					Результати непрямих вимірювань			
	H , 10^{-3} м	m	a , м	b , м	d' , м	l , 10^{-3} м	L , м	λ , м	λ , нм
С		—				—	—	—	—
1						—	—	—	—
2						—	—	—	—
3						—	—	—	—
$\langle x \rangle$									
Δ_c при $P_c = 1$		—				—	—	—	—
Δ° при $P = 0,95$		—				—	—	—	—

Δ при $P > 0,95$		—				—			
ε		—							

2. Перевіряють наявність всіх приладів і порядок їхнього розміщення на одній оптичній осі відповідно до рис. 1.

3. Вмикають тумблер на щитку блока живлення лазера. Через 1–2 хв. з'явиться свічення червоного кольору. Якщо воно періодично загасає, потрібно збільшити розрядний струм.

УВАГА! Неослаблене лазерне світло (пряме та відбите) є небезпечним для очей. Тому лазерний промінь необхідно максимально ослабити за допомогою поляроїда П.

Слідкуйте, щоб лазерний промінь нікому не потрапив в очі.

4. Віддаляючи екран (аркуш паперу) від призми, слідкують за зміною інтерференційної картини. Пояснюють, чому відстань між інтерференційними смугами збільшується.

5. Максимально віддаляють екран від біпризми і зарисовують інтерференційну картину, проводячи лінії проти світлих смуг. Поклавши рисунок на стіл, вимірюють лінійкою відстань H між крайніми смугами і визначають число m проміжків між ними (число темних смуг). Визначають відстань l між сусідніми світлими (темними) смугами за формулою:

$$l = \frac{H}{m} .$$

6. Не змінюючи положення екрана, між біпризмою та екраном встановлюють на оптичній лаві збирну лінзу L (рис. 5). Пересуваючи її, добиваються чітких зображень S'_1 і S'_2 уявних джерел S_1 і S_2 . Зарисовують одержані зображення і вимірюють лінійкою відстань d' між ними. При виборі лінзи слід враховувати, що чітке зображення джерел S'_1 і S'_2 можна отримати лише за умови $OF < b$, $2OF > b$. Тут OF – фокусна відстань лінзи, $b = OS$ – відстань від лінзи до щілини S . Фокусну відстань лінзи наближено визначають так: проектуєть на екран зображення віддалених предметів (наприклад, дерев за вікном). Оскільки таке зображення знаходиться у фокальній площині лінзи, то відстань від лінзи до екрана як раз і дорівнює фокусній відстані лінзи.

7. Вимірюють відстані a – від лінзи до екрана – і b – від лінзи до щільової діафрагми D .

8. Обчислюють середні значення результатів прямих вимірювань і визначають довжину хвилі λ за формулою (3):

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle d' \rangle}{\langle L \rangle} \cdot \frac{\langle b \rangle}{\langle a \rangle} \cdot \langle l \rangle,$$

де $\langle L \rangle = \langle a \rangle + \langle b \rangle$.

9. Розраховують довірчі границі похибок прямих вимірювань при $\overset{\circ}{P} = 0,95$, $P_c = 1$ і відповідні відносні похибки.

10. Визначають відносну похибку ε_λ вимірювання довжини хвилі світла за формулою:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{d'} + \varepsilon_L + \varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_l,$$

враховуючи, що

$$\varepsilon_l = \varepsilon_H, \quad \varepsilon_L = \frac{\Delta_a + \Delta_b}{\langle L \rangle},$$

визначають довірчу границю Δ_λ похибок непрямого вимірювання довжини хвилі за формулою $\Delta_\lambda = \varepsilon_\lambda \langle \lambda \rangle$.

11. Представляють результат вимірювання довжини хвилі у стандартній формі і порівнюють його з табличним значенням $\lambda = 632,8 \text{ нм}$; аналізують точність методу та можливості її підвищення.

Запитання і вправи для самоконтролю

1. Що називається фазою коливання? Фазою хвилі? Довжиною хвилі? Отримайте співвідношення між різницею фаз і різницею ходу хвиль.
2. Дайте визначення когерентних коливань, когерентних хвиль.
3. Опишіть хвильові уявлення про світло і дайте схематичне зображення плоскої монохроматичної електромагнітної хвилі.
4. Дайте визначення явища інтерференції хвиль, сформулюйте і обґрунтуйте умови максимумів і мінімумів при інтерференції.
5. Опишіть загальний принцип отримання когерентних джерел світла; наведіть конкретні приклади інтерференційних схем.
6. Опишіть інтерференційну картину, що її дає біпризма Френеля, і виведіть робочу формулу (3).
7. Перерахуйте відомі Вам практичні застосування явища інтерференції світла.

ДОДАТОК 1

Доведення співвідношення $\delta = \gamma (n - 1)$

Розглянемо хід променів у призмі з малим заломлювальним кутом γ (рис. 6), виготовленій із матеріалу з показником заломлення n . Кути падіння і заломлення при лівій грані призми позначимо через α_1 і β_1 , при правій – через α_2 і β_2 . Згідно із законом заломлення світла

$$\sin\alpha_1 = n \sin\beta_1, \quad \sin\alpha_2 = n \sin\beta_2. \quad (\text{Д1})$$

Якщо кут α_1 є малим ($\alpha_1 \ll 1$), то малий і кут β_1 . Тоді через малість заломлювального кута γ , малими є і кути α_2 і β_2 . Тому синуси у співвідношеннях (Д1) можна замінити самими кутами; після цього отримуємо:

$$\alpha_1 = n\beta_1, \quad \alpha_2 = n\beta_2. \quad (\text{Д2})$$

Кут δ , що нас цікавить, є зовнішнім кутом трикутника BCD ; отже, він дорівнює сумі двох суміжних з ним кутів трикутника:

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2).$$

Звідси, беручи до уваги співвідношення (Д2), отримуємо:

$$\begin{aligned} \delta &= \beta_1(n - 1) + \beta_2(n - 1) = (n - 1)(\beta_1 + \beta_2), \\ \delta &= (n - 1)(\beta_1 + \beta_2). \end{aligned} \quad (\text{Д3})$$

Кут, утворений у точці E перетином нормалей N_1 і N_2 , дорівнює заломлювальному куту призми γ . Разом з тим він є зовнішнім кутом трикутника BED ;

Отже,

$$\beta_1 + \beta_2 = \gamma.$$

Підставляючи отримане значення $(\beta_1 + \beta_2)$ у формулу (Д3), знаходимо:

$$\delta = \gamma (n - 1).$$

Таким чином, призма з малим заломлювальним кутом γ всі промені, що падають на неї, відхиляє незалежно від кутів падіння (при малих їх значеннях) на один і той же кут $\delta = \gamma (n - 1)$.

ДОДАТОК 2

Доведення співвідношення $l = \frac{L}{d}\lambda$

Скористаємося рис. 4, який дублює розташування джерел S_1 і S_2 і екрана, зображених на рис. 3. На цьому рисунку $S_1P = r_1$ і $S_2P = r_2$ – відстані від точки спостереження P до джерел (промені S_1P і S_2P знаходяться у площині малюнку). Положення точки спостереження на екрані будемо характеризувати її відстанню $h = PO$ до площини симетрії системи OO .

Застосовуючи теорему Піфагора до трикутників S_2PB і S_1PA , отримуємо:

$$\begin{aligned}r_2^2 &= L^2 + (h + d/2)^2, \\r_1^2 &= L^2 + (h - d/2)^2.\end{aligned}$$

Віднімаючи перше рівняння від другого, знаходимо:

$$r_2^2 - r_1^2 = 2dh. \quad (\text{Д4})$$

Ліву частину останнього рівняння представимо у вигляді

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 + r_1)(r_2 - r_1). \quad (\text{Д5})$$

Тут

$$r_2 - r_1 = \Delta r; \quad (\text{Д6})$$

Δr – різниця ходу хвиль, що приходять у точку спостереження P від когерентних джерел S_1 і S_2 .

У будь – якій інтерференційній схемі відстань d між джерелами є малою у порівнянні с відстанню L від джерел до екрана, $d \ll L$. Тому можна скористатись наближенням

$$R_1 \approx r_2 \approx L, \quad r_1 + r_2 \approx 2L. \quad (Д7)$$

Тоді із співвідношення (Д4) – (Д7) отримуємо:

$$h = \frac{L}{d} \Delta r. \quad (Д8)$$

Підставляючи у формулу (Д8) значення Δr , що відповідає умові максимуму інтенсивності, $\Delta r = k\lambda$, знаходимо, що максимуми спостерігатимуться при

$$h \equiv h_k^{\max} = k \frac{L}{d} \lambda. \quad (Д9)$$

Аналогічно, підставляючи у (Д8) значення Δr , що відповідає умові мінімуму інтенсивності, $\Delta r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, визначаємо положення мінімумів:

$$h \equiv h_k^{\min} = \frac{2k + 1}{2} \cdot \frac{L}{d} \cdot \lambda. \quad (Д10)$$

Згідно із співвідношенням (Д9) відстань

$$l = h_{k+1}^{\max} - h_k^{\max}$$

між сусідніми світлими смугами визначається виразом

$$l = \frac{L}{d} \lambda;$$

цей же вираз визначає і відстань між сусідніми темними смугами.

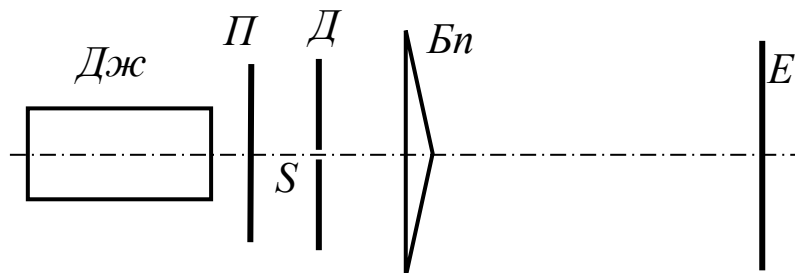


Рис. 1

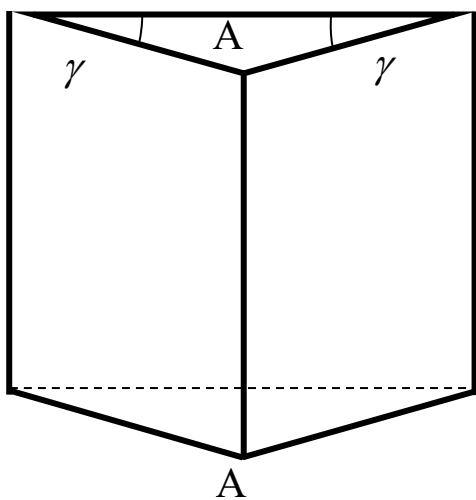


Рис. 2

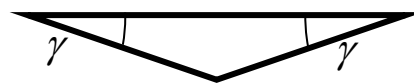
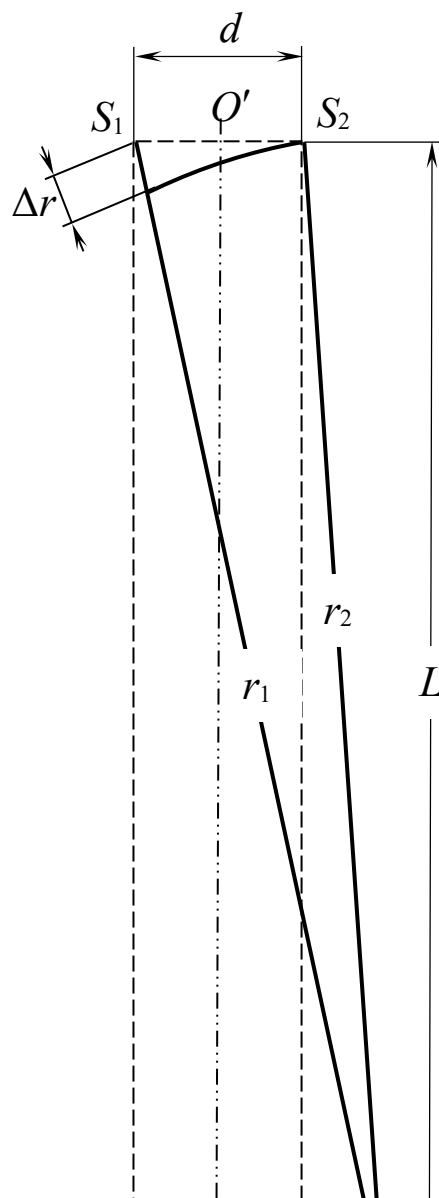
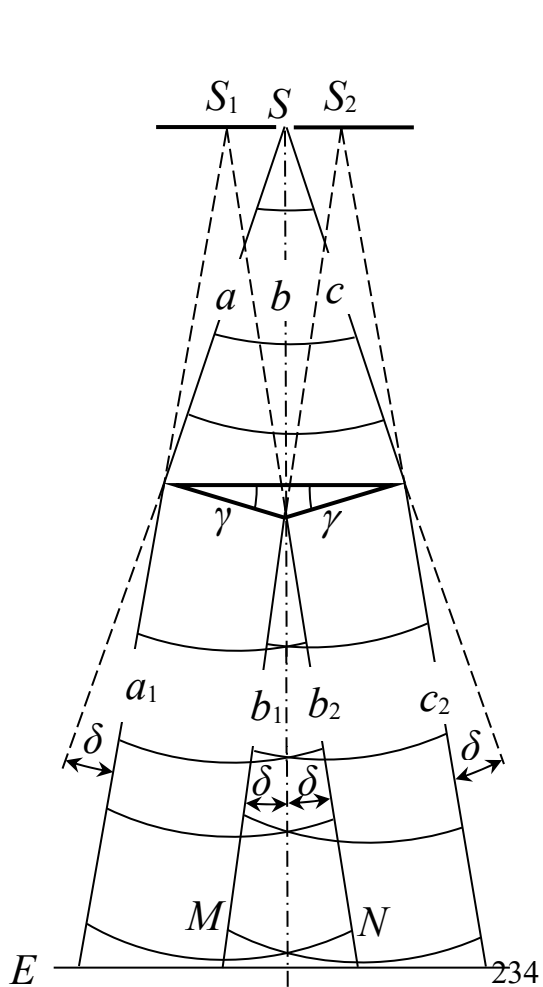
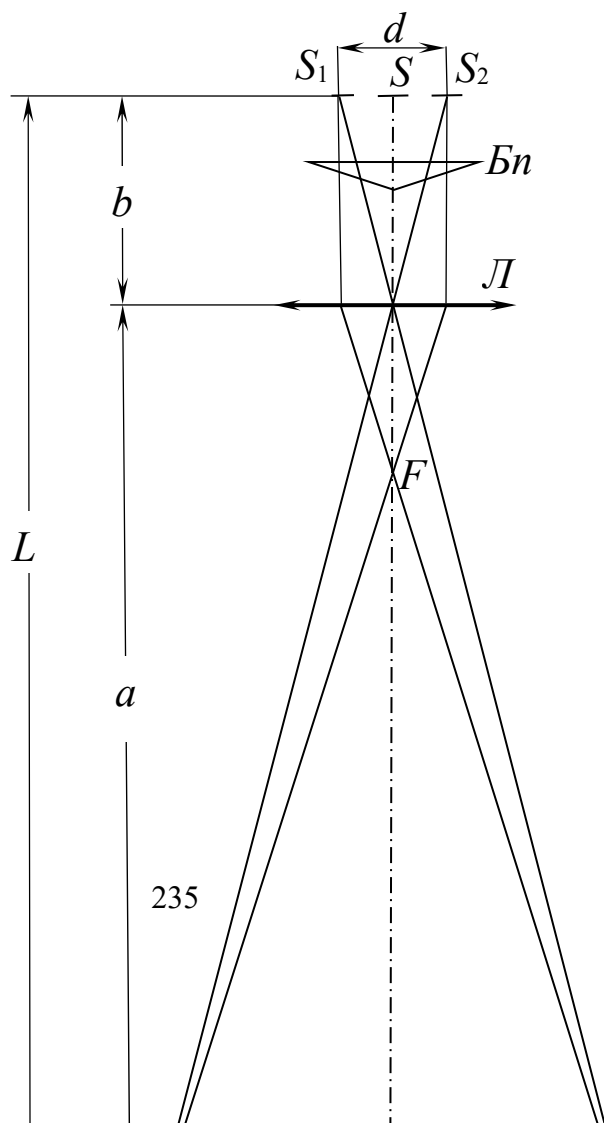


Рис. 2а





Дифракційний спектр складається з центральної білої смуги і розміщених симетрично від неї максимумів першого, другого і більш високих порядків. Для розрахунків довжини хвилі λ будь-якої лінії у дифракційному спектрі використовується формула дифракційної решітки. Вона визначає напрямки головних максимумів у дифракційній картині решітки:

$$d \sin \varphi = n\lambda . \quad (1)$$

З формули решітки (1) випливає, що

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{n}, \quad (2)$$

де d – період ґратки; n – порядок спектра; φ – кут дифракції (див. рис.1). При малих його значеннях

$$\sin \varphi \cong \operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{z}, \quad (3)$$

де l – відстань від центрального максимуму до лінії в уявному спектрі; z – відстань від решітки до щілини. Використовуючи останній вираз (3), отримуємо робочу формулу для визначення довжини хвилі:

$$\lambda = \frac{l \cdot d}{n \cdot z} \quad (4)$$

Нами раніше (див. рис. 4 розд. 5.1 на с. 19) детально розглянуто проходження світла через дифракційну решітку та отримано формулу головних максимумів дифракційної решітки:

$$d \sin \varphi = n\lambda . \quad (5)$$

Виконання умови (5), наприклад для першої і другої щілин, автоматично означає виконання його для другої і третьої, третьої і четвертої щілин і т. д., тобто для всієї решітки в цілому. Тому формулу (5) називають **формулою дифракційної решітки**. Ціле число n у формулі (5) називається **порядком максимумів**, оскільки воно визначає порядковий номер максимуму, відрахованого від центра екрана (не рахуючи центрального, $n = 0$).

Порядок виконання роботи

1. Рисують таблицю.

Таблиця

№ n/n	Задані величини		Результати прямих вимірювань			Результати непрямих вимірювань			
	$d, \text{м}$	n	$z, \text{м}$	$l_{\psi}, \text{м}$	$l_{\phi}, \text{м}$	Червоне світло		Фіолетове світло	
						$\langle l \rangle$ $\langle z \rangle$	$\lambda_{\psi}, \text{м}$	$\langle l \rangle$ $\langle z \rangle$	$\lambda_{\phi}, \text{м}$
	C=	C=	C=	C=	C=	–	–	–	–
1.			0	0	0				
2.									
3.		–				–	–	–	–
4.									
5.									
6.									
$\langle x \rangle$		2	–	–	–				
Δ_C									
ε									

2. Визначають постійну решітки за формулою $d = \frac{1}{N}$, де N - кількість штрихів, нанесених на 1 мм поверхні ґратки (вказана на корпусі решітки). Наприклад, якщо $N = 100$, то $d = 0,01 \text{мм}$; при цьому $\Delta d = 5 \cdot 10^{-5} \text{мм}$ і $\varepsilon_d = 0,005$.

Джерело світла, щілину, дифракційну решітку та око розміщують на одній оптичній осі у послідовності, вказаній на рис.5. розд. 5.1 на с. 20.

3. Розглядають спектри другого порядку. Заносять у таблицю значення $n = 2$, ціни поділок шкал для виміру відстані z і l .

4. Визначають графічним методом відношення l/z для червоної границі видимого спектра. Для цього, змінюючи відстань z від нуля до кількох десятків сантиметрів, використовуючи шкалу екрана, вимірюють відстань l_{ψ} від центра дифракційної картини до червоного краю спектра другого порядку (лівого чи правого). Червоний край шукають в області, де на нього накладається фіолетова частина спектра третього порядку. Дані записують у вищеведену таблицю і наносять у вигляді точок на координатній площині, де по осі ординат відкладають значення l , а по осі абсцис – значення z . Графік залежності l від z повинен бути прямою лінією, яка проходить через початок координат ($z = 0, l = 0$), оскільки величини

l і z при незмінному куті φ (рис.1) пропорційні один одному. Лінію проводять так, щоб відхилення точок від лінії було якнайменшим. Окремі експериментальні точки можуть не потрапляти на пряму лінію через наявність похибок вимірювання. Середнє значення відношення l/z знаходять, визначаючи координати крайньої правої точки побудованого графіка. Значення цих координат позначають через $\langle l \rangle$ та $\langle z \rangle$ і вносять у таблицю. Величина відносної похибки

$\varepsilon_{l/z} = \varepsilon_l + \varepsilon_z = \frac{\Delta_l}{\langle l \rangle} + \frac{\Delta_z}{\langle z \rangle}$. Вона є мінімальною, тому що для крайньої правої точки графіка мають місце максимальні значення l і z .

5. Підраховують довжину хвиль λ_y червоної границі видимого світла, підставляючи у формулу (4) замість l/z значення $\frac{\langle l \rangle}{\langle z \rangle}$, при цьому всі величини приводять до системи СІ. Кінцевий результат виражають у нанометрах, враховуючи, що $1\text{нм} = 10^{-9}\text{м}$.

6. Визначають похибки вимірів:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_d + \varepsilon_{l/z} = \varepsilon_d + \frac{\Delta_l}{\langle l \rangle} + \frac{\Delta_z}{\langle z \rangle},$$

$$\Delta_\lambda = \langle \lambda \rangle \cdot \varepsilon_\lambda$$

7. Повторюють виміри і розрахунки пп. 5-7 для фіолетової границі видимого спектра.

8. Порівнюють отримані в експерименті значення довжин хвиль червоної і фіолетової границь видимого спектра з табличними величинами.

Запитання для самоконтролю

1. Які хвилі називаються когерентними? Які способи отримання когерентних джерел світла вам відомі?

2. Яку відстань називають геометричною різницею ходу? Що називається фазою хвиль? Запишіть зв'язок між різницею фаз і різницею ходу хвиль.

3. У чому полягає явище інтерференції хвиль? Сформулюйте умови максимумів і мінімумів при інтерференції.

4. У чому полягає явище дифракції? Як воно пов'язане з явищем інтерференції?

5. Сформулюйте принцип Гюйгенса-Френеля і поясніть за його допомогою дифракційну картину, отриману від решітки.

6. Як побудована дифракційна решітка? Що називають постійною решітки? Виведіть формулу решітки.

7. Чим відрізняється дифракційний спектр від дисперсійного?

8. Де використовуються дифракційні решітки?

РОБОТА 5 - 7.

ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ МАЛЮСА

Мета роботи: ознайомитися на досліді з явищем поляризації світла; перевірити на досліді закон Малюса; ознайомитись із способами одержання поляризованого світла та його застосуванням.

Прилади та обладнання: оптична лава, на якій встановлено освітлювач O , два поляроїди Π і A , фотоелемент Φ з мікроамперметром.

Закон Малюса

У цій роботі поляризацію світла спостерігають за допомогою установки, схема якої наведена на рис. 1.

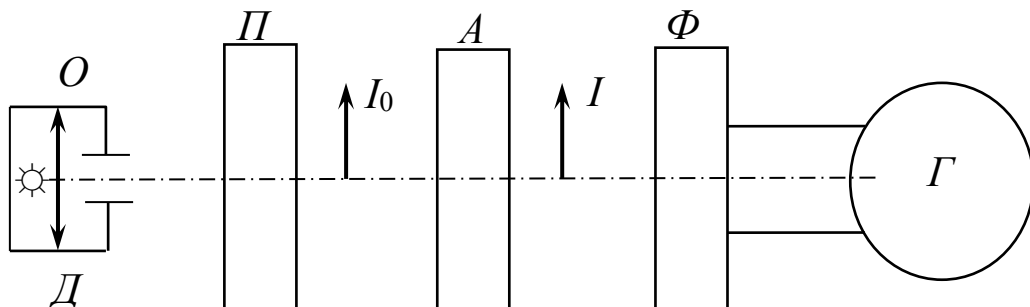


Рис. 1

Природне світло від освітлювача O , проходячи крізь перший поляроїд Π (поляризатор), перетворюється в плоскополяризоване світло з інтенсивністю I_0 . Неозброєним оком неможливо відрізнити поляризоване світло від природного. Тому для спостереження поляризованого світла за поляризатором Π встановлено другий поляроїд A (аналізатор). Його можна повертати навколо напрямку розповсюдження поляризованого променя. Кут α , на який буде повернуто аналізатор A , читають на круговій шкалі. При обертанні аналізатора інтенсивність I світла, що пройшло крізь нього, періодично змінюється. Двічі за один оберт інтенсивність досягає свого максимального значення ($I = I_0$) і двічі зменшується до нуля ($I = 0$).

У цьому проявляється закон Малюса, згідно якого: інтенсивність I світла, яке пройшло через систему поляризатор–аналізатор, пропорційна квадрату косинуса кута α між напрямками пропускання світла поляризатора та аналізатора:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha . \quad (1)$$

Співвідношення (1) можна записати як

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 \alpha , \quad (1a)$$

тобто у вигляді лінійної функції $f = f(x)$; тут $f = \frac{I}{I_0}$, а $x = \cos^2 \alpha$.

Графік цієї функції наведено на рис.2 .

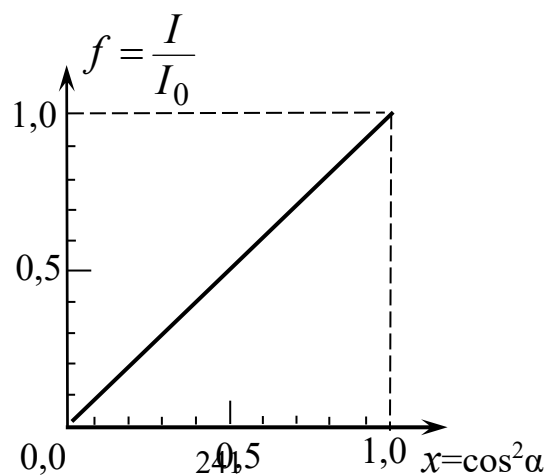


Рис. 2

Для перевірки закону Малюса використовується явище фотоефекту: світло, що пройшло крізь систему поляризатор-аналізатор, потрапляє на фотоелемент Φ (рис.1) і викликає появу фотоструму i , який вимірюється мікроамперметром Γ .

Через те, що дослід проводиться в незатемненому приміщенні, крім світла, що пройшло систему поляризатор-аналізатор, на фотоелемент падає ще і стороннє розсіяне світло. Воно викликає фотострум i_T , який називають “темновий струм”. Його вимірюють мікроамперметром при вимкненому освітлювачі O .

Перевірка закону Малюса базується на припущенні, що сила фотоструму i пропорційна інтенсивності світла I , що падає на фотоелемент:

$$I \approx i \quad . \quad (2)$$

Враховуючи темновий струм i_T , співвідношення пропорційності запишемо у вигляді :

$$I \approx i - i_T, \quad (2,a)$$

де i – сила фотоструму при ввімкненому освітлювачі O .

Для максимальних значень інтенсивності світла I_0 та відповідної сили фотоструму i_0 маємо співвідношення:

$$I_0 \approx i_0 - i_T. \quad (2,b)$$

Отже, з урахуванням (2,a) і (2,b), одержимо:

$$f = \frac{I}{I_0} = \frac{i - i_T}{i_0 - i_T} \quad . \quad (3)$$

Функцію f розраховують за експериментальними даними для сил струмів i_0 , i , i_T . Будують графік залежності $f = f(\cos^2 \alpha)$ і порівнюють його з теоретичним, який зображений на рис.2. Порівняння графіків з урахуванням похибок вимірювань дозволяє зробити висновок про виконання закону Малюса.

Порядок виконання роботи

1. Рисують нижченаведену таблицю.

Вписують до таблиці значення $\cos^2 \alpha$ для кутів α від 0° до 360° через кожні 10° . При цьому використовують співвідношення $\cos^2 \alpha = \cos^2(180^\circ - \alpha)$.

$$\text{Наприклад: } \cos^2 100^\circ = \cos^2(180^\circ - 100^\circ) = \cos^2 80^\circ.$$

Вписують у таблицю значення Δ_x для кутів α від 0° до 360° , пам'ятаючи, що вони повторюються з періодом 90° . Довірча границя систематичних похибок величини $x = \cos^2 \alpha$ визначається виразом $\Delta_x = \Delta_c = 2 \cdot c_\alpha \cdot |\sin 2\alpha|$, де $c_\alpha = 1,75 \cdot 10^{-2}$ рад – ціна поділки шкали аналізатора в радіанах.

2. Освітлювач O , поляроїд – поляризатор Π , поляроїд – аналізатор A і фотоелемент Φ розміщують на одній оптичній осі (на одній висоті над оптичною лавою).

3. З'єднують в електричне коло фотоелемент Φ і мікроамперметр Γ .

4. Дивляться на шкалу мікроамперметра і записують у таблицю ціну поділки c_i його шкали та значення темного струму i_T (струму при вимкненому освітлювачі O).

5. Настроюють установку:

- вмикають освітлювач, попередньо прикривши діафрагму D ;
- встановлюють аналізатор A на 0° ;
- повертаючи поляризатор Π навколо горизонтальної осі, одержують максимальне відхилення стрілки мікроамперметра вправо;
- відкривають діафрагму D освітлювача O настільки, щоб стрілка мікроамперметра відхилилась на всю шкалу (при цьому $i = i_0$). Покази записують у таблицю.

6. Повертаючи аналізатор A від 0° до 360° , записують через кожні 10° значення фотоструму i .
7. Переконаються, що на проміжку $0^\circ - 360^\circ$ фотострум двічі буває максимальним ($i = i_0$), а двічі – мінімальним ($i = i_T$).
8. Розраховують $(i - i_T)$, $(i_0 - i_T)$ та $f = \frac{i - i_T}{i_0 - i_T}$.

9. Розраховують відносну похибку ε_f та довірчу границю повної похибки Δ_f :

$$\varepsilon_f = \frac{2 \cdot c_i}{i_0 - i_T} \left(\frac{1}{f} + 1 \right), \quad \Delta_f = f \cdot \varepsilon_f,$$

де c_i – ціна поділки мікроамперметра.

Одержані результати заносять у таблицю.

10. Рисують графік теоретичної залежності $f = f(x)$, як це показано на рис. 2.

На цьому ж графіку за даними таблиці будують експериментальні точки. Для кожного проміжку кутів α ($0^\circ - 90^\circ$; $90^\circ - 180^\circ$; $180^\circ - 270^\circ$; $270^\circ - 360^\circ$) точки позначають по – різному (див., наприклад, рис.3).

11. На цьому ж графіку, за даними таблиці, для кожної експериментальної точки відкладають значення довірчих границь похибок Δ_x та Δ_f у вигляді горизонтальних та вертикальних розносів.

12. Аналізують побудований графік. Якщо розноси експериментальних точок перетинають теоретичну пряму, то це означає, що експериментальні дані у межах похибок збігаються з теоретичними, й експеримент підтверджує закон Малюса. Якщо ж ні, то слід подумати, чим викликаний незбіг: випадковими похибками, непаралельністю світлового пучка, нелінійністю фотоструму в даному фотоелементі чи з іншої причини. Запропонувати заходи щодо підвищення точності експерименту.

1. Робоча таблиця до лабораторної роботи 5.7

α , град.	$x = \cos^2 \alpha$	Δ_x	i , мкА	i_T , мкА	$i - i_T$, мкА	$f = \frac{i - i_T}{i_0 - i_T}$	ε_f	Δ_f
$c_\alpha =$	-	-	$c_i =$	$c_i =$	-	-	-	-
0	1.00	0.000	$i = i_0 =$					
10	0.97	0.006						
20	0.88	0.022						
30	0.75	0.030						
40	0.59	0.034						
50	0.41	0.034						
60	0.25	0.030						
70	0.12	0.022						
80	0.03	0.006						
90	0.00	0.000						
·	·	·						
·	·	·						
·	·	·						
360	1.00	0.000						

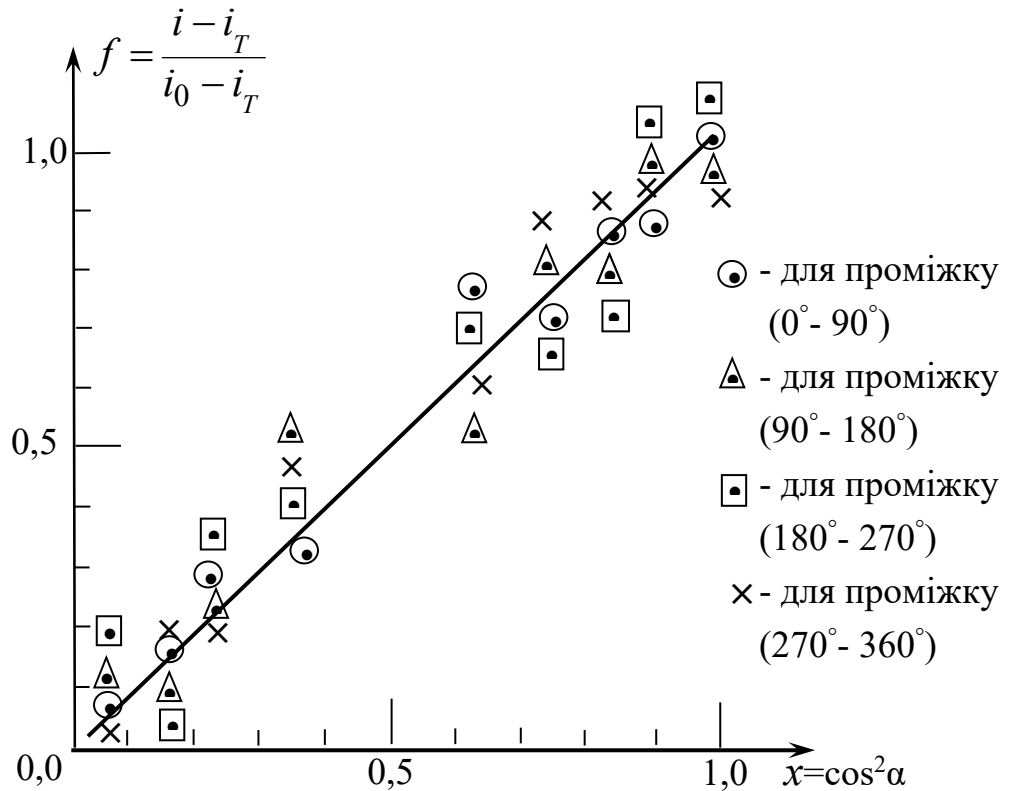


Рис. 3
245

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення плоскополяризованої, неполяризованої і частково поляризованої світлової хвилі.
2. Чому природне світло не є поляризованим?
3. У чому суть явища поляризації? Поясніть дослід зі спостереження поляризації світла.
4. Яка причина подвійного променезаломлення? Назвіть властивості звичайного та незвичайного променів.
5. Поясніть будову та принцип дії призми Ніколя.
6. У чому суть явища дихроїзму? Як і для чого використовується це явище?
7. Запишіть і сформулюйте закон Брюстера, поясніть його рисунком.
8. Запишіть і сформулюйте закон Малюса, поясніть його рисунком.

РОБОТА 5 - 8.

ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОПТИЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН ПОЛЯРИМЕТРОМ

Мета роботи: вивчити явище повертання площини коливань і принцип роботи поляриметрів, навчитися визначати концентрації оптично активних речовин.

Прилади і матеріали: поляриметр і кювети – трубки з досліджуваними розчинами.

Повертання площини коливань

Деякі кристали (наприклад, кварц), розчини багатьох органічних речовин (наприклад, цукру), а також деякі чисті рідини мають властивість повертати площину коливань поляризованого світла навколо осі світлового пучка (рис.1). Такі речовини називають

оптично активними. При повертанні площини коливань за годинниковою стрілкою (якщо дивитися назустріч променю) речовину називають правоповертаючою, при повертанні проти годинникової стрілки – лівоповертаючою. На досліді встановлено, що кут φ повороту площини коливань пропорційний товщині l шару оптично активної речовини, а для розчинів – також і концентрації C :

$$\varphi = \varphi_0 \cdot l \cdot C . \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності φ_0 називають питомим повертанням. Він чисельно дорівнює куту повороту площини коливань при проходженні шару речовини одиничної товщини з одиничною концентрацією. Питоме повертання φ_0 залежить від довжини світлової хвилі. Тому при дослідженні повертання площини коливань користуються лише монохроматичним світлом.

Для розчину з невідомою концентрацією C_x кут повороту площини коливань φ_x і рівність (1) перепишемо як

$$\varphi_x = \varphi_0 \cdot l \cdot C_x . \quad (2)$$

Поділивши почленно (2) на (1), одержимо формулу для знаходження невідомої концентрації C_x :

$$C_x = C \frac{\varphi_x}{\varphi} . \quad (3)$$

Будова та принцип роботи поляриметра

Кут повороту площини коливань можна виміряти спеціальним приладом – поляриметром, основними деталями якого є два ніколі – поляризатор $П$ (рис.2) і аналізатор $А$, а між ними в кюветі $К$ розміщують оптично активну речовину. Вимірювання кута φ (або φ_x) починають за відсутності кювети між поляризатором і аналізатором. Повертають аналізатор $А$, доки коливання світлового вектора \vec{E} не будуть повністю погашені (“установлення на темноту”).

Це станеться, коли напрямки коливань N_{Π} і N_A світлового вектора при проходженні через поляризатор і аналізатор стануть взаємно перпендикулярними (рис.3). У таких випадках кажуть, що поляризатор і аналізатор перехрещені.

Якщо тепер між перехрещеними ніколями розмістити кювету з оптично активною речовиною, то внаслідок повороту світлового вектора на деякий кут φ (нове положення світлового вектора на рис.3 позначено \vec{E}_{φ}) поле зору прояснюється. Цей кут можна визначити, повертаючи аналізатор до повного гасіння світла – доки напрямок N'_A коливань світлового вектора променів, які проходять через аналізатор, стане перпендикулярним вектору \vec{E}_{φ} . Кут повороту аналізатора читають на його шкалі. Він дорівнює куту φ повороту площини коливань.

При вимірюванні користуються монохроматичним світлом, яке одержують за допомогою світлофільтра Φ , розміщеного між джерелом світла I та поляризатором Π (рис.2).

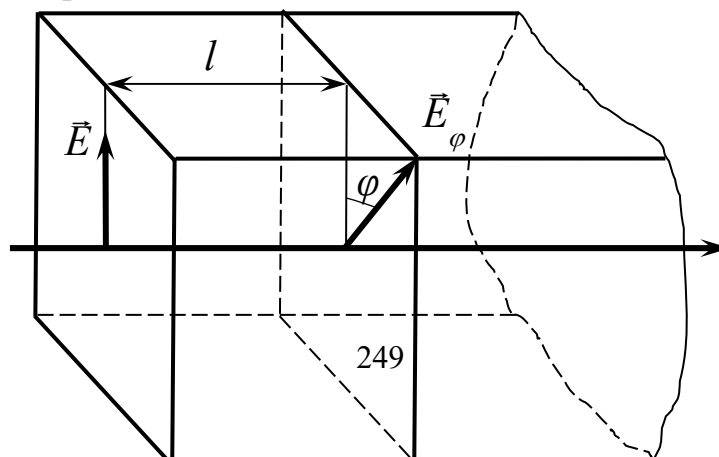
Момент повного затемнення точно визначити неможливо. Тому, пам'ятаючи, що очі чутливі до змін яскравості, для точнішого вимірювання кутів використовують поляриметри з напівтіньовим полем зору. Таке поле складається з двох або трьох частин (рис.4). Його можна одержати різними засобами. У найпростішому випадку – за допомогою спеціальної кварцевої пластинки (напівтіньової), яка повертає вектор \vec{E} падаючої на неї світлової хвилі на невеликий кут β (в положення \vec{E}' на рис.4,а). Напівтіньову пластинку M встановлюють за поляризатором Π так, щоб вона закривала половину (рис.4,а), або третину (рис.4,б) поля зору. Щоб поля M і Π були однаково яскраві, аналізатор A повертають у таке положення, коли він пропускає коливання, перпендикулярні бісектрисі кута β . У цьому випадку аналізатор пропускає малі, але однакові, компоненти \vec{E}'_A і \vec{E}_A (рис.4,а). Якщо ж напрямки векторів зміняться на кут φ

(внаслідок проходження світла через шар оптично активної речовини), то для вирівнювання яскравостей полів аналізатор повертають на такий же кут. Його числове значення читають на шкалі аналізатора. Так працюють кругові поляриметри – в них повертається аналізатор.

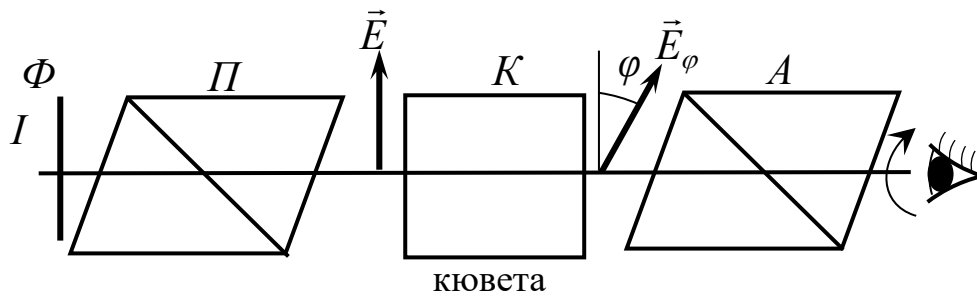
У напівтіньових поляриметрах аналізатор нерухомий, а яскравості полів M і Π вирівнюють клиновим компенсатором (рис.5). Він складається із двох кварцевих клинів: рухомого лівоповертаючого клина, що повертає вектор \vec{E} проти годинникової стрілки і нерухомого правоповертаючого – контрклина, який повертає вектор \vec{E} за годинниковою стрілкою. Переміщуючи рухомий клин відносно контрклина, встановлюють таку сумарну товщину двох клинів на рівні оптичної осі, при якій кут повороту площини коливань φ , обумовлений оптично активною речовиною, компенсується кутом повороту φ' , обумовленим кварцем, при цьому $\varphi = \varphi'$.

Сахариметри – це поляриметри, якими можна визначити концентрацію сахарози в розчині. В них одночасно з рухомим клином переміщується шкала, проградуїрована в міжнародних цукрових градусах ($^{\circ}S$); $100^{\circ}S$ відповідають $34,62^{\circ}$ кутовим. Сахариметрами безпосередньо визначають масову частину сахарози, виражену у відсотках. Для цього результат, прочитаний на шкалі сахариметра, множать на перевідний коефіцієнт 0,260 і ділять на густину досліджуваного розчину. Концентрацію ж будь-яких інших оптично активних речовин у розчинах визначають за формулою (3).

Практичне застосування явища оптичної активності описане в додатку до цієї роботи.



Оптично активна речовина



кювета

Рис. 2

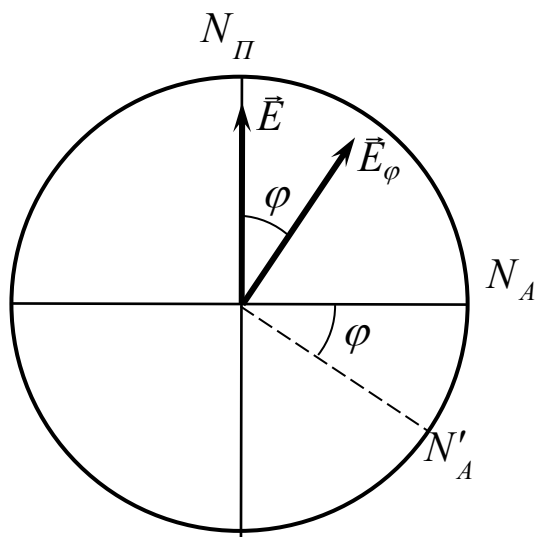
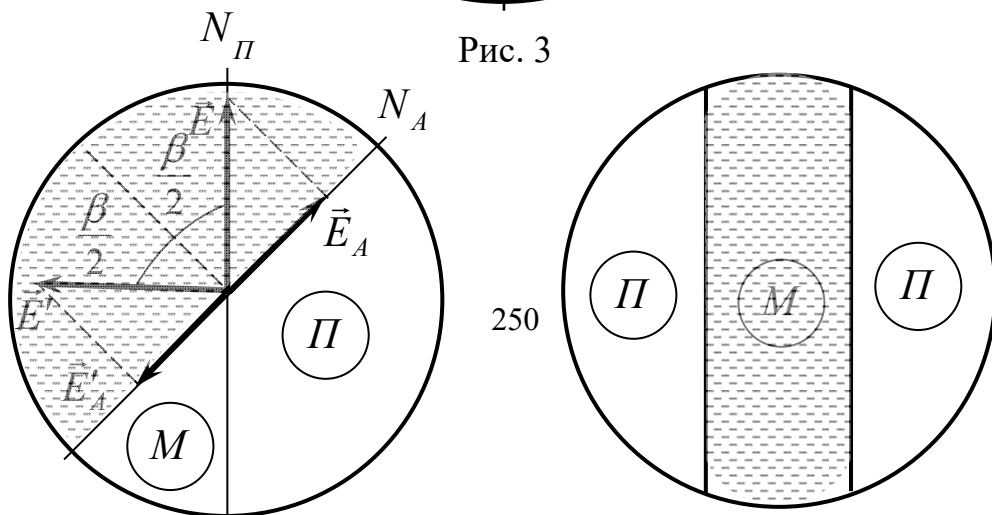


Рис. 3



Порядок виконання роботи

1. Рисують табл. 1.
2. Читають опис поляриметра – знайомляться з його будовою і з'ясовують, якого він типу: круговий, напівтіньовий чи сахариметр.
3. Перевіряють, чи встановлено світлофільтр Φ перед джерелом світла I (рис.2).
4. Виймають з поляриметра кюветку K , вмикають джерело світла і, обертаючи окуляр, добиваються чіткої видимості лінії, яка розділяє поле зору на два порівняльні поля .
5. Визначають ціну поділки шкали аналізатора і записують її значення в таблицю.

Таблиця

№п/п	Задані величини	Результати прямих вимірювань			Результати непрямих вимірювань		
	$C, \%$	$\alpha_0, ^\circ S$	$\alpha, ^\circ S$	$\alpha_x, ^\circ S$	$\varphi, ^\circ S$	$\varphi_x, ^\circ S$	$C_x, \%$
	-	$c =$	$c =$	$c =$	-	-	-
1	-				-	-	-
2	-				-	-	-
3	-				-	-	-
$\langle x \rangle$							
Δ_c , при $P_c = 1$	-				-	-	-

Δ , при $P_0 \geq 0,95$	-				-	-	-
Δ , при $P \geq 0,95$							
ε							

6. Установлюють шкалу на нуль: повертають гвинт компенсуючого клина (або аналізатора) доки яскравість всього поля зору (поблизу повного затемнення) стане однаковою. Якщо це зроблено вірно, то найменший поворот гвинта вправо чи вліво зумовлює неоднакову яскравість поля зору.

Читають на шкалі значення початкового кута α_0 (він може дещо відрізнятись від нуля); проти нуля ноніуса читають число цілих одиниць, а порядковий номер тієї поділки ноніуса, яка збігається з поділкою нижньої (основної) шкали, дає число десятих і сотих часток одиниці.

Якщо нуль ноніуса зсунутий вліво від нуля нижньої шкали, відлік беруть зі знаком мінус, а десяті і соті частки одиниці визначають за лівою частиною ноніуса.

7. Поміщають у поляриметр кювету з розчином цукру відомої концентрації C . Досягнувши однакової яскравості поля зору (двох його частин – порівняльних полів), читають на шкалі відлік α . Записують значення α і C у таблицю.

Примітка. Якщо кювета порожня, її промивають дистильованою водою і заповнюють розчином так, щоб не було бульбашок повітря: кювету наповнюють до утворення поверх неї випуклого меніска, “зрізають” меніск плоскопаралельною пластинкою, закручують кришку кювети так, щоб рідина не просочувалась.

8. Повторюють п. 7 з розчином цукру невідомої концентрації C_x . Відлік позначають α_x .

9. Виміри п.п. 6-8 повторюють не менше трьох разів, одержані результати заносять у таблицю.

10. Розраховують середні значення результатів прямих і непрямих вимірів:

$$\langle \varphi \rangle = \langle \alpha \rangle - \langle \alpha_0 \rangle; \quad \langle \varphi_x \rangle = \langle \alpha_x \rangle - \langle \alpha_0 \rangle;$$

$$\langle C_x \rangle = \langle C \rangle \cdot \frac{\langle \varphi_x \rangle}{\langle \varphi \rangle}.$$

11. Визначають довірчі границі при заданих довірчих імовірностях і відносні похибки прямих і непрямих вимірів. При цьому враховують, що:

$$\varepsilon_{C_x} = \varepsilon_C + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_{\varphi_x}; \quad \Delta_\varphi = \Delta_\alpha + \Delta_{\alpha_0}; \quad \Delta_{\varphi_x} = \Delta_{\alpha_x} + \Delta_{\alpha_0}.$$

12. Порівнюють одержану точність вимірів з можливостями методу.

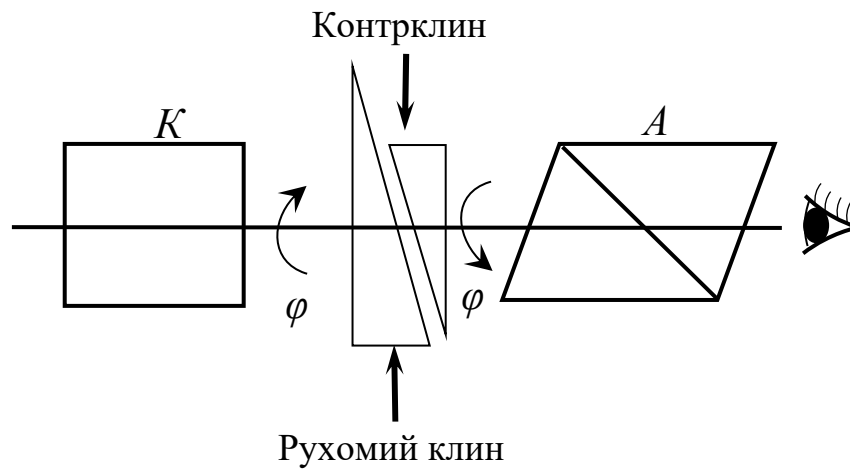


Рис. 5

Запитання для самконтролю

1. Дати визначення плоскополяризованої хвилі, площини коливань, площини поляризації.

2. У чому суть явища поляризації хвиль? Яка специфіка спостереження поляризації світла?

3. Записати, сформулювати і пояснити закон Малюса.
4. Пояснити природу подвійного променезаломлення світла, назвати властивості звичайного і незвичайного променів.
5. Пояснити, чому природне світло неполяризоване, й описати спосіб одержання поляризованого світла за допомогою призми Ніколя.
6. Описати явище повертання площини коливань.
7. Описати будову і пояснити принцип роботи поляриметра.

Додаток до роботи 5-8

Визначення концентрації оптично активних речовин за допомогою поляриметра широко застосовується в цукровій промисловості для технологічного контролю на різних стадіях виробничого процесу: у фармацевтичній промисловості – для реєстрації наявності таких речовин як камфора, кокаїн, нікотин та інших; у медичних та біохімічних лабораторіях – для визначення вмісту цукру та білка в мочі, а також глюкози та цукрози в розчинах; для титрування; для контролю хроматографічного розділення оптично активних речовин; для дослідження кінетики біохімічних реакцій (наприклад, ензимного розщеплення).

Висока чутливість методу дає змогу досліджувати дуже малі маси оптично активних речовин: так в 1 мл розчину можна виявляти навіть такий вміст глюкози, який не перевищує $2,5 \cdot 10^{-9}$ г. Простота методу робить його високопродуктивним – сто і більше проб за годину.

Оптична активність проявляється в речовинах, молекули яких не мають центра або площини симетрії. На основі цього Л. Пастер понад сто років тому започаткував основи стереохімії – вчення про будову молекул. У наш час оптична активність та її дисперсія (залежність від довжини хвилі) ефективно використовується при дослідженні структури і властивостей біополімерів – білків та

нуклеїнових кислот. Вони, як правило, мають спіральну структуру і високу оптичну активність, яка не є однаковою вздовж і поперек спіралі. Речовини з несиметричними молекулами – синтетичні і ті, що зустрічаються в неживій природі, мають однакові кількості молекул з лівою та правою асиметрією. І тому в своєму загальному об'ємі не проявляють оптичної активності, на відміну від найважливіших речовин живої природи – білків, ліпідів, вуглеводів, нуклеїнових кислот, амінокислот, які існують лише у вигляді чисто асиметричних форм, антиподів.

При цьому антиподи однієї асиметрії (наприклад, лівої) не можуть замінитися антиподами іншої асиметрії (правої). Наприклад, із розчину синтетичного цукру бактерії, які ним живляться, засвоюють лише правоповертаючі молекули. Коли весь правоповертаючий цукор з'їдено, бактерії починають голодувати, хоч і знаходяться у розчині лівоповертаючого цукру.

Той факт, що асиметрія оптичної активності характерна лише для живих організмів і речовин органічного походження, дає змогу вирішувати різноманітні наукові проблеми. Наприклад, виявлення оптичної активності нафти стало переконливим свідченням її органічного походження. А відсутність оптичної активності амінокислот, знайдених у 1970 році в складі метеорита, доказало їхнє неземне походження. Причини біологічної доцільності асиметрії в речовинах живої природи до цього часу остаточно не встановлені.

РОБОТА 5 - 9.

ВИВЧЕННЯ ОПТИЧНОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Мета роботи. Вивчення принципу дії квантового генератора на прикладі гелій-неонового лазера і дослідження монохроматичності, когерентності, направленості та поляризації лазерного випромінювання.

Приклади та обладнання. Оптична лава, на якій встановлено

гелій-неоновий лазер ЛГН-105, поляроїд, екран із щілиною, дифракційна решітка, екран з двома щілинами, суцільний екран (аркуш білого паперу), лінійка.

Гелій-неоновий лазер

Оптичним квантовим генератором (лазером) називають прилад, в якому здійснюється генерація монохроматичних електромагнітних хвиль оптичного діапазону в результаті вимушеного (індукованого) випромінювання.

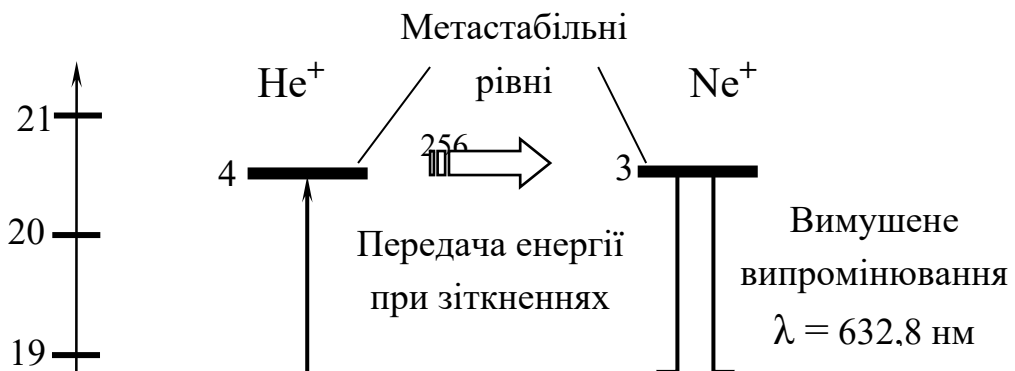
Активним елементом гелій-неонового лазера є газорозрядна трубка з внутрішнім діаметром 1-10 мм і довжиною до 1,5-2 м. Її заповнено гелієм з домішкою неону (тиск гелію - 1 мм рт. ст., тиск неону - 0,1 мм рт. ст.). Схему лазера представлено на рис.1. При цьому використані такі позначення: схема лазера: 1 – трубка; 2, 2' – віконця Брюстера; 3, 3' – дзеркала; 4, 4' – електроди; 5 – блок живлення.

На електроди трубки подають змінну напругу високої частоти або високу (1-2 кВ) постійну напругу, що збуджує газ до світіння – це електричне **накачування** лазера (накачуванням називають процес надання робочій речовині лазера енергії для переведення атомів у збуджений стан). У трубці створюється газорозрядна плазма, що складається з електронів та іонізованих атомів гелію та неону.



Рис. 1

Спрощену схему енергетичних рівнів гелію та неону наведено на рис.2.



Розігнані електричним полем електрони зіштовхуються з атомами неону та гелію і збуджують їх відповідно до рівнів 3 та 4. Через метастабільність рівня 4 гелію відбувається накопичення збуджених атомів гелію. Знаходячись у метастабільному стані протягом часу 10^{-2} с, атоми гелію беруть участь у тепловому русі і час від часу зіштовхуються з атомами неону. Особливість спектрів гелію та неону полягає в тому, що метастабільний рівень 4 гелію та метастабільний рівень 3 неону мають близькі значення енергії. Тому при зіткненнях збуджені атоми гелію передають енергію збудження незбудженим атомам неону, переводячи їх на рівень 3 і цим самим додатково збільшуючи заселеність цього рівня. У результаті це дає *інверсію заселеностей рівнів 2 та 3*, оскільки рівень 2 через малий час життя (порядку 10^{-8} с) практично порожній. Так, у трубці створюється *активне середовище* - сукупність збуджених атомів неону. Спонтанний перехід $3 \rightarrow 2$ деяких атомів неону веде до лавиноподібної генерації фотонів з енергією 1,94 еВ. Їй відповідає

довжина хвилі $\lambda = 632,8$ нм (червона лінія неону). Отже, гелій є накопичувачем енергії збудження, а неон – джерелом вимушеного випромінювання.

Для того, щоб активне середовище стало *генератором* світлових хвиль, потрібен *зворотний зв'язок*. А саме, необхідно, щоб частина світла, яке випромінюється, весь час знаходилась у зоні активного середовища і викликала вимушене випромінювання всіх нових і нових атомів. Для цього активне середовище лазера розміщується між двома дзеркалами, обернутими одне до одного; одне з дзеркал непрозоре, друге – частково прозоре (див. рис. 1, а також ↓ с. 20). Тоді промінь світла, багаторазово відбиваючись від дзеркал, буде проходити багато разів через активне середовище, підсилюючись кожного разу в результаті вимушених переходів атомів з вищого енергетичного рівня на нижчий (переходи 3→2 на рис. 2).

Для електромагнітних хвиль система дзеркал 3 та 3' є *резонатором*. Цей резонатор не тільки *підсилює світло*, але і забезпечує його сувору *монохроматичність* і гостру *направленість* лазерного променя.

Високий ступінь направленості лазерного променя обумовлений великим відношенням відстані між дзеркалами 3 і 3' до діаметра трубки. До того ж багаторазово пройти через активне середовище та підсилитись можуть лише промені, що розповсюджуються під дуже малими кутами до осі трубки або є паралельними осі. Інші ж промені врешті-решт попадають на бокову поверхню трубки, де вони розсіюються або виходять назовні. У гелій-неоновому лазері реальний розбіг пучка становить, як правило, одну-дві кутових мінут.

Для розуміння ролі резонатора в монохроматизації світла розглянемо світлову хвилю, що розповсюджується вздовж осі трубки. Позначимо через b довжину резонатора, тобто відстань між дзеркалами 3 і 3'. Нехай

$$2b = m\lambda,$$

тобто на довжині b вкладається ціле число напівхвиль, що дорівнює

m (число $m \gg 1$; так, при $b = 1$ м і $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ м отримуємо для m значення порядку 10^6). Тоді світлова хвиля, що йде від дзеркала туди і назад, повернеться до цього дзеркала в тій же самій фазі (відмітимо, що рівність фаз є умовою максимуму при інтерференції прямої та відбитої хвиль). Така хвиля підсилиться при другому, третьому і всіх наступних проходженнях через активне середовще. Найближча довжина хвилі $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$, для якої відбувається таке ж підсилення, визначається з умови:

$$2b = (m - 1)(\lambda + \Delta\lambda). \quad (2)$$

Звідси, беручи до уваги рівність (1), знаходимо:

$$\Delta\lambda = \lambda / (m - 1) \cong \lambda / m. \quad (3)$$

Враховуючи оцінку, виконану для m , отримаємо для величини $\Delta\lambda$ значення порядку 10^{-13} см: $\Delta\lambda \cong 2 \cdot 10^{-13}$ см. Хвилі з довжинами в проміжку між λ і $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ практично повністю гасяться резонатором.

Врахуємо тепер, що енергетичні рівні атомів (а, значить, і спектральні лінії, які виникають під час переходів між ними) не є нескінченно тонкими, а **мають скінченну ширину**. Якщо остання менша від $\Delta\lambda$, то з усіх довжин хвиль вимушеного випромінювання умові $2b = m\lambda$ задовольнятиме лише єдина довжина хвилі. Така хвиля підсилиться максимально. Це і призводить до звуження спектральних ліній, що генеруються лазером. При якісних відбиваючих поверхнях дзеркал лазер дає дуже тонку, практично монохроматичну лінію. Якщо ширина лінії, що випромінюється атомами активного середовища, більше, ніж $\Delta\lambda$, то замість однієї підсилюються декілька ліній. У цьому випадку світло лазера складається з близьких, практично монохроматичних ліній.

Випромінювання лазера є лінійно поляризованим. Поляризація забезпечується тим, що розрядна трубка замкнута з торців плоскопаралельними скляними (або кварцевими) пластинами

(вікнами), зорієнтованими так, що світло падає на них під кутом Брюстера θ . На рис.1 справа показано, що коливання електричного вектора у випромінюванні лазера відбуваються в площині рисунка.

Випромінювання лазера є когерентним. Його когерентність обумовлена тим, що вимушено випромінене світло є суворо узгодженим з вимушуючим світлом і не відрізняється від нього. Якщо на шляху лазерного пучка поставити дві паралельні щілини (які відстоять одна від одної, наскільки дозволяє ширина пучка), то можна спостерігати на екрані за щілинами сукупність інтерференційних смуг. У даній роботі дві щілини отримано за допомогою лез бритв, що приклеєні до скла. Між лезами прокладено дротину (див. рис. 3).

Гелій-неоновий лазер описаного типу працює в неперервному режимі, тому пучок його світла має невелику потужність – усього декілька міліват. Однак потужність випромінювання лазерів інших типів, що працюють у режимі коротких ($\sim 10^{-9}$ с) імпульсів, може досягати 10^{10} Вт і більше. Лазери широко використовуються в науці, техніці, медицині. Завдяки відкриттю лазера створено голографію (голографія – метод отримання об'ємних зображень).

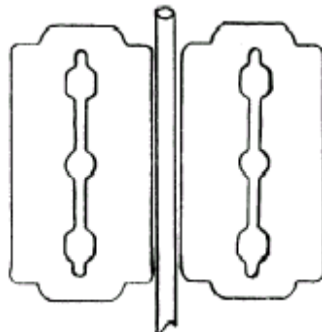


Рис. 3

Порядок виконання роботи

УВАГА! ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, НАВІТЬ ВІДБИТЕ ВІД СТІН, НЕБЕЗПЕЧНЕ ДЛЯ ЗОРУ. ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ЛАЗЕРА ПОВИННО БУТИ ЗАЗЕМЛЕНИМ. ПІД ЧАС РОБОТИ З ЛАЗЕРОМ БІЛЯ УСТАНОВКИ ПОВИННО ЗНАХОДИТИСЬ НЕ МЕНШЕ ДВОХ ЧОЛОВІК.

1. Включають тумблер на щитку живлення лазера. Через 1-2 хв з'являється світіння червоного кольору. Якщо воно періодично гасне, то збільшують значення розрядного струму.

2. Визначають експериментально довжину хвилі випромінювання лазера, використовуючи методику, описану в роботі 5.6, і наведену там робочу формулу (2). Переконаються в тому, що спектр випромінювання лазера містить тільки одну лінію. Порівнюють отримане значення довжини хвилі з наведеним вище.

3. Визначають кутову розбіжність пучка випромінювання. Для цього направляють промінь на екран (аркуш білого паперу), закріплений на відстані кількох метрів на стіні, вимірюють діаметр плями D_1 і відстань L_1 від екрана до лазера. Потім розміщують екран на відстані 30-40 см від лазера і знову вимірюють відстань L_2 від екрана до випромінюючого кінця трубки та діаметр плями D_2 . Використовуючи формулу

$$\varphi = \frac{D_1 - D_2}{L_1 - L_2},$$

визначають кут розбіжності пучка випромінювання φ в радіанах і переводять результат у кутові мінути.

4. Досліджують поляризацію лазерного випромінювання. Для цього пропускають випромінювання лазера через поляроїд, встановлений між лазером та екраном. Обертаючи поляроїд навколо напрямку світлового пучка, можна домогтися практично повного згасання світлової плями на екрані. Переконаються в тому, що при

повному обороті поляроїда світлова пляма двічі гасне. Це свідчить про те, що випромінювання лазера є лінійно поляризованим. Визначають положення площини коливань випромінювання лазера (положення площини пропускання поляроїда задано).

5. Переконаються в когерентності лазерного випромінювання. Для цього на шляху лазерного променя ставлять екран з двома паралельними щілинами і на якомога більшій від нього відстані L (3-4 м) спостерігають на білому екрані (аркуш паперу) інтерференційні смуги. Дослід демонструють викладачеві. Визначають лінійкою відстань H між крайніми світлими смугами і підраховують число k проміжків між ними (число темних смуг). Знаходять відстань $l=H/k$ між сусідніми світлими (темними) смугами. Порівнюють це значення із значенням l , розрахованим за формулою (1) з роботи 5.4,

$$l = \frac{L}{d} \lambda,$$

де d – відома відстань між щілинами, вказана на екрані.

6. Розраховують максимальне значення густини потужності випромінювання досліджуваного лазера за формулою

$$j = \frac{P}{S},$$

де P – паспортне значення потужності лазера (для ЛГН-105 $P=1$ мВт). Площу перерізу пучка розраховують за формулою:

$$S = \frac{\pi a^2}{4},$$

де a – діаметр перерізу пучка (його вимірюють). Виражають розраховану величину j у $\text{Вт}/\text{см}^2$ і порівнюють її з гранично допустимим для ока значенням $j_{\text{гран}}$. Для лазерів, що працюють у неперервному режимі, $j_{\text{гран}} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}/\text{см}^2$.

Запитання та вправи для самконтролю

- 1.Опишіть властивості спонтанного та вимушеного випромінювань.
- 2.Що таке резонансна частота?
- 3.Поясніть зміст термінів “інверсія заселеностей” та “накачування”.
- 4.Опишіть, як саме активне середовище генерує і підсилює світло.
- 5.Опишіть принцип роботи гелій-неонового лазера.
- 6.Сформулюйте закон Брюстера та дайте рисунок із зображенням напрямків коливань електричного вектора у відбитому та заломленому променях.
- 7.Перерахуйте властивості лазерного випромінювання і поясніть, чим кожна з них обумовлена.
- 8.Перерахуйте відомі вам використання лазерів.

6. МОДУЛЬ 6.
„ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ, ФІЗИКИ ТВЕРДОГО
ТІЛА, АТОМА ТА ЯДРА”

6.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ

ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ

Елементи релятивістської механіки

Релятивістська маса:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} \quad \text{чи} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

де m_0 – маса спокою частинки; V – її швидкість; c – швидкість світла в вакуумі; β – швидкість частинки, яка виражена в долях від швидкості світла ($\beta = V/c$).

Взаємозв'язок маси та енергії релятивістської частинки:

$$E = mc^2 \quad \text{або} \quad E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

де $E_0 = m_0 c^2$ – енергія спокою частинки.

Повна енергія вільної частинки:

$$E = E_0 + T,$$

де T – кінетична енергія релятивістської частинки.

Кінетична енергія релятивістської частинки:

$$T = (m - m_0)c^2 \quad \text{або} \quad T = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right).$$

Імпульс релятивістської частинки:

$$p = \frac{m_0 V}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} \quad \text{або} \quad p = m_0 c \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Зв'язок між повною енергією та імпульсом релятивістської частинки:

$$E^2 = E_0^2 + (pc)^2.$$

Хвильові властивості мікрочастинок. Хвилі де Бройля

Французький вчений де Бройль висунув гіпотезу (1924 р.) про універсальність корпускулярно-хвильового дуалізму, тобто твердження, що не тільки електромагнітне випромінювання являє

собою хвильовий процес і потік частинок (квантів випромінювання, фотонів) одночасно, але й мікрочастинки аналогічно зв'язані з хвильовим процесом. Якщо частинка має енергію \mathcal{E} і імпульс P , то з нею пов'язується хвиля з частотою

$$\nu_B = \frac{\mathcal{E}}{h}$$

та довжиною

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \text{ або } \lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}.$$

Ця хвиля називається **хвилею де Бройля**. Хвильова природа мікрочастинок виявлена експериментально (дифракція електронних та нейтронних пучків на кристалах). Хвильові властивості електронних пучків використовуються в роботі електронного мікроскопа. Довжина хвилі де Бройля для електронів значно менша довжини світлової хвилі, що обумовлює дуже велику роздільну здатність електронного мікроскопа, що дає можливість одержати інформацію про окремі атоми і молекули речовини, що неможливо отримати за допомогою оптичного мікроскопа.

Імпульс частинки та його зв'язок з кінетичною енергією T :

а) $p = m_0V$; $p = \sqrt{2mT}$;

б) $p = mV = \frac{m_0V}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$; $p = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + T)T}$,

де m_0 – маса спокою частинки; m – релятивістська маса; V – швидкість частинки; c – швидкість світла у вакуумі; E_0 – енергія спокою частинки ($E_0 = m_0c^2$).

Співвідношення невизначеностей:

а) $\Delta p_x \Delta x \geq h$ для координати та імпульсу,

де Δp_x – невизначеність проекції імпульсу на вісь x ; Δx – невизначеність координати;

б) $\Delta E \Delta t \geq h$ для енергії та часу,

де ΔE – невизначеність енергії; Δt – час життя квантової системи в даному енергетичному стані.

Одномірне рівняння Шредінгера для стаціонарних станів:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi(x) = 0,$$

де $\psi(x)$ – хвильова функція, яка описує стан частинки; m – маса частинки; E – повна енергія; $U(x)$ – потенціальна енергія частинки.

Густина ймовірності:

$$\frac{d\omega(x)}{dx} = |\psi(x)|^2,$$

де $\psi(x)$ – ймовірність того, що частинка може бути знайдена поблизу точки з координатою x на ділянці dx .

Ймовірність знаходження частинки в інтервалі від x_1 до x_2 :

$$\omega = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx.$$

Розв'язок рівняння Шредінгера для одомірної, нескінченно глибокої, прямокутної потенціальної ями:

а) $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n}{l} x$ – власні нормовані хвильові функції;

б) $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2}$ – власні значення енергії,

де n – квантове число ($n=1,2,3,\dots$); l – ширина потенціальної ями.

При цьому в області $0 \leq x \leq l$; значення $U \rightarrow \infty$ та $\psi(x) = 0$.

Теорія атома за Бором. Спектр атома водню. Природа спектральних ліній

1 Відомо, що спектри випромінювання газів – лінійчасті. Вимірювання частот спектральних ліній показало, що вони розміщуються групами (серіями) і підпорядковуються певним закономірностям; їх було встановлено емпірично. Самий простий спектр належить самому простому хімічному елементу – водню. Частота ν будь-якої лінії спектра водню описується формулою:

$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1)$$

де $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ – константа, що називається сталою Рідберга, а k та n – додатні цілі числа, причому $n > k$.

Група ліній, що відповідає $k=1$ і $n = 2,3,4,\dots$, розміщується в ультрафіолетовій частині спектра – це серія Лаймана. Групу ліній, для

якої $k=2$ і $n = 3,4,5,\dots$, названо серією Бальмера. Чотири її лінії знаходяться у видимій області спектра, інші – в ультрафіолетовій. При $k=3,4,5,\dots$ отримуємо відповідно серії Пашена, Брекета, Пфундта і т.д.; вони знаходяться в інфрачервоній області.

2. Оскільки частоти ліній визначаються різницями енергій стаціонарних станів атома,

$$h\nu = W_n - W_k, \quad W_n > W_k, \quad (2)$$

то знаючи лінійчатий спектр, можна визначити енергії стаціонарних станів. Для подальшого зручно, помноживши співвідношення (1) на h , представити його у вигляді, подібному до (2):

$$h\nu = \frac{W_B}{k^2} - \frac{W_B}{n^2}; \quad h\nu = \frac{W_B}{n^2} - \left(-\frac{W_B}{k^2} \right), \quad (2a)$$

де $W_B = h \cdot R = 13,55$ еВ – константа, що називається борівською енергією.

Згідно з планетарною моделлю атома, запропонованою Резерфордом, електрон обертається навколо ядра атома водню по коловій орбіті. При цьому сила кулонівського притягання електрона та ядра $F_{кул.}$ відіграє роль доцентрової сили, $F_{доц} = mV^2 / r$ (тут r – радіус орбіти, V – швидкість електрона, що рухається по цій орбіті):

$$F_{кул.} = F_{доц}. \quad (3)$$

Кулонівська сила визначається виразом:

$$F_{кул.} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2},$$

де ϵ_0 – електрична стала. Підставляючи у це співвідношення значення обох сил, одержуємо

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}. \quad (4)$$

Повна енергія атома водню W складається з кінетичної енергії електрона $W_{кін} = mV^2 / 2$ і взаємної потенціальної енергії електрона та ядра,

$$W_{пот} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2}; \quad W = W_{кін} + W_{пот}.$$

Підставляючи в останню формулу значення кінетичної і потенціальної енергій, знаходимо, що повна енергія атома є від'ємною:

$$W = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (5)$$

Тепер, порівнюючи ці співвідношення, знаходимо енергію стаціонарних станів атома:

$$W = W_n = -W_B / n^2. \quad (6)$$

Число n у формулі (6) може приймати будь-які цілі значення від 1 до ∞ , його називають головним квантовим числом, воно визначає номер стаціонарного стану. Як бачимо, зі збільшенням n енергія стаціонарного стану зростає (бо $W < 0$). Стан $n=1$ є основним, йому відповідає найменша енергія атома водню, $W_1 = -W_B = 13,55$ еВ; усі інші стани – збуджені.

3. Співвідношення (5) отримано для будь-якої колової орбіти електрона. Згідно з цим співвідношенням енергія атома визначається радіусом орбіти електрона. Оскільки енергія атома може приймати тільки суворо визначені дискретні значення (див. формулу (6)), то звідси робимо висновок, що і електронні орбіти можуть бути не будь-якими, а тільки суворо визначеними – стаціонарним станам відповідають стаціонарні орбіти. Радіуси стаціонарних орбіт $r=r_n$ знаходимо, прирівнюючи праві частини виразів (5) і (6):

$$r_n = r_B \cdot n^2, \quad \text{де} \quad r_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 W_B} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (7)$$

r_B – константа, що називається борівським радіусом. Відповідно до (7) радіус стаціонарної орбіти пропорційний квадрату головного квантового числа (див. рис.9).

Із співвідношення $r_n = r_B \cdot n^2$ випливає, що значення $n \rightarrow \infty$ відповідає нескінченно великій відстані електрона від ядра. Це означає, що атом водню іонізовано (електрон відірвано від атома). Разом з тим, відповідно до (5) при $n \rightarrow \infty$ прямує до нуля повна енергія W атома. Отже, для іонізації атома водню, що знаходиться в основному стані (тобто такому, що має енергію: $W = W_1 = -W_B$) йому необхідно надати енергію, що дорівнює W_B . Таким чином, борівська енергія має зміст енергії іонізації атома водню.

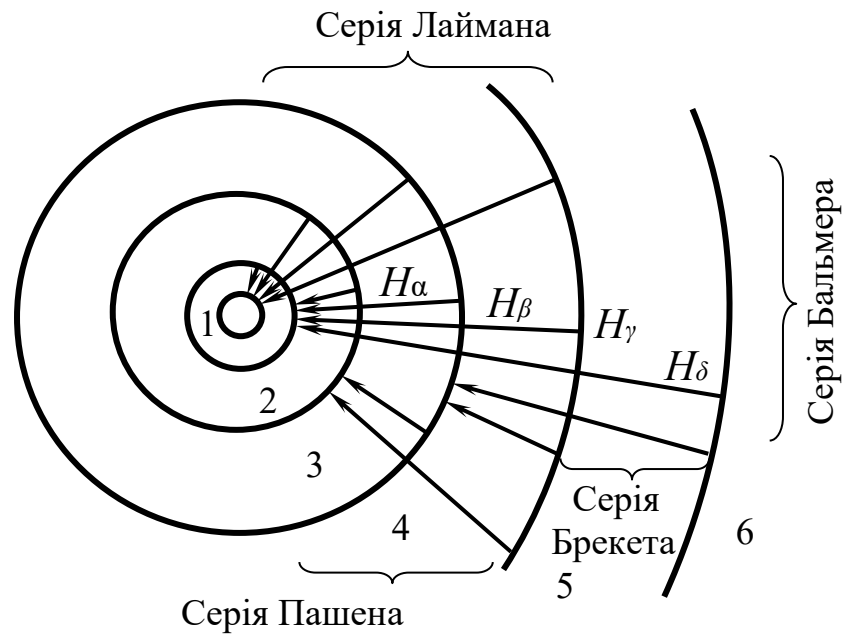


Рис. 9

4. Електрон, що обертається по коловій орбіті, характеризується моментом імпульсу L , який дорівнює mVr (див. рис.10); із співвідношень (4) та (7) випливає, що момент імпульсу електрона, який рухається по n -й стаціонарній орбіті, $mV_n r_n$ (тут V_n – швидкість електрона при русі по n -й орбіті), пропорційний n :

$$mV_n r_n = n\hbar, \quad (8)$$

де $\hbar = h/2\pi = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (константу \hbar як і h , називають сталою Планка).

Таким чином, стаціонарними є такі орбіти, для яких момент імпульсу електрона є кратним величині \hbar . Це твердження отримало назву **правила квантування орбіт**. Його вперше сформулював Бор (1913 р.).

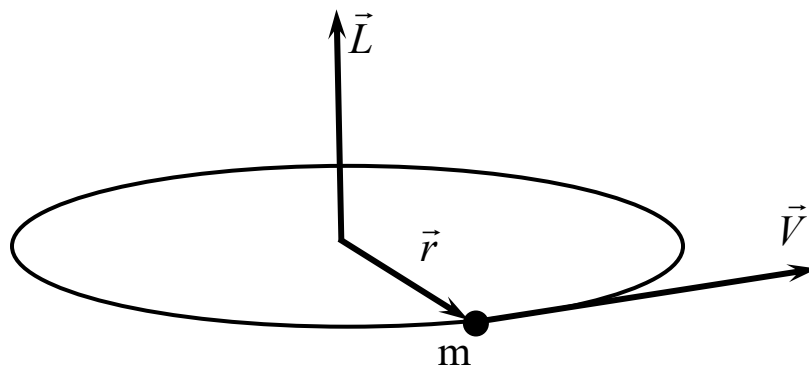


Рис. 10

5. Перехід атома водню з одного стаціонарного стану n (з енергією $W_n = -W_B/n^2$) до іншого $k < n$ (з меншою енергією $W_k = -W_B/k^2$) означає перехід електрона із стаціонарної орбіти номер n на орбіту номер k , яка ближче розташована до ядра. Рис.10 ілюструє борівську інтерпретацію водневих ліній. Ультрафіолетова серія Лаймана ($k=1$), серія Бальмера у видимій області спектра ($k=2$), інфрачервона серія Пашена ($k=3$) і ще більш зсунута в інфрачервону область серія Брекета ($k=4$) показані стрілками відповідних електронних переходів.

Для градування спектроскопа використовують чотири видимі лінії серії Бальмера, що отримали назви H_α (червона, $\lambda = 656,3$ нм), H_β (зелена, $\lambda = 486,7$ нм), H_γ (синя, $\lambda = 434,0$ нм) і H_δ (фіолетова, $\lambda = 410,2$ нм).

ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА

Основні фізичні властивості і характеристики напівпровідників

Напівпровідниками називають речовини, які за своїми електричними властивостями займають проміжне місце між металами і діелектриками: метали мають питомий опір порядку 10^{-6} - 10^{-8} Ом·м, діелектрики – порядку 10^9 - 10^{19} Ом·м, а питомий опір напівпровідників змінюється в широкому інтервалі від 10^{-6} до 10^9 Ом·м.

Характерною загальною властивістю напівпровідників є різка зміна їх **електропровідності** під дією різних зовнішніх факторів – температури, освітленості, тиску тощо. Крім того, електропровідність напівпровідників може сильно змінюватися під впливом мізерної кількості домішки.

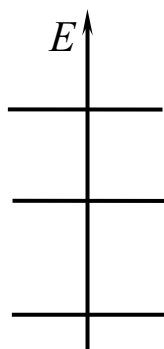
Всі ці властивості можна описати, користуючись зонною теорією твердого тіла. Нижче наведено пояснення основних положень цієї теорії та елементарні відомості про механізм провідності у напівпровідниках.

Енергетичний спектр електрона в кристалі

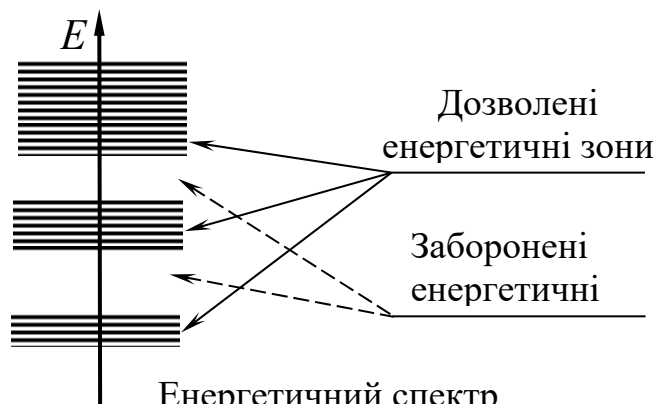
Основним поняттям зонної теорії є поняття енергетичних зон електронів у кристалі. Відомо, що електрони ізольованого атома

можуть знаходитись тільки в таких станах, яким відповідають цілком визначені дискретні значення енергії E (рис. 11)

Коли N однакових атомів будь-якої речовини об'єднуються в кристал, то енергетичний стан кожного електрона визначається уже не тільки взаємодією з ядром свого атома, але і взаємодією з ядром інших атомів кристала. Як показує строгий теоретичний розрахунок, в результаті цієї взаємодії дискретний енергетичний рівень електрона в ізольованому атомі розщеплюється на N близько розташованих один від одного енергетичних підрівнів, утворюючи енергетичну смугу – дозволена енергетична зона. Таким чином, енергетична зона – це сукупність величезного числа (порядку 10^{27}) близько розміщених підрівнів, які практично зливаються в одну квазінеперервну смугу (тільки не просторову, а енергетичну). Її ширина за шкалою енергій порядку кількох електрон-вольт. Дозволена зона тим ширша, чим слабше електрон зв'язаний зі своїм атомом. Дозволені енергетичні зони розділені ділянками заборонених значень енергії – забороненими зонами (рис. 12). Інколи дозволені зони, які виникли при розщепленні різних енергетичних рівнів, можуть частково перекриватися. Отже, енергетичний спектр (набір дозволених значень енергії) електрона в кристалі має зонний характер.



Енергетичні рівні
ізольованого атома



Енергетичний спектр
електрона в кристалі

Рис. 11

Рис. 12

Провідники і напівпровідники

У кристалі, як і в ізольованому атомі, розподіл електронів за енергетичними рівнями визначається двома фундаментальними принципами – принципом Паулі і принципом мінімуму енергії. Отже, якщо енергетичний рівень електрона в атомі не був заповнений, то йому в кристалі відповідатиме незаповнена зона. Якщо ж рівень електрона в атомі був повністю заповнений (двома електронами з протилежно направленими спінами), то відповідна енергетична зона

буде також повністю заповненою (і вміщуватиме $2N$ електронів). Частково заповненому енергетичному рівню в атомі відповідатиме частково заповнена енергетична зона в кристалі (що вміщуватиме N електронів).

Якщо всі стани деякої дозволеної зони повністю заповнені, то така система електронів не може брати участі в утворенні електричного струму. Дійсно, електричне поле, діючи на електрон у кристалі, повинно було б надати йому додаткової швидкості, збільшуючи його енергію, тобто “підняти” його на більш високий енергетичний рівень. Але якщо всі рівні даної дозволеної зони зайняті, то це не відбудеться. Отже, в утворенні електричного струму можуть брати участь тільки електрони частково заповненої зони, у якій над рівнями, заповненими електронами, існують близькі незаповнені рівні.

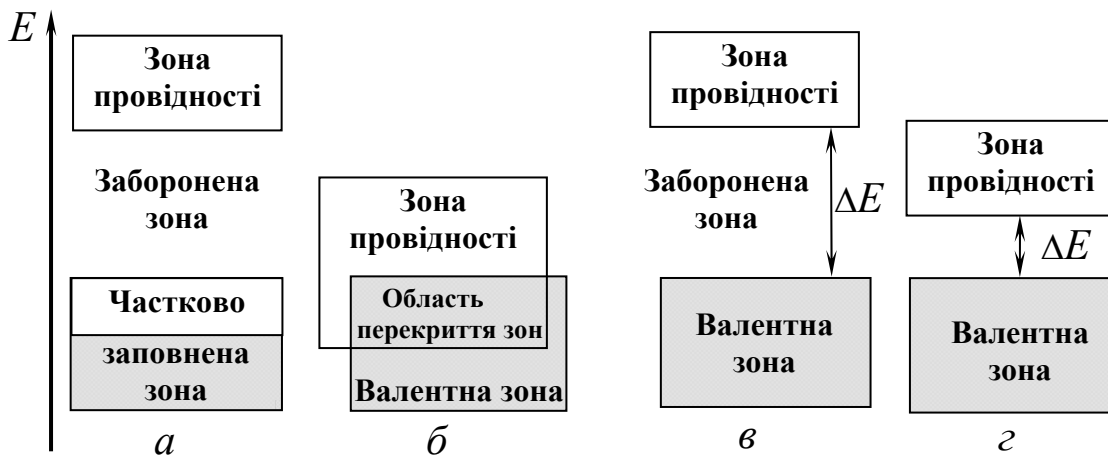


Рис. 12

Відповідно до цього всі речовини поділяють на два класи—**провідники та напівпровідники**. До провідників відносять речовини, які при будь-якій температурі мають частково заповнені дозволені зони, до напівпровідників – речовини, в яких поблизу абсолютного нуля існує кілька повністю заповнених зон, а решта зон – порожні. На рис.13 зображено зонні схеми типових провідника (рис.13 а, б) та напівпровідника (рис.13 в, г) .

Найвища із повністю заповнених зон називається **валентною зоною**. Найнижча із дозволених зон, розташованих над валентною, називається **зоною провідності**. Різниця енергій між “дном” зони провідності і “стелею” валентної зони називається **шириною забороненої зони**. Позначимо її через ΔE . За величиною забороненої зони всі напівпровідники поділяють на **діелектрики і напівпровідники**. До діелектриків відносять речовини з великою шириною забороненої

зони (у типових діелектриків ΔE порядку 5–9eВ). До напівпровідників відносять речовини з порівняно невеликою шириною забороненої зони – не більше 2eВ. Це більшість елементів IV,V,VI груп таблиці Менделєєва, сполуки елементів III та V груп, II і VI груп, більшість окислів, сполуки металів із сіркою, телуrom, селеном, велика кількість органічних сполук.

Власні напівпровідники. Механізм провідності

У теорії напівпровідників за характером механізму електропровідності розрізняють **власні і домішкові** напівпровідники. Власними напівпровідниками є хімічно чисті напівпровідники. Їх провідність називається **власною**.

Специфіку механізму **власної провідності** пояснює зонна структура енергетичного спектра електронів у кристалі напівпровідника. При низьких температурах (і відсутності інших зовнішніх факторів) власні напівпровідники ведуть себе як діелектрики (зовсім не проводять електричного струму).

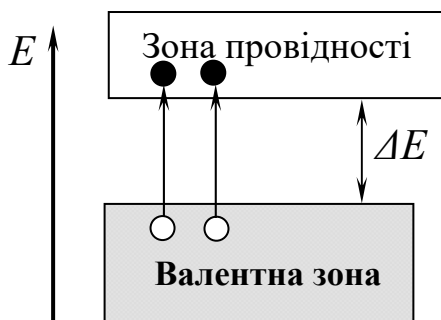


Рис. 14

При підвищенні температури напівпровідника ситуація змінюється: електрон валентної зони, одержавши енергію більшу, ніж ΔE за рахунок теплового збудження, переходить у зону провідності, тобто стає вільним (рис.14). Це означає, що при накладанні на кристал зовнішнього електричного поля електрони будуть переміщуватися проти поля і таким чином створювати електричний струм.

Електропровідність власних напівпровідників, обумовлена електронами, називається **електронною провідністю**, або **провідністю n-типу** (від латинського negative – від’ємний). Однак, оскільки концентрація електронів у зоні провідності напівпровідника набагато менша, ніж у метала, електропровідність напівпровідника відповідно мала.

У власних напівпровідниках має місце особливий механізм провідності – “**дірковий**”. З точки зору зонної теорії твердого тіла

поява діркової провідності у напівпровідника пов'язана з тим, що при переході електрона в зону провідності у валентній зоні з'являється незаповнений енергетичний рівень, вільне місце - "дірка". На рис.14, чорні точки – електрони, світлі кружечки – "дірки". Це вільне місце ("дірка") створює у валентній зоні можливість естафетного ("діркового") механізму провідності: будь-який електрон із більш низького рівня під дією електричного поля отримує додаткову енергію і займає рівень, що вивільнився (заповнює "дірку"). Після цього заповнення у валентній зоні утворюється нова дірка, але вже зміщена порівняно з попередньою.

Такий процес заповнення дірок електронами рівнозначний переміщенню дірки в напрямку, протилежному руху електрона, так, ніби дірка мала позитивний заряд, рівний за величиною заряду електрона.

Провідність власних напівпровідників, обумовлена квазічастинками – дірками, - називається **дірковою провідністю** або **провідністю р-типу** (від лат. positive – позитивний).

Таким чином у власних напівпровідниках спостерігається два механізми провідності: **електронний і дірковий**.

При зростанні температури концентрація електронів n у зоні провідності збільшується. Одночасно збільшується і концентрація дірок p у валентній зоні. Число електронів у зоні провідності дорівнює числу дірок у валентній зоні, оскільки дірки відповідають електронам, збудженим у зону провідності. Тобто

$$n=p.$$

Зростання концентрації з температурою відбувається дуже різко за експоненціальним законом:

$$n = p \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

де $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Приблизно за тим же законом змінюється й електропровідність:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

де σ_0 – коефіцієнт, що залежить від природи напівпровідника і слабо залежить від температури.

Отже, з феноменологічної точки зору напівпровідники відрізняються від металів не тільки величиною електропровідності, але і, перш за все, тим, що **в металах при зростанні температури електропровідність відносно повільно падає, а у напівпровідниках – дуже швидко зростає.**

Домішкові напівпровідники

Поряд з власними напівпровідниками існує широкий клас напівпровідників, у яких концентрація носіїв струму визначається домішками.

Провідність напівпровідників, обумовлена домішками, називається **домішковою**, а самі напівпровідники – **домішковими**.

Домішками вважаються як атоми та іони сторонніх хімічних елементів, включених у кристалічну решітку напівпровідника, так і різні дефекти та викривлення решітки: порожні вузли, зсуви при деформаціях кристала, тріщини тощо.

Домішки вносять зміну в електричне поле кристала, що призводить до зміни його енергетичного спектра. За рахунок домішкових атомів у зонній схемі напівпровідника виникають домішкові енергетичні рівні електронів, розташовані в забороненій зоні між валентною зоною і зоною провідності. Домішки по-різному впливають на кількість носіїв струму у напівпровідниках. З одного боку атоми-домішки можуть легко віддавати свої електрони в кристал, спричиняючи електронний *n*-тип провідності напівпровідника. Такі домішки називаються “донорами” (donare-дарувати).

Найбільш типовими донорами є домішки хімічних елементів V групи таблиці Менделєєва в елементі IV групи.

З іншого боку – атоми-домішки здатні приєднувати до себе електрони, що є у кристалі, створюючи тим самим дірковий *p*-тип провідності напівпровідника. Такі домішки є “акцепторами” (acceptor – той, що приймає). Найтипівішими акцепторами є домішки елементів III групи в елементі IV групи таблиці Менделєєва. Відповідно, розрізняються домішкові напівпровідники *n*-типу і напівпровідники *p*-типу.

Напівпровідники *n*-типу

Прикладом електронної провідності (провідності *n*-типу) є провідність типового напівпровідника германія (Ge) – елемента IV групи, в який вводяться п’ятивалентні атоми миш’яку (As). При заміщенні атома Ge виникає **домішкова електронна провідність (провідність *n*-типу)**, а напівпровідники такого типу називаються **напівпровідниками *n*-типу**.

Напівпровідники *p*-типу

Якщо в кристалічну решітку германія ввести домішковий атом з трьома валентними електронами, наприклад індій (In), то в кристалі виникне **діркова провідність (провідність *p*-типу)**.

Концентрація n_1 електронів, які потрапили в зону провідності, і концентрація p_1 дірок у валентній зоні для випадків напівпровідників n -типу та напівпровідників p -типу, відповідно, визначається виразами:

$$n_1 = c_n e^{-\frac{\Delta E_n}{2kT}},$$

$$p_1 = c_p e^{-\frac{\Delta E_p}{2kT}},$$

де c_n і c_p – коефіцієнти, які залежать відповідно від концентрації донорів і акцепторів.

Таким чином, вводячи домішки в певній кількості, можна одержати напівпровідники з заданим типом провідності: електронної у випадку донорних домішок і діркової у випадку акцепторних домішок.

Важливо зазначити, що на відміну від металів, де концентрація електронів порівняно велика і не залежить від температури, у напівпровідниках при будь-якому характері їх провідності концентрація носіїв струму дуже сильно залежить від температури. Це створює можливість керувати числом носіїв струму у напівпровідникових приладах.

Залежність електропровідності домішкових напівпровідників від температури

На відміну від власної провідності, яка здійснюється одночасно електронами і дірками, домішкова провідність напівпровідників обумовлена в основному носіями одного знака. Ці носії струму, представлені у напівпровіднику в більшості, одержали назву основних носіїв. При невисоких температурах неосновні носії струму істотної ролі в електропровідності не відіграють. При достатньо високій температурі всі носії заряду з домішкових рівнів (наприклад, електрони з донорних рівнів) перейдуть у зону провідності, а отже, концентрація вільних носіїв струму буде постійною аж до температур, при яких помітно проявиться власна провідність.

При подальшому збільшенні температури власна провідність (інтенсивна генерація пар “дірка-електрон”) стає переважаючою і концентрації основних і неосновних носіїв стають практично однаковими, провідність за типом стає змішаною. Отже, в загальному випадку, електропровідність напівпровідника забезпечують два джерела носіїв струму – домішки (доки вони не вичерпані) та атоми решітки кристала. Загальна концентрація вільних носіїв, таким чином,

являє собою суму відповідних концентрацій. Відповідно і електропровідність напівпровідника з домішкою одного типу (наприклад, донорною) складається з двох провідностей

$$\sigma_{\text{власн}} + \sigma_{\text{дом}} = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma_1 e^{-\frac{\Delta E_n}{2kT}}.$$

Температурну залежність електропровідності зручно подати як графік залежності $\ln \sigma$ від $\frac{1}{T}$. Наближений графік залежності $\ln \sigma$ від $\frac{1}{T}$ для напівпровідника з домішкою має вигляд, представлений на рис. 15.

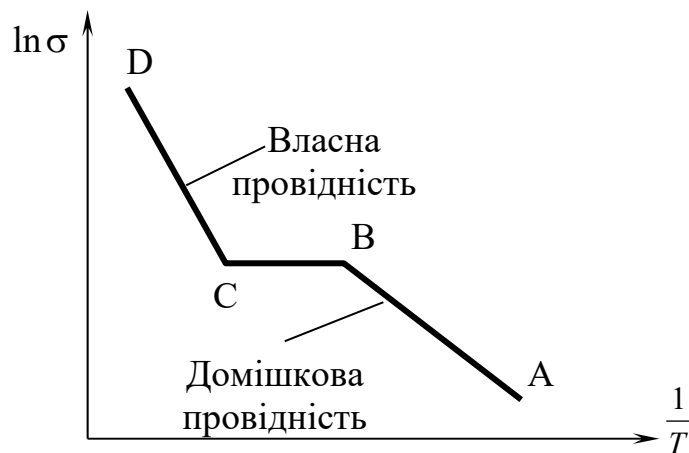


Рис. 15

Ділянка АВ описує домішкову провідність напівпровідника. Її зростання при підвищенні температури обумовлене в основному зростанням концентрації домішкових носіїв струму. Ділянка ВС відповідає області вичерпання домішок: усі електрони з донорних рівнів перейдуть у зону провідності, а отже, концентрація домішкових електронів буде постійна аж до температури, при якій починає суттєво проявлятися власна провідність напівпровідника – ділянка CD.

Отже, переважно діркова або електронна провідність у напівпровідників зберігається лише до температур переходу їх до власної провідності. Наприклад, для германія температура переходу до власної провідності – близько 100 °С.

Рухливість носіїв струму. Електропровідність напівпровідника

У межах класичної електронної теорії електрони провідності за відсутності зовнішнього електричного поля в металах і напівпровідниках ведуть себе як молекули одноатомного ідеального газу, тобто рухаються хаотично. Теплові швидкості вільних

електронів мають різноманітні напрямки і отже тепловий рух електронів не може привести до виникнення струму.

За наявності зовнішнього електричного поля, окрім теплового руху електронів провідності, виникає їх упорядкований рух, тобто виникає електричний струм. Густина струму j_n , обумовлена направленим рухом електронів, виражається через концентрацію електронів n і середню швидкість $\langle v \rangle$ їх упорядкованого руху (швидкість дрейфу електронів).

$$j_n = e n \langle v \rangle .$$

Згідно з класичною теорією провідності електрон у кінці вільного пробігу, зіткнувшись з іонами решітки, віддає їм накопичену в полі енергію, швидкість його впорядкованого руху стає рівною нулю, після чого увесь процес повторюється. Отже, середня швидкість направленого руху електрона, тобто швидкість дрейфу електронів пропорційна напруженості електричного поля:

$$\langle v \rangle = b_n E ,$$

де коефіцієнт пропорційності називається **рухливістю носіїв** струму:

$$b_n = \frac{e \langle \tau_n \rangle}{2 m_n} .$$

Рухливість електронів чисельно дорівнює швидкості їх дрейфу в електричному полі одиничної напруженості.

Густину струму в електронному напівпровіднику виразимо:

$$j_n = e n b_n E ,$$

звідки видно, що густина струму пропорційна напруженості поля. Тобто маємо закон Ома в диференціальній формі, де коефіцієнт пропорційності між j_n і E є питома електропровідність напівпровідника з електронною провідністю

$$\sigma_n = e n b_n .$$

Аналогічно визначається рухливість b_p і питома електропровідність σ_p діркового напівпровідника:

$$b_p = \frac{e \langle \tau_p \rangle}{2 m_p} ,$$

$$\sigma_p = e p b_p .$$

В області власної і змішаної провідності густини j_n і j_p електронного і діркового струмів додаються:

$$j = j_n + j_p = \sigma E ,$$

питома електропровідність напівпровідника дорівнює:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e(nb_n + pb_p).$$

Таким чином, електропровідність напівпровідника залежить від концентрації носіїв струму та їх рухливості.

Температурна залежність електропровідності напівпровідників, як і будь-яких провідників, визначається температурними залежностями концентрації і рухливості носіїв.

Однак рухливість носіїв зі зміною температури змінюється за порівняно слабким степеневим законом:

$$b \approx T^a \quad (\text{для напівпровідників} - \frac{3}{2} \leq a \leq 3),$$

а концентрація носіїв – за сильним експоненціальним законом. Тому наближено можна вважати, що електропровідність напівпровідників зростає з температурою за тим же законом, що і концентрація електронів (дірок).

Рухливість і концентрація носіїв струму в напівпровіднику визначається з експериментального дослідження ефекту Холла і розраховується за значенням питомого опору напівпровідникового зразка.

Межа дотикання двох напівпровідників, один із яких має електронну, а інший – діркову провідність, називається електронно-дірковим переходом (або ***p-n*-переходом**). Контакт двох напівпровідників (електронного і діркового) з ***p-n*-переходом** має уніполярну (односторонню) провідність: струм легко проходить в одному напрямку (пропускному) і майже не проходить в зворотному. Ця властивість ***p-n*-переходу** лежить в основі випрямляючої дії ***p-n*-переходу** в напівпровідникових діодах і тріодах.

Ефект Холла

Напруга на гранях прямокутного зразка при ефекті Холла, тобто холлівська різниця потенціалів:

$$U_H = R_H B j a,$$

де R_H – стала Холла; B – магнітна індукція; j – густина струму; a – ширина пластини (зразка).

Стала Холла для напівпровідників типу германій, кремній та інших, в яких носіями заряду є носії одного виду (n чи p):

$$R_H = 3\pi / (8en),$$

де n – концентрація носіїв заряду.

Просторова решітка (гратка) кристала:

Молярний об'єм кристала:

$$V_M = M/\rho,$$

де M – молярна маса; ρ – густина кристала.

Об'єм елементарної комірки для решітки кубічної сингонії:

$$V_{el} = a^3,$$

де a – параметр решітки.

Число елементарних комірок в одному молі кристала:

$$Z_M = V_M/V_{el}.$$

Якщо кристал складається з однакових атомів, то

$$Z_M = N_A/n,$$

де n – число однакових атомів, які приходяться на елементарну комірку; N_A – стала Авогадро.

Співвідношення числа елементарних комірок до об'єму кристала:

$$Z = Z_M/V_M.$$

Якщо кристал складається з однакових атомів, то

$$Z = \rho N_A / (nM).$$

Параметр кубічної гратки з однакових атомів:

$$a = \sqrt[3]{nM / (\rho N_A)}.$$

Відстань між сусідніми атомами в кубічній решітці:

а) $d = \frac{a}{\sqrt{2}}$ (гранецентрованої);

б) $d = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)a$ (об'ємноцентрованої).

Середня енергія квантового одномірного осцилятора:

$$\langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_0 + \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / (kT)} - 1},$$

де ε_0 – нульова енергія ($\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \cdot \hbar \omega$); h – стала Планка; \hbar – циклічна

частота коливань осцилятора; k – стала Больцмана; T – термодинамічна температура.

ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА

Склад та розміри ядра

Атомне **ядро** складається з елементарних частинок – **протонів** і **нейтронів**. Протон (p) має позитивний заряд, рівний заряду електрона і масу спокою $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$, де m_e – маса електрона.

Нейтрон (n) – нейтральна частинка з масою спокою $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e$. Протони і нейтрони називаються **нуклонами**. Загальне число нуклонів в атомному ядрі називається **масовим числом A** . Атомне ядро характеризується зарядом Ze , де Z – **зарядове число ядра**, рівне числу протонів в ядрі. Воно збігається з порядковим номером хімічного елемента у Періодичній системі елементів Менделєєва.

Ядро позначається символом ${}^A_Z X$, де X – символ хімічного елемента. Оскільки атом нейтральна система, то заряд ядра визначає і число електронів в електронній оболонці атома, а отже, зарядове число Z визначає хімічні властивості атома.

Ядра з однаковими Z , але різними A (тобто з різним числом нейтронів $N=A-Z$) називаються **ізотопами**, а ядра з однаковим A , але різними Z – **ізобарами**. Наприклад, добре відомі ізотопи водню: 1_1H – протій ($Z=1, N=0$), 2_1H – дейтерій ($Z=1, N=1$), 3_1H – тритій ($Z=1, N=2$).

Радіус ядра задається емпіричною формулою $R = R_0 \sqrt[3]{A}$, де $R_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15}$ м. Густина ядерної речовини приблизно однакова для всіх ядер і становить близько 10^{17} кг/м³.

Дефект маси та енергія зв'язку ядра

З експерименту витікає, що маса ядра $m_{\text{я}}$ менша, ніж сума мас нуклонів, з яких воно складається. Із взаємозв'язку між масою та енергією ($E=mc^2$, де $c=3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі) витікає, що будь-якій зміні маси відповідає зміна енергії, отже при утворенні ядра повинна виділятися певна енергія. Із закону збереження енергії витікає: при розділенні ядра на складові частини необхідно затратити таку ж кількість енергії, яка виділяється при його утворенні.

Енергія, яку необхідно затратити, щоб розщепити ядро на окремі нуклони, називається **енергією зв'язку ядра**:

$$E_{\text{зв.}} = (Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2,$$

де величина

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

називається **дефектом маси** ядра.

Формулу для енергії зв'язку ядра можна записати ще у такому вигляді:

$$E_{\text{зв.}} = (Z \cdot m_n + (A - Z) \cdot m_n - m) \cdot c^2,$$

де m_n – маса атома водню, m – маса відповідного атома.

Таким чином, можна записати енергію зв'язку ядра і в такому виді:

$$E_{\text{зв.}} = \Delta m c^2,$$

де Δm – дефект маси ядра; c – швидкість світла у вакуумі.

У позасистемних одиницях енергія зв'язку ядра дорівнює $E_{\text{зв.}} = 931 \Delta m$, де дефект маси Δm в а.е.м.; 931 – коефіцієнт пропорційності (1 а.е.м. \approx 931 МеВ). Ця енергія тоді буде виражена в МеВ (1 МеВ = 10^6 еВ = $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж).

Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

Ізотопи кожного хімічного елемента розділяються на стійкі та нестійкі. Ядра нестійких ізотопів здатні спонтанно (самовільно) розпадатися, перетворюючись при цьому в ядра інших елементів. Такі ізотопи називаються **радіоактивними**, а явище спонтанного перетворення ядер радіоактивних ізотопів – **радіоактивністю**.

Властивість радіоактивного перетворення ядер нестійких ізотопів зумовлена внутрішніми причинами і супроводжується випромінюванням γ -квантів, α - і β -частинок. Умовно радіоактивність поділяється на природну і штучну, залежно від того, як утворено нестійкий ізотоп – штучно чи він існує в природі.

α -розпад пов'язаний з викиданням частинок з ядра, які являють собою потік ядер гелію ${}^4_2\text{He}$, β^- – розпад – з викиданням електрона з ядра при перетворенні нейтрона в ядрі в протон. Надлишок енергії збуджених ядер радіоактивних продуктів звільняється при розпаді у вигляді γ -випромінювання, яке супроводжує усі типи радіоактивності і являє собою електромагнітне випромінювання з дуже короткою довжиною хвилі ($\lambda < 10^{-11}$ м).

Кількість радіоактивного препарату змінюється з часом за експоненціальним законом (рис. 1):

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

де N – кількість атомів радіоактивної речовини, що залишилась на момент часу t ; N_0 – початкова їх кількість (при $t = 0$).

Ця формула виражає **закон радіоактивного розпаду**, λ – постійна для даної радіоактивної речовини величина – називається

сталого радіоактивного розпаду, вона зв'язана з періодом $T_{1/2}$ піврозпаду формулою:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}},$$

або

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Закон радіоактивного розпаду можна записати і так:

$$dN = -\lambda N dt,$$

де dN – число ядер, що розпадаються за інтервал часу dt ; N – число ядер, що не розпалися на момент часу t ; N_0 – число ядер у початковий момент ($t=0$); λ – стала радіоактивного розпаду.

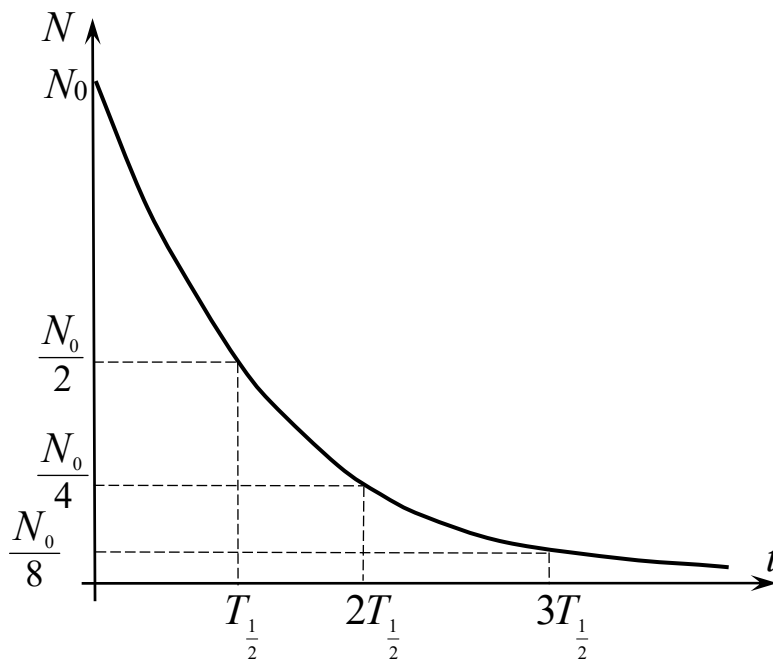


Рис. 1

Період піврозпаду $T_{1/2}$ характеризує швидкість розпаду радіоактивного ізоотопу, вимірюється часом, протягом якого число атомів ізоотопу зменшується наполовину.

Періоди піврозпаду для природно-радіоактивних елементів коливаються в межах від 10^{-4} с до 10^9 років.

Число ядер, які розпалися за час t :

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

У випадку, коли інтервал часу Δt , за який визначиться число ядер, що не розпалися, набагато менше періоду напіврозпаду $T_{1/2}$, число ядер, що розпалися можна визначити за формулою:

$$\Delta N = \lambda N \Delta t.$$

Середній час τ життя радіоактивного ядра – це інтервал часу, за який число ядер, що залишилися, зменшиться в e раз:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Число N атомів, що містяться в радіоактивному ізотопі:

$$N = \frac{mN_A}{M},$$

де m – маса ізотопу; M – молярна маса; N_A – число Авогадро.

Активність A радіоактивного ізотопу:

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N, \text{ чи } A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

де dN – число ядер, які розпадаються за інтервал часу dt ; A_0 – активність ізотопу в початковий момент часу.

Питома активність ізотопу:

$$\hat{A} = A/m.$$

Характеристики радіоактивних джерел

Важливою характеристикою радіоактивного джерела є фізична величина – **активність**. Вона дозволяє судити про його радіаційну безпеку, про кількість радіоактивних ядер тощо.

Активністю нукліда (загальна назва атомних ядер що відрізняється числом протонів Z і нейтронів N) в радіоактивному джерелі називається величина, яка вимірюється числом ядер, що розпалися за одиницю часу

$$a = \frac{\Delta N}{\Delta \tau}.$$

Одиниця активності в СІ – беккерель (Бк): 1 Бк – активність нукліда, при якій за 1 с відбувається один акт розпаду. Позасистемна одиниця активності – кюрі (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Різні ядерні перетворення (ядерні реакції, радіоактивний розпад) супроводжуються випусканням різних видів радіоактивного випромінювання, яке несе в собі енергію і викликає іонізацію атомів середовища, через яке воно проходить. Найчастіше зустрічаються такі різновиди іонізуючих випромінювань як рентгенівське та γ -випромінювання, потоки α -частинок, електронів, нейтронів, протонів. Дія всіх видів іонізуючого випромінювання їх дія на речовину характеризується **дозою випромінювання**. Розрізняють дози випромінювання так.

1. Поглинута доза випромінювання.

Вважається, що зміни, які відбуваються в опроміненій речовині, повністю визначаються поглинутою енергією радіоактивного випромінювання.

Поглинута доза випромінювання – це фізична величина, яка вимірюється енергією будь-якого виду випромінювання, поглинутого одиницею маси опроміненої речовини.

Одиниця поглинутої дози випромінювання – **грей (Гр)**:

1 Гр=1 Дж/кг – це доза випромінювання, при якій опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія будь-якого іонізуючого випромінювання в 1 Дж. Крім одиниці грей, використовують одиницю поглинутої дози випромінювання – **рад**:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

2. Експозиційна доза випромінювання характеризує іонізуючу здатність рентгенівського і γ -випромінювання у повітрі. Експозиційна доза – фізична величина, яка вимірюється сумою електричних зарядів усіх іонів одного знака, створених іонізуючим випромінюванням в одиниці маси опроміненого повітря.

Одиниця експозиційної дози в СІ – **кулон на кілограм (Кл/кг)**, позасистемною одиницею є **рентген (Р)** :

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

3. Біологічна (еквівалентна) доза характеризує дію іонізуючого випромінювання на організм людини.

При однаковій поглинутій дозі різних видів випромінювання біологічні наслідки опромінення живих систем різні (наприклад, α -випромінювання в 20 разів небезпечніше, ніж γ -випромінювання, $Q=20$ – **коефіцієнт якості випромінювання**).

Біологічна доза – це фізична величина, яка визначається як добуток поглинутої дози на коефіцієнт якості випромінювання.

Одиниця еквівалентної дози в СІ називається **зіверт (Зв)**. Позасистемною одиницею біологічної дози є **бер (біологічний еквівалент рентгена)**: 1 бер – доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, що спричиняє таку ж біологічну дію, як і доза рентгенівського або γ -випромінювання в один рентген.

Для рентгенівського випромінювання ($Q=1$) один рад поглинутої дози відповідає одному беру.

При кількісних оцінках дії радіаційного опромінення радіаційними приладами вимірюється, як правило, **потужність** дози випромінювання і **потік** радіаційного випромінювання.

Поглинута доза, утворена в речовині за одиницю часу, називається потужністю поглинутої дози і вимірюється в одиницях рад/с, Гр/с, рад/хв. тощо. Потужність D експозиційної дози вимірюється в СІ в амперах на кілограм (А/кг). Позасистемна одиниця потужності експозиційної дози – рентген за годину (Р/год).

Потік γ -випромінювання – фізична величина, яка вимірюється енергією випромінювання, що проходить через поверхню детектора за одиницю часу.

Детальніше зупинимося на методах **визначення активності радіонукліда та коефіцієнта поглинання γ -випромінювання.**

Активність радіонукліда

Експериментально встановлено, що γ -випромінювання не є самостійним видом радіоактивності. Воно супроводжує процеси α і β -розпадів і не викликає зміни заряду і масового числа ядер.

γ -випромінювання випускається дочірніми ядрами, які в момент свого утворення виявляються збудженими. Надлишок енергії збуджених ядер звільняється у вигляді γ -випромінювання, яке являє собою короткохвильове електромагнітне випромінювання з гранично малою довжиною хвилі $\lambda \leq 0,01 \text{ нм}$ і внаслідок цього – чітко вираженими корпускулярними властивостями, тобто є потоком частинок – γ -квантів (фотонів).

На практиці зручно визначати активність радіоактивного нукліда за потоком γ -випромінювання, враховуючи, що одному акту розпаду ядра відповідає виліт одного γ -кванта (фотона).

Для потужності експозиційної дози γ -випромінювання, як і для будь-якого електромагнітного випромінювання, має місце закон

$$D = K_{\gamma} \cdot \frac{a}{r^2}$$

де a – активність радіонукліда; r – відстань від джерела випромінювання до детектора; K_{γ} – постійна, яка визначає тип радіонукліда, рівна потужності експозиційної дози γ -випромінювання від точкового джерела з одиничною активністю на одиничній відстані від нього. Наприклад, для радію-226

$$K_{\gamma} = 8,4 \cdot 10^6 \text{ мкР} \cdot \text{см}^2 / \text{год} \cdot \text{мКи}$$

6.2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 6

РОБОТА 6 - 1

ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ НАПІВПРОВІДНИКІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ

Мета роботи: вивчити залежність опору напівпровідника від температури і визначити параметри термістора – ширину забороненої зони, температурний коефіцієнт опору, коефіцієнт температурної чутливості, сталу часу.

Прилади та обладнання: термістор, міст постійного струму, термометр, секундомір, термостат.

Як зазначалося раніше, з підвищенням температури електропровідність напівпровідників різко зростає (за експоненціальним законом). Практично при дослідженні температурної залежності провідності напівпровідників зручно користуватися не електропровідністю, а просто опором напівпровідника. Відповідно до формул (1) – (4) у вступній частині для залежності опору напівпровідника від температури можна записати такі вирази:

а) в області власної провідності

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{\Delta E}{2kT}}; \quad (1)$$

б) в області домішкової провідності відповідно для напівпровідників n - і p -типу:

$$R_n = R_n^0 e^{\frac{\Delta E_n}{2kT}}; \quad (2) \quad R_p = R_p^0 e^{\frac{\Delta E_p}{2kT}}, \quad (3)$$

де R_0, R_n^0, R_p^0 – умовні опори напівпровідника відповідного типу при $T \rightarrow \infty$.

Прилад, побудований на сильній залежності опору напівпровідника від температури, називається **термістором** або **терморезистором**.

Термістором служить зразок, виготовлений із напівпровідникового матеріалу і вміщений у балончик зі скла, кераміки чи металу (для запобігання механічним пошкодженням). Невеликі габарити, мала маса, механічна міцність і висока чутливість визначають широке практичне застосування термісторів. Вони

використовуються для реєстрації зміни температури навколишнього середовища, вимірювання потужності електромагнітного випромінювання тощо.

Область застосування кожного типу термістора визначається його властивостями та параметрами.

У даній роботі термістор служить об'єктом дослідження, на якому вивчається його температурна характеристика та визначаються його параметри: коефіцієнт температурної чутливості B , ширина забороненої зони ΔE , температурний коефіцієнт опору α , час релаксації термістора τ .

1. **Температурною характеристикою термістора** називають залежність опору напівпровідникового матеріалу термістора від температури.

Для власного напівпровідника вона має вигляд

$$R = R_o e^{\frac{\Delta E}{2kT}} = R_o e^{\frac{B}{T}}, \quad (4)$$

де

$$\boxed{B = \frac{\Delta E}{2k}} \quad (5)$$

Коефіцієнт температурної чутливості, який характеризує фізичні властивості матеріалу термістора; ΔE – параметр, що називається шириною забороненої зони напівпровідника. Ця величина є найбільш важливою характеристикою електричних властивостей напівпровідника. Дійсно, щоб перекинути електрон із верхнього рівня валентної зони на нижній рівень зони провідності, за рахунок різних зовнішніх факторів (температури, опромінення, сильних електричних полів тощо) витрачається **енергія активації**, рівна ширині забороненої зони ΔE для власного напівпровідника.

2. **Коефіцієнт температурної чутливості B** визначає, як швидко зменшується опір напівпровідника при підвищенні його температури.

Згідно з (4)

$$\ln R = \ln R_o + B \cdot \frac{1}{T},$$

а отже, B визначає нахил температурної характеристики, зображеної

графічно в координатах $x = \frac{1}{T}$, $y = \ln R$.

Коефіцієнт B може бути визначений з даних щодо вимірювання опору термістора при будь-яких двох температурах T_1 і T_2 :

$$R_1 = R_0 e^{\frac{B}{T_1}}, \quad R_2 = R_0 e^{\frac{B}{T_2}}. \quad (6)$$

При почленному діленні першого з виразів (6) на другий і логарифмуванні результату, знаходимо:

$$B = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (7)$$

Знаючи B , визначимо ширину забороненої зони напівпровідника

$$\Delta E = 2 \kappa B \quad (8)$$

3. **Температурний коефіцієнт опору** матеріалу α чисельно дорівнює відносній зміні опору при зміні температури на один кельвін.

Тобто за визначенням

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}.$$

Враховуючи (4), знаходимо

$$\alpha = \frac{1}{R} \left(-\frac{B}{T^2} R_0 e^{\frac{B}{T}} \right) = -\frac{B}{T^2} \quad (9)$$

4. **Стала часу τ** (час релаксації) визначається як проміжок часу, після закінчення якого температура термістора при його охолодженні в спокійному повітрі зменшується на 63% від різниці температур термістора і навколишнього середовища (це відповідає зменшенню різниці температур в e разів). Стала часу характеризує теплову інерційність термістора.

Порядок виконання роботи

1. Збирають електричну схему містка Уїтстона (рис.1), включаючи термістор у коло містка.

2. Вміщують термістор у термостат на одному рівні з голівкою ртутного термометра.

3. Вимірюють опір термістора R_t при різних температурах, починаючи від кімнатної до температури 80-90°C (див. доповнення).

4. Заносять одержані значення температури t і опору R_t до таблиці, враховуючи, що при $l_1=l_2$ $R_t=R$.

5. За даними таблиці будують графік залежності $y = \ln R$ від $x = \frac{1}{T}$. Проводять пряму лінію, намагаючись, щоб експериментальні точки розташувалися приблизно симетрично по обидва боки від прямої (рис.2)

6. За двома довільними точками 1 і 2, максимально віддаленими на графіку, визначають коефіцієнт температурної чутливості B за формулою:

$$B = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}.$$

7. Визначають ширину забороненої зони ΔE за формулою (8), виражаючи її в електрон-вольтах:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}, \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

8. Визначають температурний коефіцієнт опору при кімнатній температурі:

$$\alpha = -\frac{B}{T_{\text{кімн}}^2}.$$

9. Визначають сталу часу τ . Для цього попередньо при знятті температурної характеристики вимірюють опір термістора при температурі $t_n = t_g - 0,63 \cdot (t_g - t_{\text{кімн}})$, де t_g – максимальна температура, до якої мають намір нагрівати термістор. Потім доводять температуру в термостаті до значення t_g і знову вимірюють опір. Після цього термістор швидко виймають із термостата, вмикають секундомір і вимірюють час τ , за який опір термістора зростає до значення, що відповідає температурі t_n .

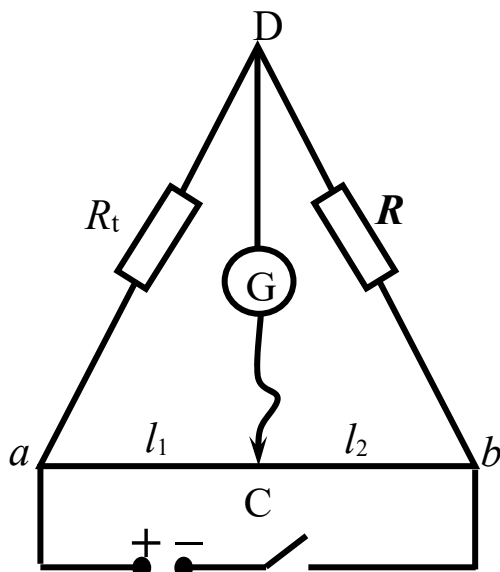


Рис. 1

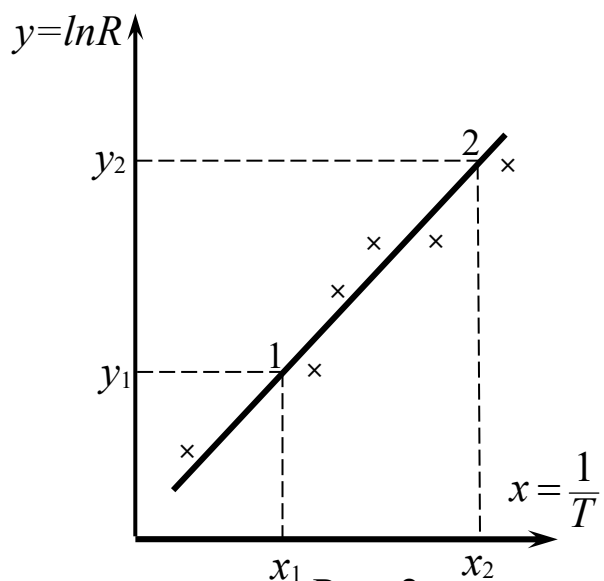


Рис. 2

Таблиця

№ п/п	Результати прямих вимірювань.		Результати непрямих вимірювань.						
	$t, ^\circ\text{C}$	$R,$ Ом	$T,$ К	$1/T,$ K^{-1}	$\ln R$	B, K	$\Delta E,$ еВ	$\alpha,$ K^{-1}	τ, c

Доповнення. Місток Уїтстона

На рис.1 зображена електрична схема містка Уїтстона. R – опір, який набирається на магазині опорів; R_t – опір напівпровідника; ab – реохорд.

Порядок вимірювання

1. Виставляють повзунок реохорда так, щоб $l_1 = l_2$.
2. Змінюючи опір магазину R , досягають того, щоб струм через гальванометр був відсутній, тобто $I = 0$. У цьому випадку

$$R_t = R \frac{l_1}{l_2}$$

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть якісно механізм утворення енергетичних зон у твердому тілі.
2. Як відрізняються між собою зонна структура ізолятора, провідника, напівпровідника?
3. Що таке “дірка” з точки зору зонної теорії?
4. Поясніть механізм власної і домішкової провідності напівпровідника.
5. Чим пояснюється різний хід температурної залежності електропровідності (опору) металів і напівпровідників?
6. Поясніть фізичний зміст енергії ΔE і параметрів термістора B , α , τ . Як вони знаходяться експериментально?
7. Назвіть основні області застосування термісторів.

РОБОТА 6 – 2

ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА РУХЛИВОСТІ НОСІЇВ СТРУМУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ (ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТУ ХОЛЛА)

Мета роботи: вивчити ефект Холла, визначити основні параметри електропровідності напівпровідників (концентрацію електронів та їх рухливість у германії) за допомогою ефекту Холла.

Прилади та обладнання: зразок германієвого напівпровідника з відомими розмірами, постійний магніт з відомим значенням магнітної індукції B у міжполюсному просторі, цифровий вольтметр, міліамперметр.

У роботі вивчається ефект Холла – одне з найцікавіших фізичних явищ, що спостерігається в твердих тілах. Його експериментальне дослідження дає можливість визначити найважливіші характеристики електропровідності напівпровідників: 1) концентрацію; 2) рухливість носіїв струму; 3) тип провідності.

Суть ефекту Холла: якщо провідну пластину, по якій тече постійний електричний струм, помістити в перпендикулярне їй магнітне поле, то між гранями пластини, паралельними струму \vec{j} і полю \vec{B} , виникає різниця потенціалів $U_H = \varphi_1 - \varphi_2$ (рис.1).

Ефект Холла пояснюється за допомогою електронної теорії. Спочатку розглянемо випадок, коли електричний струм у пластині створений носіями одного знаку, наприклад, електронами. За відсутності магнітного поля струм у пластині обумовлений електричним полем \vec{E}_0 , створеним джерелом струму, направленим вздовж осі X . Еквіпотенціальні поверхні цього поля утворюють систему перпендикулярних вектору \vec{E}_0 площин (див. рис. 2, суцільні вертикальні лінії). Різниця потенціалів між точками 1 і 2, які належать одній і тій же еквіпотенціальній поверхні, дорівнює нулю. Під дією поля \vec{E}_0 електрони рухаються вздовж пластини з середньою швидкістю упорядкованого руху \vec{v} (швидкість дрейфу).

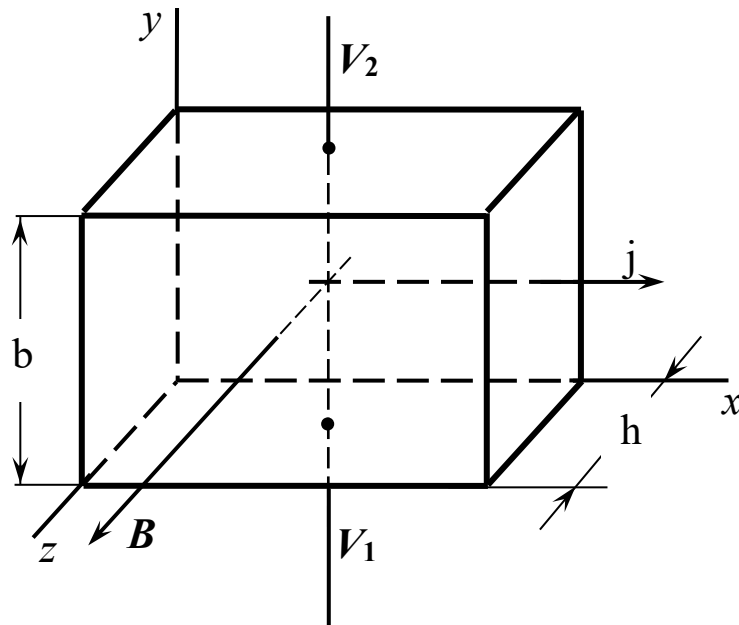


Рис. 1

При вмиканні магнітного поля з індукцією \vec{B} , направленою вздовж осі Z , на кожний електрон діє сила Лоренца

$$\vec{F}_l = -e[\vec{v}\vec{B}].$$

Вона є перпендикулярною векторам швидкості \vec{v} та індукції \vec{B} і відхиляє електрони донизу. Внаслідок цього нижня грань пластини заряджається від'ємно, а верхня – додатньо. Електричне поле, що виникає у вертикальному напрямку з напруженістю \vec{E}_y , перешкоджає відхиленню електронів, викликаному магнітним полем.

Процес накопичення електронів на гранях пластини припиняється, коли електрична сила $F_e = eE_y$ буде зрівноважувати силу Лоренца $F_l = evB$, тобто при $eE_y = evB$, звідси знаходимо:

$$E_y = vB \tag{1}$$

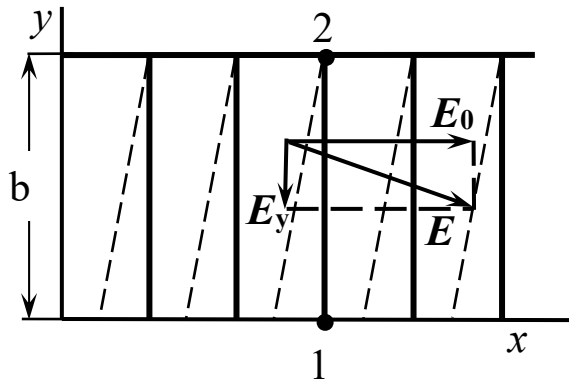


Рис.2

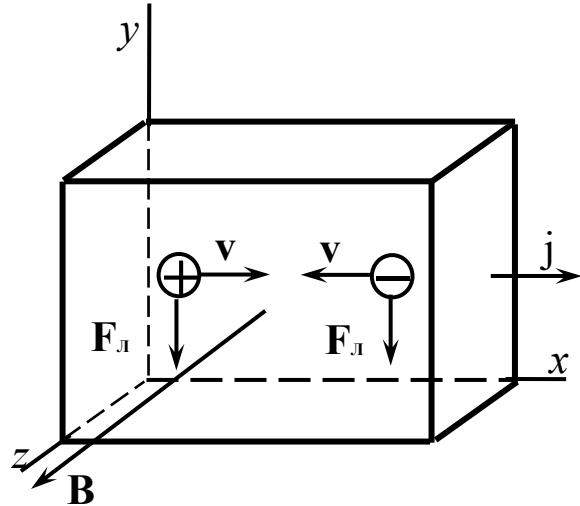


Рис.3

Поле \vec{E}_y , що виникає у вертикальному напрямку (рис.2), складається з полем \vec{E}_x у результуюче поле з напруженістю

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y .$$

Еквіпотенціальні поверхні результуючого поля \vec{E} (вони перпендикулярні вектору \vec{E} в будь-якій точці поля) зображені на рис.2 пунктиром. Як бачимо, точки 1 і 2 розташовані за відсутності магнітного поля ($B=0$) на одній і тій же еквіпотенціальній поверхні, а при $B \neq 0$ ці точки належать різним еквіпотенціальним поверхням і тому мають різні потенціали φ_1 і φ_2 . Так виникає ефект Холла.

Розрахуємо величину поперечної різниці потенціалів $U_H = \varphi_1 - \varphi_2$, яка виникає в провідній пластині зі струмом при включенні магнітного поля. Густина струму j у пластині може бути виражена через концентрацію n електронів і середню швидкість їх руху v (швидкість дрейфу):

$$j = env . \tag{2}$$

З урахуванням (2) співвідношення (1) набуває вигляду:

$$E_y = \frac{1}{ne} \cdot jB = R_H jB . \tag{3}$$

Отже, напруженість поперечного (холлівського) поля E_y пропорційна густині струму j і магнітній індукції B . Зазначимо, що це твердження має загальний характер і справедливе для випадку декількох сортів носіїв струму.

Введений у співвідношення (3) коефіцієнт пропорційності R_H між напруженістю холлівського поля E_y і добутком $j \cdot B$ залежить від природи матеріалу; він називається сталою Холла і для випадку носіїв одного сорту має вираз:

$$R_H = \frac{1}{ne}. \quad (4)$$

Якщо ширину пластини позначити через d , її товщину – h , то холлівська різниця потенціалів матиме вигляд:

$$U_H = E_y d = R_H j B d = R_H \frac{j d h}{h} B = R_H \frac{I B}{h}, \quad (5)$$

де $I = j \cdot S$ – сила струму; $S = d \cdot h$ – площа поперечного перерізу пластини. З останнього рівняння знаходимо

$$\boxed{R_H = \frac{U_H h}{I B}}. \quad (6)$$

Холлівська різниця потенціалів може бути безпосередньо виміряна на досліді. Отже, вимірюючи U_H , h , I і B , можна за формулою (6) визначити значення сталої Холла R_H , а отже, концентрацію носіїв струму:

$$\boxed{n = \frac{1}{R_H e}} \quad (4a)$$

Якщо нарівні зі сталою Холла визначити питому електропровідність σ матеріалу пластини, то, використавши співвідношення

$$\sigma = enb^- = \frac{1}{R_H} \cdot b^-,$$

можна визначити рухливість електронів

$$b^- = R_H \sigma. \quad (7)$$

Зауважимо, що у випадку носіїв струму одного сорту знак холлівської різниці потенціалів $U_H = \varphi_1 - \varphi_2$ визначається знаком носіїв струму. Так, у розглянутому нами випадку, коли носіями є електрони,

U_H від'ємна ($\varphi_1 < \varphi_2$) (див.рис.2,3). Якщо ж носіями струму є дірки, то U_H буде позитивною ($\varphi_1 > \varphi_2$) (див.рис.3). Стала Холла при цьому зв'язана з концентрацією дірок p співвідношенням:

$$R_H = \frac{1}{pe} \quad (8)$$

Отже, визначивши знак холлівської різниці потенціалів при вибраних напрямках струму і магнітного поля, можна визначити тип носіїв струму в зразку, тобто встановити, є досліджуваний напівпровідник електронним чи дірковим.

Зазначимо також, що вирази (4) і (8) справедливі лише тоді, коли у створенні електричного струму приймають участь тільки носії одного знаку. У цьому випадку стала Холла, а отже і холлівська різниця потенціалів, обернено пропорційні концентрації носіїв струму. А тому при інших рівних умовах ефект Холла в напівпровідниках (де концентрація носіїв мала) проявляється набагато сильніше, ніж у металів (де концентрація носіїв велика).

Якщо ж у струмі приймають участь носії обох знаків (як це, наприклад, має місце у власних напівпровідниках), то співвідношення (4) і (8) не мають місця.

Дійсно (див.рис.3), у цьому випадку і електрони, і дірки під дією магнітного поля рухаються в одному і тому ж напрямку – до нижньої грані пластини. При цьому надлишкові позитивні і від'ємні заряди, які утворюються на нижній грані пластини, частково компенсують одне одного.

Стала Холла в цьому випадку, як показує розрахунок, визначається виразом:

$$R_H = \frac{n(b^+)^2 - p(b^-)^2}{e(nb^+ + pb^-)^2} \quad (9)$$

У власних напівпровідниках концентрація електронів і дірок однакова і вираз (9) приймає вигляд:

$$R_H = \frac{1}{ne} \cdot \frac{b^- - b^+}{b^- + b^+} \quad (9a)$$

Таким чином, у власному напівпровіднику знак холлівської різниці потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ визначається знаком носіїв заряду, які мають більшу рухливість.

При рівності рухливостей електронів і дірок ($b^- = b^+$) стала Холла у власному напівпровіднику дорівнює нулю, тобто ефект Холла не спостерігається.

У даній роботі для вимірювання холлівської різниці потенціалів і напруги на напівпровідниковому зразку використовується цифровий вольтметр.

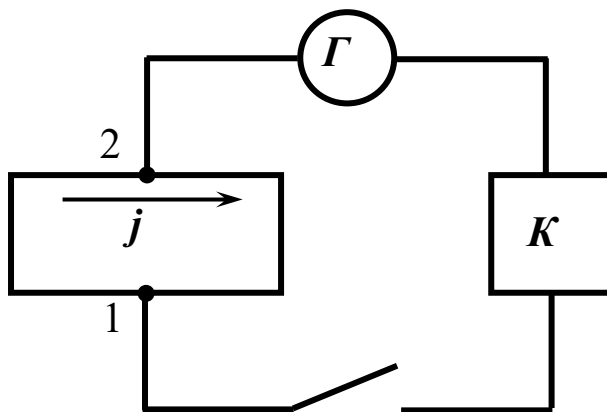


Рис. 4

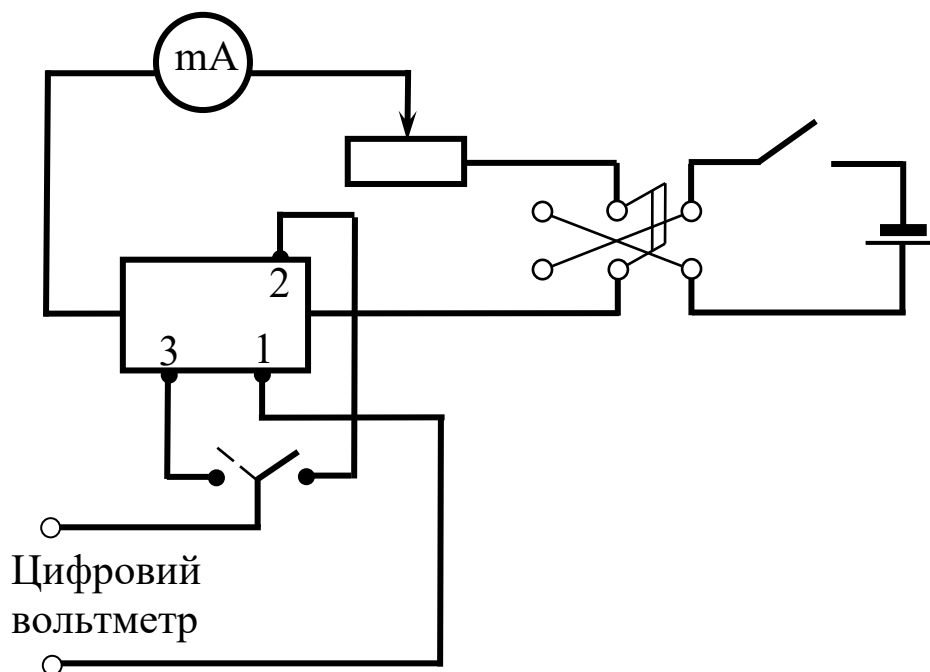


Рис. 5

Порядок виконання роботи

1. Складають робочу схему, зображену на рис.4. Розташовують напівпровідниковий зразок між полюсами магніту.
2. Перемикач Π_1 переводять у положення U_H . Встановивши за допомогою реостата R певне значення сили струму I через зразок,

вимірюють вольтметром значення різниці потенціалів між зондами 1 і 2, U_1 . Потім перемикачем Π_2 змінюють напрямок струму в зразку і знову при тій самій силі струму вимірюють значення різниці потенціалів між зондами 1 і 2, U_2 . Виміри при різних напрямках струму проводять для усунення впливу несиметричного розташування контактів 1 і 2. За даними U_1 і U_2 визначають значення холлівської різниці потенціалів

$$U_n = \frac{U_1 + U_2}{2}.$$

Виміри повторюють 3-5 рази при різних значеннях сили струму I . Дані заносять у робочу таблицю.

3. Обчислюють сталу Холла R_n за формулою (6). Визначають середнє значення $\langle R_n \rangle$.

4. Використовуючи отримане значення $\langle R_n \rangle$ і формулу (4), визначають концентрацію n електронів провідності.

5. Перемикач Π_1 переводять у положення U . Вимірюють різницю потенціалів вздовж осі X між зондами 1 і 3 для декількох різних значень сили струму в зразку. Дані заносять у робочу таблицю.

6. Розраховують питому електропровідність за формулою

$$\sigma = \frac{Il}{Udh},$$

де l – довжина зразка. Визначають середнє значення $\langle \sigma \rangle$.

7. Використовуючи результати п.4 та п.6 за формулою (7) розраховують рухливість електронів b .

Таблиця

№ п/п	Задані та табличні величини	Результати прямих вимірювань	Результати непрямих вимірювань
	$h, d, l, B, e,$ м м м Тл Кл	I, U_1, U_2 А, В, В,	$U, R, n, \sigma, b,$ В $\frac{м^3}{Кл}$ $м^{-3}$ $Ом^{-1}м^{-1}$ $\frac{м^2}{сВ}$

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення магнітної індукції та одиниці її вимірювання в СІ.
2. Поясніть, у чому полягає ефект Холла і чим він обумовлений?
3. Дайте визначення рухливості носіїв заряду.
4. Виведіть робочу формулу (6).
5. Поясніть, від чого залежить величина і знак холлівської різниці потенціалів.
6. Чи буде змінюватися постійна Холла домішкового напівпровідника при його нагріванні? Якщо буде, то як і чому?

РОБОТА 7 - 1 ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОНУКЛІДА

Мета роботи: визначити активність радіо-226 радіометром СРП-68.

Принцип дії радіометра СРП-68

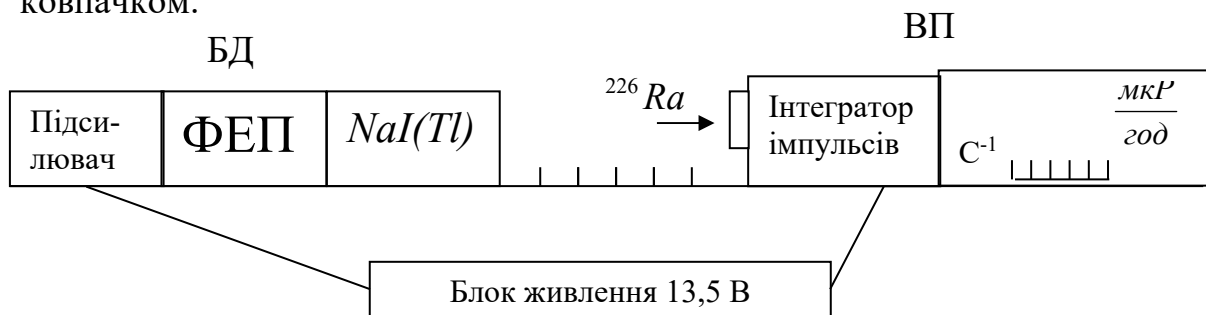
Радіометр СРП-68 (сцинтиляційний геологорозвідувальний прилад) призначений для пошуку радіоактивних руд за їх γ -випромінюванням.

Радіометр вимірює потужність експозиційної дози D (шкала в мкР/год) і потік γ -випромінювання радіоактивних речовин n (шкала в с^{-1}).

Радіометр складається з двох основних блоків:

- 1) вимірювального пульта ВП,
- 2) блока детектування БД, з'єднаних кабелем (рис.2).

Радіонуклід знаходиться в передній частині ВП під закрученим ковпачком.



У блоці детектування (рис. 2) знаходяться кристал-сцинтилятор NaI , активований талієм (Tl) і фотодіодний помножувач (ФЕП) з підсилювачем, які розміщені всередині циліндричного кожуха. Світлові сигнали, що виникають у сцинтиляторі під дією радіоактивного випромінювання, перетворюються ФЕП в електричні і через підсилювач по кабелю йдуть на вхід інтегратора імпульсів ВП.

У ВП імпульси, що надходять, сумуються в неперервний струм, пропорційний швидкості лічення імпульсів, який реєструється мікроамперметром.

Шкала приладу проградуєвана в одиницях потоку γ - випромінювання від 0 до 10000 с^{-1} і потужності експозиційної дози від 0 до 3000 мкР/год.

Експериментально встановлено, що γ -випромінювання не є самостійним видом радіоактивності. Воно супроводжує процеси α і β - розпадів і не викликає зміни заряду і масового числа ядер.

γ -випромінювання випускається дочірніми ядрами, які в момент свого утворення виявляються збудженими. Надлишок енергії збуджених ядер звільняється у вигляді γ -випромінювання, яке являє собою короткохвильове електромагнітне випромінювання з гранично малою довжиною хвилі $\lambda \leq 0,01 \text{ нм}$ і внаслідок цього – чітко вираженими корпускулярними властивостями, тобто є потоком частинок – γ -квантів (фотонів).

На практиці зручно визначати активність радіоактивного нукліда за потоком γ -випромінювання, враховуючи, що одному акту розпаду ядра відповідає виліт одного γ -кванта (фотона).

Для потужності експозиційної дози γ -випромінювання, як і для будь-якого електромагнітного випромінювання, має місце закон

$$D = K_{\gamma} \cdot \frac{a}{r^2}, \quad (1)$$

де a – активність радіонукліда; r – відстань від джерела випромінювання до детектора; K_{γ} – постійна, яка визначає тип радіонукліда, рівна потужності експозиційної дози γ - випромінювання від точкового джерела з одиничною активністю на одиничній відстані від нього. Для радію-226 $K_{\gamma} = 8,4 \cdot 10^6$ мкР·см²/год·мКи.

Порядок виконання роботи

1. Підключають радіометр до джерела живлення. Переводять нижній перемикач ВП у положення “БА”, потім через 1-3 хв у положення “2,5” (робочий режим радіометра).

2. Визначають радіометром природний радіаційний фон, обумовлений космічною та земною радіацією. Для цього

розташовують ВП на максимальну відстань від БД. Верхній перемикач діапазонів ВП переводять на мінімальну границю потужності експозиційної дози (шкала – мкР/год) і через кожні 5 с записують 3–5 показів мікроамперметра. Дані заносять у табл.1. Розраховують $\langle D_{\phi} \rangle$.

3. Зменшуючи через 2 см (починаючи з 10-15 см) відстань між радіонуклідом і детектором, вимірюють потужність експозиційної дози D' для кожного r . Як і в п.2 для кожного r (6–8 точок) записують 3–5 показів і розраховують $\langle D' \rangle$. Дані заносять у табл.1.

4. Віднімаючи “фон” від $\langle D' \rangle$, визначають потужність експозиційної дози випромінювання радіонукліда для кожного r :

$$D = \langle D' \rangle - \langle D_{\phi} \rangle.$$

Заносять дані до табл.2.

5. За експериментальними даними будують графік залежності D від r^{-2} , що характеризує закон (1). Слід використовувати осі: $y=D$, $x=r^{-2}$.

З цього графіка за двома довільними точками, максимально віддаленими одна від одної, розраховують кутовий коефіцієнт B :

$$B = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Середнє значення активності радіонукліда знаходимо за формулою:

$$\langle a \rangle = B/K_{\gamma}.$$

1. Робоча таблиця до лабораторної роботи 7 – 1

N п/п	Результати прямих вимірювань				
	$D_{\phi}, \frac{\text{мкР}}{\text{год}}$	$D', \frac{\text{мкР}}{\text{год}}$			
	$R=$	$r_1=$	$r_2=$...	$r_n=$
1					
2					
3					
$\langle x \rangle$					

2. Робоча таблиця до лабораторної роботи 7 – 1

N п/п	Табличні величини та результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань			
	$K_\gamma,$ $\frac{\text{мкР} \cdot \text{см}^2}{\text{год} \cdot \text{мКи}}$	$r, \text{см}$	$r^{-2}, \text{см}^{-2}$	$D, \frac{\text{мкР}}{\text{год}}$	$B, \frac{\text{мкР}}{\text{год} \cdot \text{см}^2}$	$a, \text{мКи}$
с	-		-	-	-	-
1						
2	-				-	-
3						
$\langle x \rangle$		-	-	-		
Δ, P						
ε						

6. Розраховують довірчі границі Δ_{D_ϕ} і $\Delta_{D'}$ за формулою:

$$\Delta = \frac{\gamma \cdot I_{\text{сп}}}{100},$$

де γ – клас точності приладу; $I_{\text{сп}}$ – граничне значення відповідної вибраної шкали мікроамперметра.

7. Розраховують довірчі границі та відносні похибки одного із результатів вимірів:

$$\begin{aligned} \Delta_D &= \Delta_{D_\phi} + \Delta_{D'}; & \varepsilon_D &= \frac{\Delta_D}{D}; \\ \varepsilon_a &= \varepsilon_{K_\gamma} + \varepsilon_D + 2\varepsilon_r; & \Delta_a &= \varepsilon_a \cdot \langle A \rangle \end{aligned}$$

Примітка. Щоб зменшити похибку вимірювань, треба підібрати оптимальний режим вимірювань так, щоб покази мікроамперметра були не менше 1/3 усієї шкали.

Після закінчення вимірювань нижній перемикач ВП переводять у положення “вимк.”, а верхній – у нейтральне положення. Відключають прилад СРП-68 від загального джерела живлення.

Запитання і вправи для самоконтролю

1. Опишіть будову атомного ядра. Що таке ізотопи, радіонукліди?
2. Що являє собою явище радіоактивності?
3. Назвіть і охарактеризуйте види радіоактивного випромінювання.
4. Сформулюйте і запишіть закон радіоактивного розпаду, дайте визначення сталої радіоактивного розпаду λ і періоду піврозпаду $T_{1/2}$.
5. Що таке активність радіонукліда? За яким законом змінюється з часом активність? Назвіть одиниці вимірювання активності.
6. Дайте визначення поглинутої і біологічної доз іонізуючого випромінювання. Визначіть їх одиниці вимірювання.
7. Що називається експозиційною дозою випромінювання, які її одиниці вимірювання? Дайте визначення рентгена.

РОБОТА 7 - 2.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ

γ -ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи: вивчити умови захисту від випромінювання, дослідити залежність потоку γ -випромінювання від товщини захисту, визначити коефіцієнт поглинання μ і півпоглинаючу товщину d_n речовини.

Зменшення дози опромінення від радіоактивних речовин може бути досягнуто: 1) зменшенням часу перебування в зоні дії випромінювання; 2) збільшенням відстані від джерела випромінювання; 3) застосуванням захисних екранів.

У даній роботі вивчаються умови захисту від γ -випромінювання. γ -випромінювання, будучи найбільш жорстким (короткохвильовим) електромагнітним випромінюванням, є одним з найбільш проникаючих випромінювань. γ -кванти, маючи нульову масу спокою, не можуть гальмуватися в середовищі. Тому при проходженні γ -випромінювання крізь речовину вони або поглинаються, або розсіюються нею. γ -кванти не несуть електричного заряду і тому не зазнають впливу кулонівських сил. Отже вони викликають в основному тільки іонізацію і збудження атомів речовини, а тому радіаційна дія на біологічні об'єкти γ -випромінювання набагато менша ніж корпускулярного (α -, β -випромінювання, потоків протонів, нейтронів).

Одним із ефективних засобів захисту від γ -випромінювання є захисні екрани із речовин з великим коефіцієнтом поглинання.

При проходженні пучка γ -квантів крізь речовину їх енергія не змінюється, але в результаті зіткнень (поглинання і розсіювання γ -квантів атомами речовини) послаблюється інтенсивність пучка. Зменшення інтенсивності γ -випромінювання в речовині описується експоненціальним законом:

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (1)$$

де I_0 і I – інтенсивність γ -випромінювання на вході і виході шару поглинаючої речовини товщиною d ; μ – коефіцієнт поглинання, який залежить від хімічної природи поглинаючої речовини та від енергії γ -квантів. При $d=1/\mu$ інтенсивність випромінювання I порівняно з I_0 зменшується в $e=2,7$ рази.

Логарифмуючи вираз (1), знаходять:

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I)}{d}. \quad (2)$$

Шар d_n речовини, котрий зменшує інтенсивність випромінювання в 2 рази, називається півпоглинаючою товщиною:

$$d_n = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}. \quad (3)$$

Оскільки швидкість підрахунку n імпульсів лічильником пропорційна інтенсивності I γ -випромінювання, на практиці знімають залежність числа імпульсів n , які реєструються лічильником за одиницю часу, від товщини поглинача d . Тоді коефіцієнт поглинання μ визначається виразом:

$$\mu = \frac{\ln(n_0/n)}{d}. \quad (4)$$

Теоретичне вивчення процесів поглинання γ -випромінювання речовиною показує, що μ залежить від енергії γ -квантів і пропорційний атомному номеру Z поглинача.

Тому при радіаційному захисті для захисних екранів використовують матеріали з достатньо великим коефіцієнтом поглинання μ (свинець, залізобетон).

У даній роботі визначають коефіцієнт поглинання для алюмінію і свинцю.

Порядок виконання роботи

1. Підключають радіометр СРП-68 до джерела живлення.

2. Мікроамперметр ВП переключають на вимірювання потоку γ - випромінювання (шкала C^{-1}).

3. Вимірюють природний радіаційний фон. Для цього встановлюють блоки БД і ВП на максимальну відстань, перемикач діапазонів ВП переводять на мінімальну границю потоку і через кожні 5 с записують 3–5 показів мікроамперметра. Дані заносять у табл.1. Розраховують середнє значення $\langle n_{\phi} \rangle$.

1. Робоча таблиця до лабораторної роботи 7 – 2

N п/п	Результати прямих вимірювань					
	n_{ϕ}, c^{-1}	n', c^{-1}				
		$d_0=$	$d_1=$	$d_2=$...	$d_n=$
1						
2						
3						
$\langle x \rangle$	$\langle n_{\phi} \rangle$	$\langle n'_o \rangle$				

2. Робоча таблиця до лабораторної роботи 7 – 2

N п/п	Прямі вимірювання	Результати непрямих вимірювань				
	d, мм	$\langle n \rangle, c^{-1}$	$\frac{\langle n_o \rangle}{\langle n \rangle}$	$\ln \frac{\langle n_o \rangle}{\langle n \rangle}$	$\mu, мм^{-1}$	d, мм
1	0					
2	2					
3	4				-	-
·	·					
·	·					
·	·					
$\langle x \rangle$	-	-	-			

4. Установлюють блоки БД і ВП на відстань, рівну товщині кювети з поглинаючими пластинами.

5. Вимірюють потік γ -випромінювання n'_0 без поглинач, записуючи 3–5 показів мікроамперметра через 5 с. Дані записують у табл.1 у колонку $d_0=0$. Розраховують $\langle n'_0 \rangle$.

6. Розташовують між БД і ВП кювету з поглинаючими пластинами і вимірюють потік γ - випромінювання n' , як і в п.5 для різних товщин d ($d_1=2\text{мм}$, $d_2=4\text{мм}$,...). Результати заносять у табл.1. Розраховують $\langle n' \rangle$.

7. Для різних товщин поглинач d визначають середнє значення потоку:

$$\langle n \rangle = \langle n' \rangle - n_\phi$$

8. Будують графік залежності $\ln\left(\frac{n_0}{n}\right) = f(d)$. За кутовим коефіцієнтом B , знайденим із графіка за 2-ма довільними точками, максимально віддаленим одна від одної, визначають середнє значення $\langle \mu \rangle$:

$$\mu = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

де $y = \ln\left(\frac{n_0}{n}\right)$, $x = d$.

9. Розраховують півпоглинаючу товщину d_n речовини за формулою (3) і вказують її на графіку.

Питання і вправи для самоконтролю

1. Які існують види радіоактивного випромінювання, яка їх природа?

2. Які причини великої проникаючої здатності γ -випромінювання?

3. Опишіть закон поглинання радіоактивного випромінювання, охарактеризуйте величини, що входять у закон.

4. Сформулюйте фізичний зміст коефіцієнта поглинання. Від чого залежить μ , в яких одиницях вимірюється коефіцієнт поглинання?

7. МАТЕМАТИЧНИЙ ДОДАТОК

7.1. Вектори. Дії з векторами

7.1.1. Проекція вектора

7.1.1.1. Проекції векторів \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} на вісь x – це довжини відрізків a_x , b_x , c_x відповідно, що визначаються так, як показано на рис. 7.1.1.

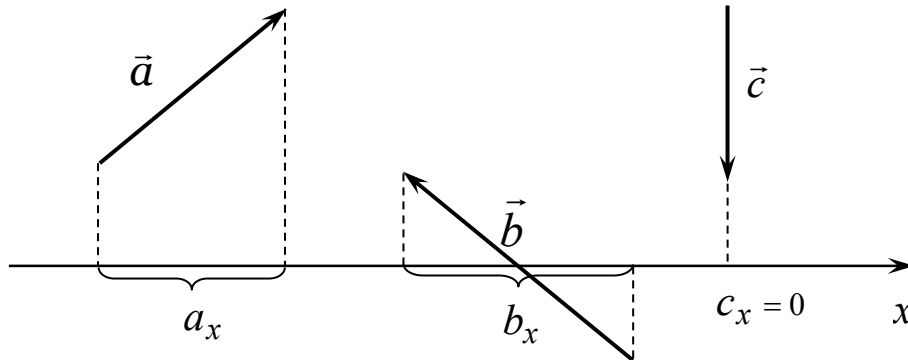


Рис. 4.1.1

7.1.1.2. Проекція вектора \vec{a} на осі x та y знаходять так, як це продемонстровано на рис. 7.1.2. Величини проєкцій на осі x та y дорівнюють відповідно:

$$a_x = a \cos \alpha \quad \text{та} \quad a_y = a \sin \alpha$$

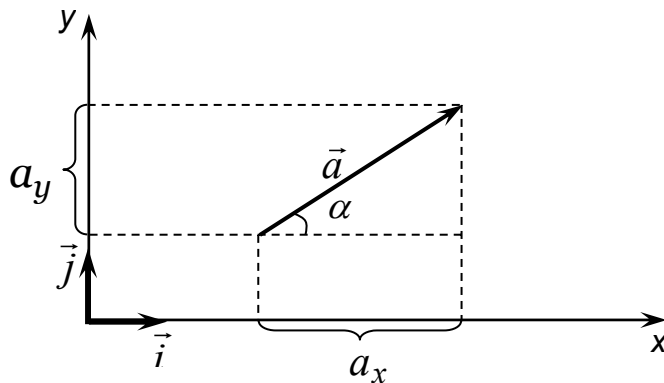


Рис. 4.1.2

Використовуючи одиничні вектори \vec{i} , \vec{j} (вектори одиничної довжини, що направлені вздовж осей x та y , так звані направляючі орти), у векторній формі можна записати:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j}.$$

Приклад. Використаємо значення проекцій сил, що діють на осі x та y при русі тіла по похилій площині вниз (рис. 4.1.3). У векторній формі другий закон Ньютона для тіла на похилій площині має вигляд:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{\text{тер}}.$$

У проекціях на осі:

на вісь x : $ma = mg \sin \alpha - F - F_{\text{тер}};$

на вісь y : $0 = -mg \cos \alpha + N$

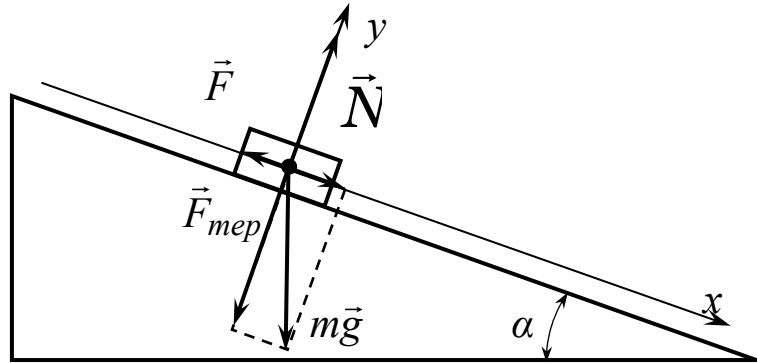


Рис. 4.1.3

7.1.1.3. У просторі довільний вектор \vec{a} можна виразити через його проекції на осі, використовуючи поняття про одиничні вектори

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ вздовж цих осей:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}.$$

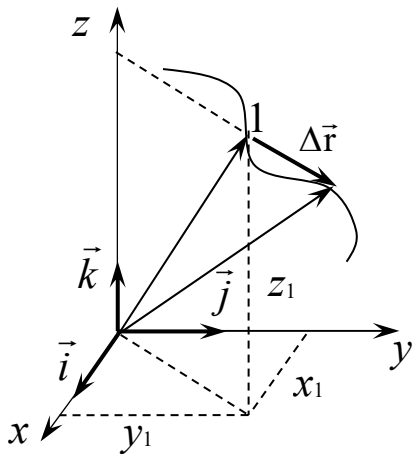


Рис. 4.1.4

Приклад. У механіці використовуються поняття радіус - вектор матеріальної точки. Радіус-вектор є вектором, що направлений з початку координат у точку, в якій знаходиться матеріальна точка в даний момент часу (рис. 7.1.4). Таким чином, радіус-вектор \vec{r} має початок у точці $(0,0,0)$; (x_1, y_1, z_1) - координати його кінця. З іншого боку x, y, z є проекціями вектора \vec{r} на осі x, y, z . Можна записати:

$$\vec{r} = x_1 \vec{i} + y_1 \vec{j} + z_1 \vec{k}.$$

Величина модуля вектора \vec{r} може бути виражена через величини проекцій радіус-вектора на осі x, y, z :

$$|\vec{r}| = r = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}.$$

7.1.2. Добуток вектора на скаляр

Добутком скалярної величини c на вектора \vec{a} є вектор $c \cdot \vec{a}$, що має напрямок вектора \vec{a} , а його величина (модуль) дорівнює добутку скаляра c на модуль вектора \vec{a} , тобто: $|c \cdot \vec{a}| = c|\vec{a}|$.

На рис. 4.1.5 показано, що залежно від величини c модуль вектора $c \cdot \vec{a}$ може приймати значення як менше, ніж модуль вектора \vec{a} ($c < 1$), так і більше, ніж модуль вектора \vec{a} ($c > 1$). Зрозуміло, що в випадку $c=1$ вектор $c \cdot \vec{a} = \vec{a}$.

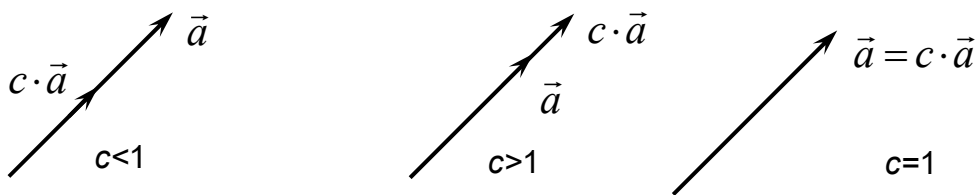


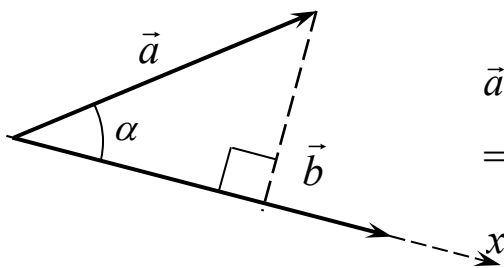
Рис. 4.1.5

7.1.3. Скалярний добуток двох векторів

Скалярним добутком двох векторів є скалярна величина, що чисельно дорівнює добутку абсолютних значень векторів \vec{a} та \vec{b} , помноженому на косинус кута між ними (рис. 4.1.6):

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \alpha.$$

Можна переписати визначення скалярного добутку в іншому вигляді:



$$\begin{aligned} \vec{a} \cdot \vec{b} &= |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \alpha = \\ &= a \cdot b \cdot \cos \alpha = a_x \cdot b. \end{aligned}$$

Рис. 4.1.6

Тут a_x – проекція вектора \vec{a} на вісь, що збігається з напрямком вектора \vec{b} .

У загальному випадку двох векторів у просторі їх скалярний добуток виражається через проекції цих векторів на всі три осі координат:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z.$$

Приклади. 1. Елементарна механічна робота є скалярним добутком вектора сили на вектор переміщення (рис. 4.1.7):

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F_r dr.$$

Тут $F_r = F \cos \alpha$ – проекція сили на напрямок переміщення.

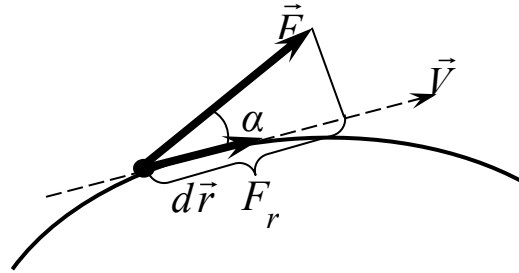


Рис. 4.1.7

2. Миттєва потужність – це відношення елементарної роботи до часу, за який ця робота виконана:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

З іншого боку, використовуючи визначення роботи, отримаємо вираз, що свідчить про те, що миттєва потужність є скалярним добутком векторів сили та миттєвої швидкості (див. рис. 4.1.7):

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V}.$$

7.1.4. Векторний добуток двох векторів

Векторним добутком двох векторів є вектор, який позначається $[\vec{a} \times \vec{b}] = \vec{c}$ або $\vec{a} \times \vec{b} = \vec{c}$ на відміну від позначення скалярного добутку $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \alpha$.

Векторним добутком двох векторів називається третій вектор, що знаходиться так:

а) величина вектора \vec{c} , тобто модуль векторного добутку (модуль вектора \vec{c}) дорівнює:

$$|\vec{c}| = \left| [\vec{a} \times \vec{b}] \right| = |\vec{a}| |\vec{b}| \cdot \sin \alpha;$$

б) за напрямком вектор \vec{c} направлений перпендикулярно до площини, в якій лежать вектори \vec{a} та \vec{b} . Напрямок вектора \vec{c} визначається за правилом правого гвинта (рис. 4.1.8).

Таким чином важливо, який вектор в добутку стоїть першим, тобто:

$$[\vec{a} \times \vec{b}] = \vec{c}, \quad [\vec{b} \times \vec{a}] = -\vec{c}.$$

На відміну від скалярного добутку, для якого виконується умова:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a},$$

векторний добуток характеризується властивістю:

$$[\vec{a} \times \vec{b}] = -[\vec{b} \times \vec{a}],$$

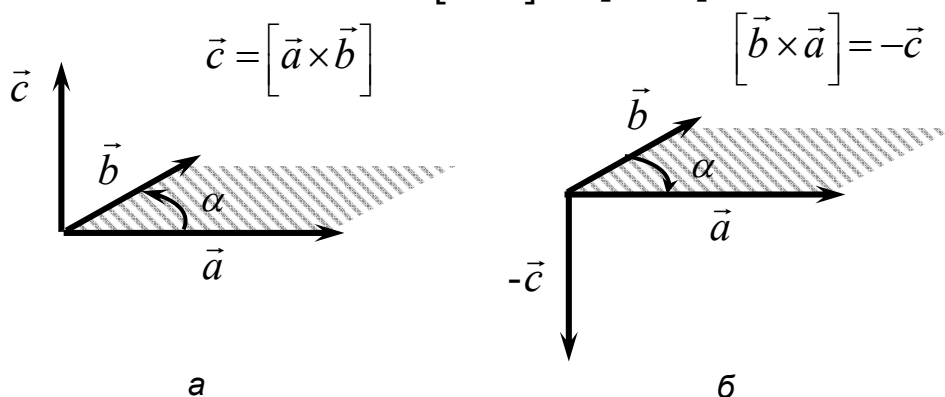


Рис. 4.1.8

тобто переставлення місцями векторів у векторному добутку змінює напрям вектора векторного добутку на протилежний.

Приклади: 1. Лінійна швидкість зв'язана з кутовою швидкістю співвідношенням, яке в векторній формі є векторним добутком кутової швидкості на радіус – вектор:

$$\vec{V} = [\vec{\omega} \times \vec{r}].$$

На рис. 1.1.6 розд.1 показано, яким чином знаходять напрям вектора лінійної швидкості, що є векторним добутком двох інших векторів – кутової швидкості та радіус-вектора.

7.1.5. Сума та різниця векторів

Сума двох векторів – це третій вектор, що знаходиться за „правилом паралелограма” (рис. 4.1.10, а).

Таким чином, сумою двох векторів є третій вектор, що побудований, як діагональ паралелограма, сторонами якого є ці два вектори. У випадку, коли є більш, ніж два вектори, можна користуватись ще й таким правилом: у кінець першого вектора переміщують (паралель-

ним перенесенням) початок другого, в кінець другого, аналогічно, поміщають початок третього і т.д. Сумою векторів буде вектор, що з'єднає початок першого з кінцем останнього вектора. На рис. 4.1.10, б продемонстрована процедура знаходження суми трьох векторів \vec{a} , \vec{b} та \vec{c} .

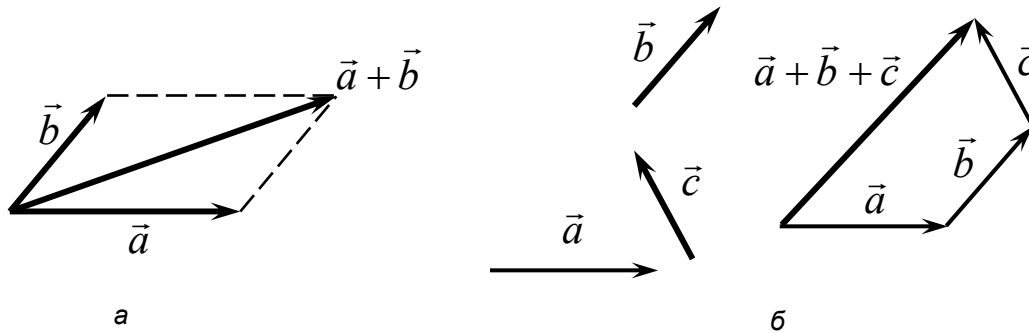


Рис. 4.1.10

Різниця векторів – це третій вектор, що з'єднує кінці двох векторів, які виходять з однієї точки. Напрямок вектора різниці двох векторів вибирають у бік того вектора, від якого віднімають. Це видно з рис. 4.1.11, а та б. Різниця двох векторів за величиною (модулем) може бути більшою, ніж кожен з векторів, різницю яких знаходять. У багатьох фізичних задачах йдеться про зміну векторної фізичної величини за якийсь відрізок часу, яка є різницею кінцевого та початкового значення даної фізичної векторної величини.



Рис. 4.1.11

Приклади. 1. У процесі руху положення матеріальної точки характеризується радіус-вектором. При переході від одного значення радіус-вектора \vec{r}_1 у момент часу t_1 до \vec{r}_2 у наступний момент часу t_2 вектор \vec{r} змінився на

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

Вектор, що з'єднує початкове та кінцеве положення радіус-вектора називається вектором **переміщення** (див. рис. 4.1.4). Вектор переміщення, таким чином, є зміною радіус-вектора чи **приростом радіус-вектора**.

2. При абсолютно пружному ударі (а. п. у.) кулька масою m відбивається від перешкоди зі швидкістю, що за величиною дорівнює швидкості падіння на перешкоду. При падінні перпендикулярно поверхні вектор швидкості змінюється на вектор, рівний за величиною та протилежний за напрямком (рис. 4.1.12, а).

$$|\Delta(m\vec{V})| = 2mV.$$

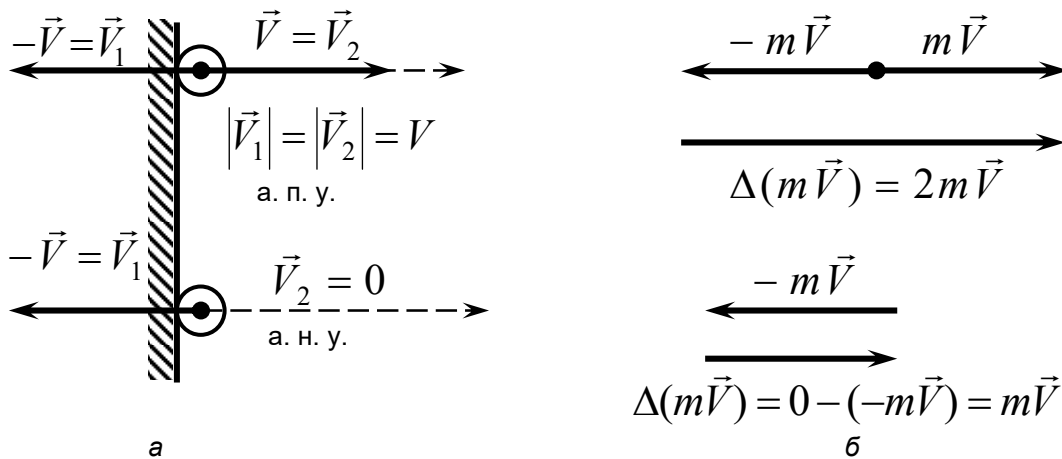


Рис. 4.1.12

Зміна імпульсу матеріальної точки $\Delta(m\vec{V})$ дорівнює різниці векторів імпульсу після удару та до удару (рис. 4.1.12, б). Модуль цієї різниці (зміна імпульсу) буде вдвічі більшим, ніж величина імпульсу mV , тобто:

$$|\Delta(m\vec{V})| = 2mV.$$

При абсолютно непружному ударі (а. н. у.) кулька зупиняється (як пластилінова кулька, що прилипла до стінки при ударі), а її швидкість стає рівною нулю (рис. 4.1.12 а та б). В цьому випадку величина зміни імпульсу буде вдвічі менша, ніж при абсолютно пружному ударі: $\Delta(m\vec{V}) = 0 - (-m\vec{V}) = m\vec{V}$, тобто $|\Delta(m\vec{V})| = mV$.

Висновки цієї простої механічної задачі на визначення зміни імпульсу, що базуються на знаходженні різниці двох векторів, неодноразово використовуються в різних розділах фізики, наприклад при пі-

драхунку тиску ідеального газу; тиску, що створює світло на поверхні з різними відбивальними властивостями тощо.

7.2. Похідна функції

Нехай y є функцією аргументу x . Цю функціональну залежність запишемо в вигляді $y(x)$. При зміні аргументу на величину Δx значення функції зміниться на величину Δy . **Похідною** називається границя, до якої наближається відношення приросту функції до приросту аргументу, при якому пройшов цей приріст (при наближенні Δx до нуля)

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}.$$

Похідна характеризує швидкість зміни функції y при зміні аргументу x .

Найпростіші похідні, якими користувалися у навчальному посібнику:

$y = c$, постійна величина, що не залежить від x	$y' = 0$
$y = cx$, лінійна залежність	$y' = c$
$y = cx^2$ квадратична залежність	$y' = 2cx$
$y = cx^n$ показникова функція (загальний випадок)	$y' = ncx^{n-1}$
$y = \frac{c}{x}$ (тобто $n=-1$ у попередній формулі)	$y' = -\frac{c}{x^2}$
$y = e^x$	$y' = e^x$
$y = \sin x$	$y' = \cos x$
$y = \cos x$	$y' = -\sin x$.

Приклади. 1. Миттєва швидкість – це похідна радіус-вектора за часом, тобто границя, до якої наближається відношення приросту радіус-вектора до часу Δt , за який цей приріст відбувся, при $\Delta t \rightarrow 0$.

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}, \quad \text{при } \Delta t \rightarrow 0 \quad \text{або} \quad \vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}'.$$

Значення проекції швидкості на одну з осей, наприклад на вісь x :

$$V_x = \frac{dx}{dt}.$$

Зазначимо, що тут функцією є радіус-вектор \vec{r} , координатами – x, y, z , а аргументом – час t . Тому похідну беремо за часом t .

2. У загальному випадку довільного криволінійного руху вводиться поняття вектора миттєвого прискорення в довільній точці тра-

екторії. Миттєве **прискорення** – це похідна вектора швидкості за часом:

$$\vec{a} = \lim \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} \quad \text{при} \quad \Delta t \rightarrow 0 \quad \text{або} \quad \vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}.$$

Значення проекції прискорення на одну з осей, наприклад на вісь x :

$$a_x = \frac{dV_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Таким чином, прискорення \vec{a} є похідною \vec{V} за часом та другою похідною \vec{r} за часом.

3. Миттєва потужність є похідною роботи за часом, характеризує швидкість виконання роботи:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

4. Напруженість електричного поля зв'язана з потенціалом цього поля співвідношенням, що характеризує швидкість зміни потенціалу, тобто є похідною потенціалу вздовж якоїсь осі:

$$E = -\frac{d\varphi}{dx}.$$

7.3. Невизначений та визначений інтеграл

Інтегрування – операція, зворотна до диференціювання. Інтегрування полягає в знаходженні суми нескінченно малих величин, внаслідок чого отримують скінчену величину. Так, довжина дуги довільної кривої дорівнює сумі нескінченно малих відрізків $\Delta l \rightarrow 0$, які називають диференціалами та позначають dl . Довжина дуги кривої може бути виражена сумою не-

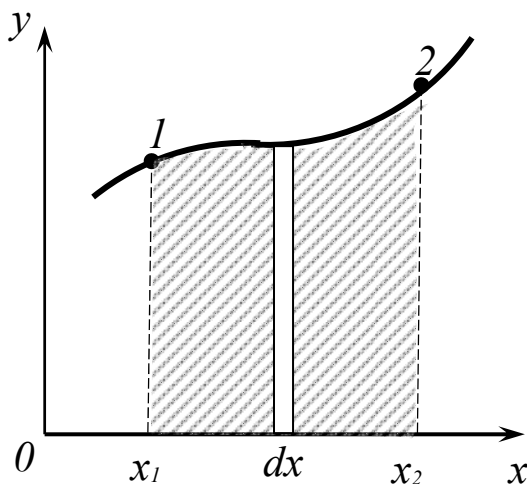


Рис. 4.1.13

скінченно великої кількості відрізків: $L = \sum_{i=1}^n \Delta l_i$, або через позначення інтеграла $L = \int_0^L dl$.

Визначений інтеграл від неперервної функції $y(x)$ – це площа під кривою, що заштрихована на рис. 4.1.13. Значення аргументу x_1 та x_2 називають нижньою та верхньою межею інтегрування. Очевидно, що ця площа складається з площ нескінченно вузьких прямокутників $y(x)dx$.

Визначений інтеграл, що чисельно рівний площі під кривою $y(x)$, записують у вигляді:

$$\int_{x_1}^{x_2} y(x) dx.$$

Для визначеного інтеграла можна записати:

$$\int_{x_1}^{x_2} y(x) dx = F(x) \Big|_{x_1}^{x_2} = F(x_2) - F(x_1),$$

де знаходження значення функції $F(x)$ і є суттю інтегрування.

Оскільки інтегрування є дією зворотною до знаходження похідної та диференціала, то невизначений інтеграл (без меж інтегрування) буде рівний функції $F(x)$ з точністю до довільної константи, тобто:

$$\int y(x) dx = F(x) + \text{const.}$$

У курсі фізики найчастіше використовують інтеграли від показникової функції x^n . Такий інтеграл дорівнює:

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + \text{const}; \quad n \neq -1.$$

У випадку $n=-1$ отримують функцію, що називається натуральним логарифмом (логарифм з основою $e \approx 2,7$):

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + \text{const}.$$

8. ДОДАТКИ

8.1. Фізичні величини та одиниці їх вимірювання

Фізичні закони встановлюють найсуттєвіші взаємозв'язки між фізичними поняттями, що описують важливі явища в фізиці. Ці взаємозв'язки подаються у вигляді математичних співвідношень між фізичними величинами, що вводяться для характеристики даного фізичного явища чи групи таких явищ.

Фізичні величини – це міри властивостей, що характеризують фізичні явища. Так, властивість всіх матеріальних тіл зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, що має назву „інерція” має міру, фізичну величину „маса”. Тому можна сказати, що **маса є мірою інертності матеріальних тіл**. Аналогічно, тепловий рух молекул характеризується фізичною величиною „**температурою по термодинамічній шкалі температур (або абсолютною температурою)**”, тобто **температура є мірою кінетичної енергії теплового руху молекул**. Однорідними фізичними величинами є такі, що характеризують ту ж саму властивість. Наприклад, маса Землі, комбайна чи автомобіля – однорідні, а швидкість автомобіля та його маса – неоднорідні величини.

Значення фізичної величини є кількісна характеристика даної фізичної величини. Число, яким виражається значення фізичної величини, отримується в результаті вимірювання. Фізичну величину вимірюють, тобто порівнюють (зіставляють) зі значенням однорідної їй фізичної величини, що прийнята за одиницю. Таке порівняння (вимірювання) проводиться з використанням технічних засобів (засобів вимірювання)

Наприклад, число, яке виражає значення довжини предмета, отримується порівнянням його довжини зі значенням довжини еталона метра. Ця ж довжина може бути подана іншим числом, отриманим порівнянням її з еталоном дюйма, ярда. Тому для однозначності подання значення фізичної величини число дають з обов'язковим позначенням відповідної одиниці. Для того, щоб можна було виконувати дії над значеннями фізичних величин, вони повинні бути виражені через одиниці, які пов'язані між собою за певними правилами, тобто утворюють **систему одиниць вимірювання фізичних величин**. У більшості країн світу нині обов'язковою для використання є система одиниць СІ (Система Інтернаціональна), одиниці якої мають назву - **одиниці СІ**.

Система одиниць будується так, що для кількох різнорідних фізичних величин обумовлюються матеріальні об'єкти або явища, які можуть бути відтворені з достатньою точністю. Ці об'єкти або явища

використовуються для зберігання та відтворення певних значень фізичних величин, тобто вони є **еталонами** одиниць. Одиниці величин, для яких обумовлено відтворення за допомогою еталонів, називаються **основними**.

Кожна фізична величина характеризується розмірністю, яка виражає зв'язок даної фізичної величини з величинами, які є основними у певній системі одиниць. Запис розмірності величини прийнято виконувати за правилами запису алгебраїчних виразів, позначаючи основні величини великими літерами: довжину, шлях, відстань – L , масу – M , час – T , силу електричного струму – I , термодинамічну температуру – θ , кількість речовини – N , силу світла – J . Наприклад, розмірність сили $[F] = LMT^{-2}$. На практиці частіше використовують позначення основних величин системи СІ і записують розмірність, наприклад сили в вигляді $[F] = \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$.

Над розмірностями фізичних величин можна виконувати деякі алгебраїчні дії. Правила роботи з розмірностями такі: 1) ліва частина алгебраїчного рівняння повинна мати таку ж розмірність, як і права; 2) при додаванні (відніманні) значень величин вони можуть бути тільки однорідними, тобто мати однакові розмірності (при запису вказується спільна розмірність); 3) множення, ділення, піднесення до степеня виконується як із звичайними змінними; 4) відношення однорідних величин є безрозмірним, тобто не має розмірності. Це значить, що до алгебраїчного виразу розмірності в цьому випадку основні величини входять у нульовому ступені.

Використання методу розмірностей дозволяє досить просто знайти грубі помилки у математичних описах фізичних моделей. Якщо при запису розмірностей величин, які входять до рівняння порушуються правила 2) або 3); то при опису модуля явища допущено помилку. За правилом 4) тригонометричні функції безрозмірні. Значення безрозмірної величини не залежить від вибору системи одиниць.

При розв'язуванні задач дії над розмірностями можна замінити діями над одиницями, записуючи похідні одиниці через основні одиниці системи. Позначення одиниць слід застосовувати після числових значень величин і поміщати їх в одному рядку (без перенесення всього або частини позначення в наступний рядок). Між останньою цифрою числа і позначенням одиниці слід залишати пропуск.

Якщо числове значення величини є десятковим дробом, то позначення одиниці слід записувати після усіх цифр. Стандартом не допускається поміщати позначення одиниць в один рядок з

формулою, що виражає залежність між величинами. При необхідності пояснень величин розмірностей у формулі запис їх виконується окремо.

Літерні позначення одиниць, які входять у добуток, слід відокремлювати крапками на середній лінії (як знаками множення). У літерних позначеннях відношень одиниць як знак ділення має застосовуватися лише одна похила або горизонтальна риска. Допускається використовувати позначення одиниць у вигляді добутку позначень одиниць, піднесених до степеня (додатних і від'ємних).

При використанні похилої риски позначення одиниць у чисельнику та знаменнику слід поміщати в рядок, добуток позначень одиниць у знаменнику необхідно брати в дужки.

При використанні похідної одиниці, що складається з двох і більше одиниць, не допускається комбінувати літерні позначення та найменування одиниць, тобто для одних одиниць наводити позначення, а для інших – найменування.

8.2. Визначення основних одиниць системи СІ

У системі СІ прийнято **сім основних** та **дві додаткових** одиниці. Всі інші одиниці є похідними від них, тобто виражаються через них.

Основні:

1 метр (1 м) – **одиниця довжини** – дорівнює відстані, яку проходить у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за $1/299\,792\,458$ частку секунди (або дорівнює $1650763,73$ довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптому – 86).

1 кілограм (1 кг) – **одиниця маси** – дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма.

1 секунда (1 с) – **одиниця часу** – дорівнює $9\,192\,631\,770$ періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію – 133.

1 Кельвін (1 К) – **одиниця термодинамічної температури** – дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води.

1 моль (1 моль) – **одиниця кількості речовини** – дорівнює кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці – 12 масою $0,012$ кг. Структурні елементи повинні бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами й іншими частинками або специфікованими групами частинок.

1 ампер (1 А) – одиниця сили струму – дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та дуже малої площі поперечного перерізу, які містяться у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинив би виникнення на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7} \text{Н}$.

1 кандела (1 кд) – одиниця сили світла – дорівнює силі світла, що випромінюється з поверхні площею $1/600000 \text{ м}^2$ повного випромінювача в перпендикулярному напрямку при температурі випромінювача, яка дорівнює температурі твердіння платини при тиску 101525 Па (або дорівнює силі світла, що випромінюється в заданому напрямку джерелом, що випромінює монохроматичне світло частотою $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, енергетична сила світла якого в цьому напрямку становить $1/683 \text{ Вт/ср}$)

Додаткові

1 радіан (1 рад) – одиниця плоского кута – дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

1 стерадіан (1 ср) – одиниця тілесного кута – дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, що дорівнює радіусу сфери.

7.3. Основні фізичні сталі (округлені значення)

Фізична стала	Позначення	Значення
Прискорення вільного падіння	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравітаційна стала	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^3)$
Постійна Авогадро	N_A	$6,025 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	R	$8,31 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Елементарний заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Атомна одиниця маси	<i>a. o. m.</i>	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса електрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса нейтрона	m_n	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса протона	m_p	$1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Електрична стала	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Стала Планка	h	$6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

8.4. Множники і приставки для утворення кратних та часткових одиниць і їх найменування

Приставка		Множник	Приставка		Множник
Найменування	Позначення		Найменування	Позначення	
екса	Е	10^{18}	деці	д	10^{-1}
пета	П	10^{15}	санти	с	10^{-2}
тера	Т	10^{12}	мілі	м	10^{-3}
гіга	Г	10^9	мікро	мк	10^{-6}
мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
кіло	К	10^3	піко	п	10^{-12}
гекто	Г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}

8.5. Позасистемні одиниці, які допущені до застосування в навчальному процесі з фізики

Величина	Одиниця		
	Найменування	Позначення	Співвідношення з одиницею СІ
Час	хвилина	хв	60 с
	година	год	3600 с
	доба	доб	86400 с
Плоский кут	градус ^o	$(\pi/180)$ рад= $1,74 \cdot 10^{-2}$ рад
	хвилина [']	$(\pi/10800)$ рад= $2,91 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда [”]	$(\pi/648000)$ рад= $4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
Об'єм, місткість	літр	л	10^{-3} м^3
Енергія	електрон-вольт	еВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж
Маса	тонна	т	1000 кг
	атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Оптична сила	діоптрія	дптр	1 м^{-1}
Відносна величина	процент	%	10^{-2}
	проміле	‰	10^{-3}
	мільйонна частка	млн ⁻¹	10^{-6}
Логарифмічна величина	бел	Б	-
	децибел	дБ	-

8.6. Густина рідин

Рідина	Густина, кг/м ³	Газ	Густина, кг/м ³
Азот рідкий(77К)	$0,79 \cdot 10^3$	Водень	0,09
Бензин	$0,70 \cdot 10^3$	Гелій	0,18
Вода (при 4 °С)	$1,00 \cdot 10^3$	Кисень	1,43
Вода морська	$1,03 \cdot 10^3$	Повітря	1,29
Гліцерин	$1,26 \cdot 10^3$	Озон	2,14
Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$	Окис вуглецю	1,25
Спирт	$0,80 \cdot 10^3$	Хлор	3,21

8.7 Густина газів

(при нормальних умовах)

8.8. Густина твердих тіл

Тверде тіло	Густина, кг/м ³	Тверде тіло	Густина, кг/м ³
Алюміній	$2,70 \cdot 10^3$	Мармур	$2,70 \cdot 10^3$
Алмаз	$3,50 \cdot 10^3$	Мідь	$8,93 \cdot 10^3$
Барій	$3,50 \cdot 10^3$	Нікель	$8,90 \cdot 10^3$
Ванадій	$6,02 \cdot 10^3$	Свинець	$11,30 \cdot 10^3$
Вісмут	$9,80 \cdot 10^3$	Срібло	$10,50 \cdot 10^3$
Залізо	$7,88 \cdot 10^3$	Сталь	$7,80 \cdot 10^3$
Золото	$19,3 \cdot 10^3$	Скло	$2,60 \cdot 10^3$
Літій	$0,53 \cdot 10^3$	Цезій	$1,90 \cdot 10^3$
Лід	$0,90 \cdot 10^3$	Цинк	$7,15 \cdot 10^3$

8.9. Молярна маса і відносна молекулярна маса газів

Газ	Молярна маса, кг/моль	Відносна молекулярна маса
Азот	$28 \cdot 10^{-3}$	28
Водень	$2 \cdot 10^{-3}$	2
Повітря	$29 \cdot 10^{-3}$	29
Гелій	$4 \cdot 10^{-3}$	4
Кисень	$32 \cdot 10^{-3}$	32
Вуглекислий газ	$44 \cdot 10^{-3}$	44

8.10. Діелектрична проникність

Речовина	Проникність
Вода	81,0
Масло трансформаторне	2,2
Парафін	2,0
Скло	7,0
Слюда	7,0
Ебоніт	3,0
Фарфор	5,0

8.11. Енергія іонізації

Речовина	E_i , Дж	E_i , еВ
Водень	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелій	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Літій	$1,21 \cdot 10^{-17}$	75,6
Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

8.12. Відносні атомні маси (заокруглені значення) A , та порядкові номери Z деяких елементів

Елемент	Символ	A	Z	Елемент	Символ	A	Z
Азот	N	14	7	Літій	Li	7	3
Алюміній	Al	27	13	Магній	Mg	24	12
Аргон	Ar	40	18	Марганець	Mn	55	25
Барій	Ba	137	56	Мідь	Cu	64	29
Берилій	Be	9	4	Молібден	Mo	96	42
Ванадій	V	51	23	Натрій	Na	23	11
Водень	H	1	1	Неон	Ne	20	10
Вольфрам	W	184	74	Нікель	Ni	59	28
Вуглець	C	12	6	Олово	Sn	119	50
Гелій	He	4	2	Платина	Pt	195	78
Залізо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	201	80
Золото	Au	197	79	Сірка	S	32	16
Калій	K	39	19	Срібло	Ag	108	47
Кальцій	Ca	40	20	Уран	U	238	92
Кисень	O	16	8	Хлор	Cl	35	17

8.13. Показник заломлення

Речовина	Показник	Речовина	Показник
Алмаз	2,42	Гліцерин	1,47
Вода	1,33	Скло	1,29

8.14. Робота виходу електронів

Метал	A , Дж	A , еВ
Калій	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Літій	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3
Платина	$10 \cdot 10^{-19}$	6,3
Рубідій	$3,4 \cdot 10^{-19}$	2,1

Срібло	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цезій	$3,2 \cdot 10^{-19}$	2,0
Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0

8.15. Маса атомів легких ізотопів

ІЗОТОП	СИМВОЛ	Маса, а.о.м.	ІЗОТОП	СИМВОЛ	Маса, а.о.м.
Нейтрон	${}_0^1n$	1,00867	Бор	${}_{5}^{10}B$	10,01294
				${}_{5}^{11}B$	11,00930
Водень	${}_1^1H$	1,00783	Вуглець	${}_{6}^{12}C$	12,00000
	${}_1^2H$	2,01410		${}_{6}^{13}C$	13,00335
	${}_1^3H$	3,01605		${}_{6}^{14}C$	14,00324
Гелій	${}_{2}^3He$	3,01603	Азот	${}_{7}^{14}N$	14,00307
	${}_{2}^4He$	4,00260			
Літій	${}_{3}^6Li$	6,01513	Кисень	${}_{8}^{16}O$	15,99491
	${}_{3}^7Li$	7,01601			
Берилій	${}_{4}^7Be$	7,01693		${}_{8}^{17}O$	16,99913
	${}_{4}^9Be$	9,01219			

8.16. Період напіврозпаду радіоактивних ізотопів

ІЗОТОП	СИМВОЛ	Період напіврозпаду	ІЗОТОП	СИМВОЛ	Період напіврозпаду
Актиній	${}_{89}^{225}Ac$	10 діб	Іод	${}_{53}^{131}I$	8 діб
Кобальт	${}_{27}^{60}Co$	5,3 роки	Стронцій	${}_{38}^{90}Sr$	27 років
Магній	${}_{12}^{27}Mg$	10 хв	Фосфор	${}_{15}^{32}P$	14,3 діб
Радій	${}_{86}^{226}Ra$	1620 років	Церій	${}_{58}^{144}Ce$	285 діб
Радон	${}_{86}^{222}Rn$	3,8 діб			

8.17. Маса та енергія спокою деяких частинок

Частинка	m_0		E_0	
	кг	а. о. м.	Дж	МеВ
Електрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	239
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
α -частинка	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральний π -мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

8.18. Грецький алфавіт

Літера	Назва	Літера	Назва
<i>A, α</i>	альфа	<i>N ν</i>	ню
<i>B, β</i>	бета	<i>Ξ, ξ</i>	ксі
<i>Γ, γ</i>	гамма	<i>O, ο</i>	омікрон
<i>Δ, δ</i>	дельта	<i>Π, π</i>	пі
<i>E, ε</i>	епсилон	<i>P, ρ</i>	ро
<i>Z, ζ</i>	дзета	<i>Σ, σ</i>	сигма
<i>H, η</i>	ета	<i>T, τ</i>	тау
<i>Θ, θ</i>	тета	<i>Υ, υ</i>	іпсилон
<i>I, ι</i>	йота	<i>Φ, φ</i>	фі
<i>K, κ</i>	капа	<i>X, χ</i>	хі
<i>Λ, λ</i>	лямбда	<i>Ψ, ψ</i>	псі
<i>M, μ</i>	мю	<i>Ω, ω</i>	омега

8.19. Латинський алфавіт

Літера	Назва	Літера	Назва
<i>Aa</i>	а	<i>Nn</i>	ен
<i>Bb</i>	бе	<i>Oo</i>	о
<i>Cc</i>	це	<i>Pp</i>	пе
<i>Dd</i>	де	<i>Qq</i>	ку
<i>Ee</i>	е	<i>Rr</i>	ер
<i>Ff</i>	еф	<i>Ss</i>	ес
<i>Gg</i>	ге, же	<i>Tt</i>	те
<i>Hh</i>	га, аш	<i>Uu</i>	у
<i>Ii</i>	і	<i>Vv</i>	ве
<i>Jj</i>	йот, жи	<i>Ww</i>	дубль-ве
<i>Kk</i>	ка	<i>Xx</i>	ікс
<i>Ll</i>	ель	<i>Yy</i>	ігрек
<i>Mm</i>	ем	<i>Zz</i>	зет(зета)

9. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ТА ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фізика: **Підручник** для вищих навчальних закладів. Доповнене та правлене видання/ В.В. Бойко, Я.О. Гуменюк, П.П. Ільїн - К.: Видавництво ЛІРА-К, 2019. – 745 с.
2. Бойко В.В., Булах Г.І., Гуменюк Я.О., Ільїн П.П. Фізика: **Підручник** для студентів вищих навчальних закладів // - К.: Ліра-К. – 2016. – 468 с.
3. Бойко В.В., Відьмаченко А.П., Залоїло І.А., Малюта М.В. Фізика з основами кваліметрії: **Навчальний посібник** // - К.: Ліра-К. – 2018. – 564 с.
4. Посудін Ю.І., Бойко В.В., Годлевська О.О., Залоїло І.А. Біофізика. **Підручник** для студентів вищих навчальних закладів // – К.: Ліра-К. – 2016. – 508 с.
5. Бойко В.В., Сукач Г.О., Кідалов В.В. Фізика. **Підручник** для студентів нефізичних спеціальностей вищих навчальних закладів (гриф Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, лист № 1/11 - 11440 від 06 02. 2011 р.) вищих навчальних закладів // Донецьк: Вид-во та друк ТОВ «Юго-Восток, Лтд», 2012. – 488с.
6. Бойко В.В. Фізика. **Навчальний посібник** для студентів технічних та технологічних спеціальностей вищих навчальних закладів України. // Навчальний посібник (з грифом МОН України за № 1.4 /18 – Г - 1434 від 27.08.07 р.) , видання друге, перероблене і доповнене. - Київ.: Видавництво „Профі”, 2012. – 576 с.
7. Бойко В.В., Булах Г.І., Гуменюк Я.О. (за редакцією В.В. Бойка). Фізика. Частина І. Механіка. Молекулярна фізика та термодинаміка. Електрика // **Навчальний посібник** (з грифом МОН України за № 1/11-7330 від 04.08.10 р.) , видання третє, перероблене і доповнене. - Київ, ВЦ «Азбука», 2012.- 371 с.
8. Бойко В.В., Булах Г.І., Гуменюк Я.О. (за редакцією В.В. Бойка). Фізика Частина ІІ. Електромагнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. Елементи квантової фізики, фізики твердого тіла, атома та ядра // **Навчальний посібник** (з грифом МОН України за № 1/11-7330 від 04.08.10 р.), видання третє, перероблене і доповнене. - Київ, ВЦ «Азбука», 2012.- 319 с. (19,94 др. арк.)
9. Бойко В.В. Фізика. **Навчальний посібник** для технічних та технологічних спеціальностей ВНЗ (Гриф МОН). – К.: Видавництво „Арістей”, 2007. – 576 с.
10. Бойко В.В. Фізика. Частина І. **Навчальний посібник** для технічних та технологічних спеціальностей ВНЗ (Гриф МОН). – К.: Видавництво „ПРОФІ”, 2008. – 327 с.

11.Бойко В.В. Фізика. Частина II. **Навчальний посібник** для технічних та технологічних спеціальностей ВНЗ (Гриф МОН). – К.: Видавництво „ПРОФІ”, 2008. – 345 с.

12.Чолпан П.І. Основи фізики. – К.: Вища шк. 1995.- 488 с.

13.Бойко В.В. Фізика. Навчальний посібник для інженерних та лісогосподарських спеціальностей аграрних ВНЗ. – К.: Видавництво „Арістей”, 2006. – 336 с.

14.Загальний курс фізики. т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка / Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. – К. : Техніка, 2006.- 532 с.

15.Загальний курс фізики. т.2. Електрика і магнетизм / Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. – К. : Техніка, 2006.- 452 с.

16. Загальний курс фізики. т.3. Оптика. Квантова фізика / Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. – К. : Техніка, 2006.- 518 с.

Збірники задач та завдань:

1.Бойко В.В. Фізика. Збірник задач та завдань для самостійної роботи студентів інженерних спеціальностей. Частина 1. – К.: Видавництво Національного аграрного університету, 2004. – 110 с.

2.Бойко В.В. Фізика. Збірник задач та завдань для самостійної роботи студентів інженерних спеціальностей. Частина 2. – К.: Видавництво Національного аграрного університету, 2005. – 130 с.

3.Бойко В.В. Фізика (Кредитно – модульна система). Збірник задач та завдань з основами теорії та прикладами розв’язування задач. – К.: Видавництво „Арістей”, 2005. – 263 с.

Додаток А

Відеозаписи виконання лабораторних робіт з фізики для студентів Національного університету біоресурсів і природокористування України

Ще задовго до карантинних обмежень та дистанційного навчання науково-педагогічні працівники кафедри фізики розпочали роботу над створенням відео-демонстрацій виконання лабораторних робіт. На сьогодні на YouTube-каналі кафедри розміщено понад 30 коротких відео, які дозволяють ознайомитись з експериментальним обладнанням та методикою проведення вимірювань. Використання відеоматеріалів разом із покроковою інструкцією, яка розміщена на відповідному електронному навчальному курсі (elearn.nubir.edu.ua), значно полегшує підготовку студентів до лабораторних робіт, математичну обробку результатів вимірювань та дозволяє виконувати лабораторні роботи в дистанційному форматі.

Переглянути відео-демонстрації на YouTube-каналі кафедри можна за посиланням:

<https://cutt.ly/LJQBfKE>

або скориставшись QR кодом:




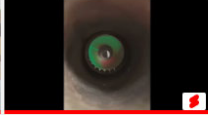


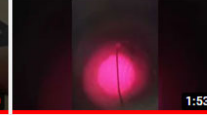
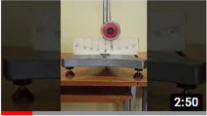
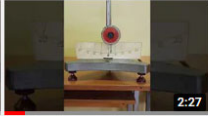








youtube.com/channel/UCUQ-x3dx5Lw2SL6w9a6DNDg/videos

кафедра фізики нубіп

КАФЕДРА ФІЗИКИ НУБІП УКРАЇНИ
Підписалося 28 користувачів

ГОЛОВНА **ВІДЕО** СПИСКИ ВІДТВОРЕННЯ КАНАЛИ ПРО КАНАЛ

Завантаження ПОРЯДОК СОРТУВАННЯ

 Лабораторна робота 3-1 579 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-1 984 перегляди · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-3 146 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-1 321 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-3 296 переглядів · 1 рік тому
 Лабораторна робота 1-8 (маятник без пружини) 351 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 1-8 (маятник з пружинами) 249 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-7 427 переглядів · 1 рік тому	 Установка для лабораторних робіт 6-1 та... 253 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 61 перегляд · 1 рік тому
 Пояс Роговського 0 312 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 1 119 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 2 203 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 3 187 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 4 166 переглядів · 1 рік тому


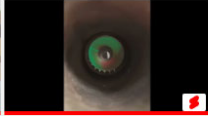


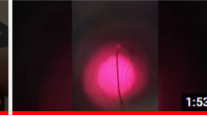

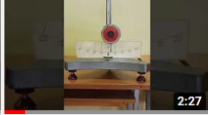








youtube.com/channel/UCUQ-x3dx5Lw2SL6w9a6DNDg/videos

кафедра фізики нубіп

КАФЕДРА ФІЗИКИ НУБІП УКРАЇНИ
Підписалося 28 користувачів

ГОЛОВНА **ВІДЕО** СПИСКИ ВІДТВОРЕННЯ КАНАЛИ ПРО КАНАЛ

Завантаження ПОРЯДОК СОРТУВАННЯ

 Лабораторна робота 3-1 579 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-1 984 перегляди · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-3 146 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-1 321 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-3 296 переглядів · 1 рік тому
 Лабораторна робота 1-8 (маятник без пружини) 351 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 1-8 (маятник з пружинами) 249 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-7 427 переглядів · 1 рік тому	 Установка для лабораторних робіт 6-1 та... 253 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 61 перегляд · 1 рік тому
 Пояс Роговського 0 312 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 1 119 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 2 203 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 3 187 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 4 166 переглядів · 1 рік тому

Приклади та типові результати виконання лабораторних робіт з фізики

Модуль 1. Механіка.

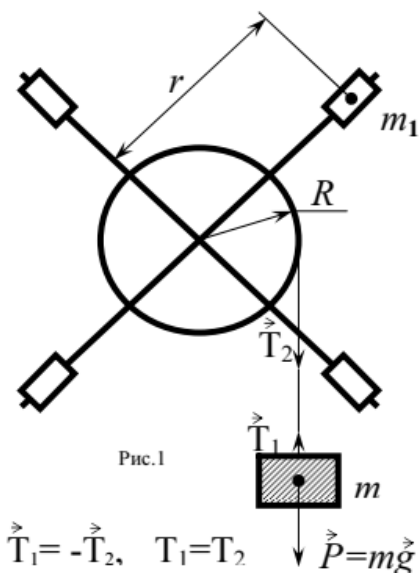
Лабораторна робота 1.1. Визначення прискорення вільно падіння за допомогою математичного маятника.

Для випадку вимірювання тривалості $N = 25$ коливань результати вимірювань можуть мати наступні значення.

	Табличні або задані величини	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань	
	π	$l, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$g, \text{ м/с}^2$
C	-	0,001	0,01	-	-
1	-	1,562	62,82	-	-
2	-	1,567	62,77	-	-
3	-	1,566	62,93	-	-
$\langle X \rangle$	3,14				
Δ_c	-			-	-
Δ°	-			-	-
Δ					
$\varepsilon = \Delta / \langle X \rangle$					

Користуючись методичними вказівками до роботи потрібно знайти середнє значення прискорення вільного падіння, похибки та записати результат в стандартному вигляді: $g = \langle g \rangle \pm \Delta$ для $P \geq 0,95$, $\varepsilon = \dots$

Лабораторна робота 1.2. Вивчення законів обертового руху на хрестовидному маятнику Обербека.



Виміряні значення шляху, який проходить тягарець при вільному падінні, h , діаметра шківів, d , та відстані від точок кріплення тягарців до осі обертання, r , подано в таблиці. Ціну поділок кожного з приладів, якими вимірювались h , d і r вказано в таблиці. Час, за який тягарець проходить відстань h пропонується визначити самостійно з відео за допомогою секундоміра:

- 1) без тягарців: <https://youtu.be/PvO4qZ4u8xw>
- 2) з тягарцями: <https://youtu.be/YPeET9QZeDg>

QR коди відеодемонстрацій:



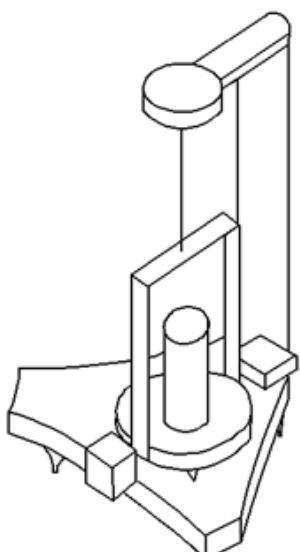
1)



2)

	Табличні або задані величини			Результати прямих вимірювань					Результати непрямих вимірювань	
	g , м/с	$4m_1$, кг	m , кг	h , м	d , м	r , м	t_1 , с	t_2 , с	I_T , кг·м ²	I_0 , кг·м ²
С	-	-	-	0,05	0,00005	0,001			-	-
1	-	-	-	1,30	0,03975	0,343				
2	-	-	-	1,30	0,04020	0,346				
3	-	-	-	1,30	0,04005	0,342				
4	-	-	-	1,30	0,04015	0,339				
$\langle x \rangle$	9,81	0,130	0,100							
Δ_c	-	-	-						-	-
Δ°	-	-	-						-	-
Δ										
ε										

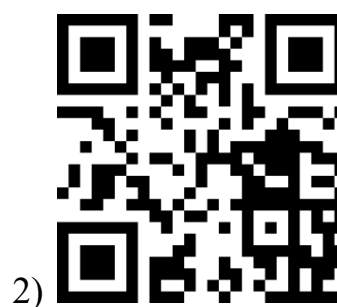
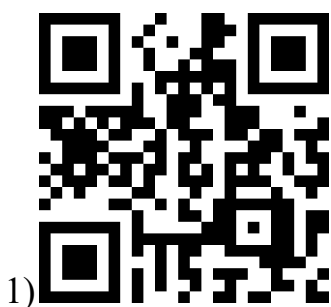
Лабораторна робота 1.3. Визначення моменту інерції тіла методом крутильних коливань.



Значення маси циліндра, m , та його виміряні значення його діаметра наведено в таблиці. Час 10 крутильних коливань пропонується виміряти з допомогою секундоміра самостійно, використовуючи відео-демонстації:

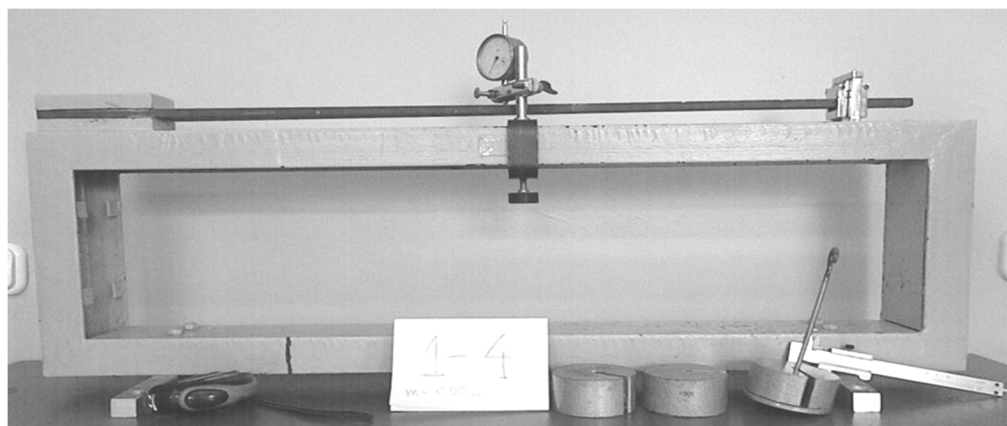
- 1) без циліндра: <https://youtu.be/fDjzAnBebbM>
- 2) з циліндром: <https://youtu.be/Pd6rm0RIobY>

QR коди цих відео-демонстацій



	Табличні або задані величини	Результати прямих вимірювань			Результати непрямих вимірювань			
		R , м	t_1 , с	t_2 , с	T_1 , с	T_2 , с	$I_{ц}$, кг м ²	I_0 , кг м ²
С	-	0,0001						
1	-	0,0998						
2	-	0,1001						
3	-	0,1003						
4	-	0,1000						
$\langle X \rangle$	10,0							
Δ_c								
Δ°								
Δ								
$\varepsilon = \Delta / \langle X \rangle$								

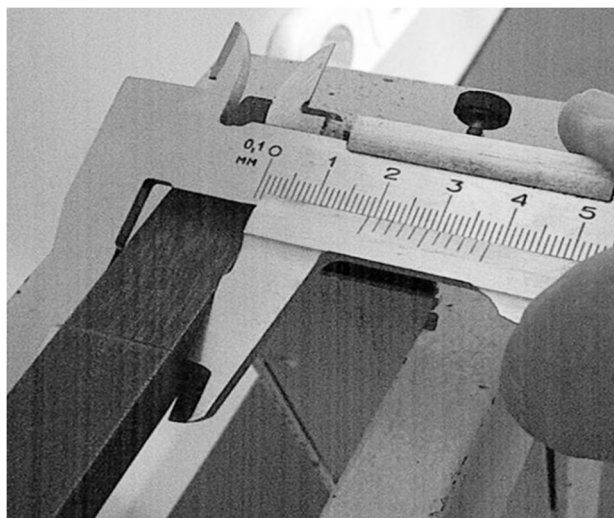
Лабораторна робота 1.4. Визначення модуля Юнга сталі по згину стержня.



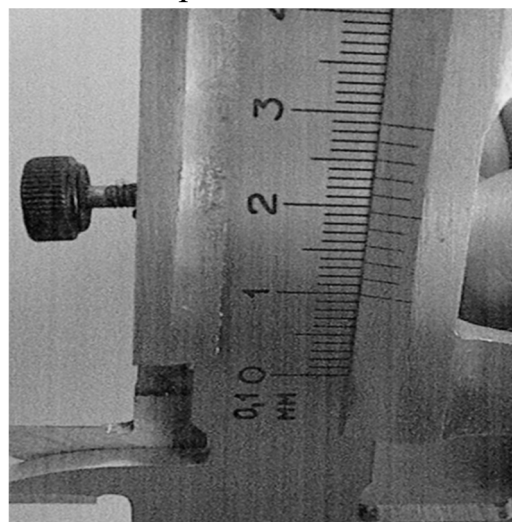
Значення довжини стержня, l , та деякі значення ширини, a , та товщини, b , подано в таблиці.

Результати прямих вимірювань			
	l , м	a , м	b , м
C	0,001	0,0001	0,0001
1	0,722		
2	0,720	0,0213	0,0102
3	0,722	0,0211	0,0101
$\langle X \rangle$			
Δ_c			
Δ°			
Δ			
$\varepsilon = \Delta / \langle X \rangle$			

1 вимірювання ширини:



1 вимірювання товщини:



Задані величини внесено до таблиці нижче. Величину прогину стержня при навантаженні пропонується виміряти самостійно використовуючи відео:

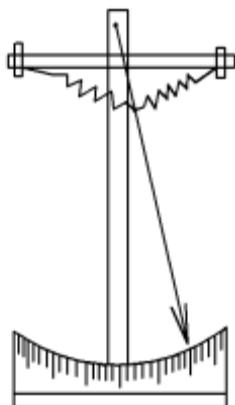
https://youtu.be/o7Y1Cggb_d8

QR код відео:



	Табличні або задані величини		Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань		
	$g, \text{ м/с}^2$	$m, \text{ кг}$	$\lambda_{\text{навант}}, \text{ м}$	$\lambda_{\text{розвант}}, \text{ м}$	$F, \text{ Н}$	$F/\lambda, \text{ Н/м}$	$E, \text{ Па}$
C	-	-	10^{-5}	10^{-5}	-	-	-
1	-	0,500				-	-
2	-	1,000				-	-
3	-	1,500				-	-
$\langle X \rangle$	9,8	-	-	-			
Δ_c	-	-				-	-
Δ°	-	-				-	-
Δ							
$\varepsilon = \Delta / \langle X \rangle$							

Лабораторна робота 1.8. Визначення логарифмічного декременту загасання.

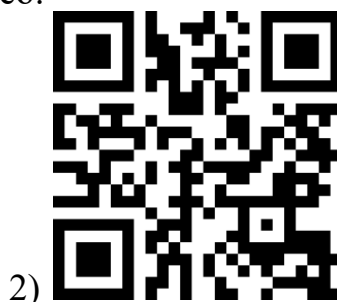


Потрібно провести вимірювання максимального відхилення стрілки маятника (амплітуди коливань) для 0, 10, 20,..., 100 коливань для випадку відсутності та наявності пружин. Також потрібно виміряти час 20 коливань для обох випадків та визначити періоди коливань.

Відео-демонстрації експерименту можна знайти за посиланнями:

- 1) без пружин: <https://youtu.be/UWaatIbMJ3g>
- 2) з пружинами: <https://youtu.be/5E9a038pinM>

QR коди відео:



N	A_n	A_0/A_n	$\ln (A_0/A_n)$	δ
0				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				

Тут A_0 це значення A_n для $N=0$

Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань					
t_0, c	t, c	T_0, c	β_0, c^{-1}	τ_0, c	T, c	β, c^{-1}	τ, c

Модуль 2. Молекулярна фізика та термодинаміка.

Лабораторна робота 2.1. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом Стокса.

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням (в описі під відео наведено діаметри кульок та інші параметри):

<https://youtu.be/9-4vPyXZdKY>



Лабораторна робота 2.2. Визначення коефіцієнта Пуассона газу методом адіабатичного розширення.

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/YhxQCFkаhc>

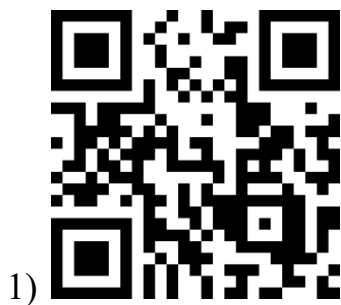


Лабораторна робота 2.3. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву крапель.

Відео-демонстрації виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

1) дистильована вода: <https://youtu.be/X2Dp8DrHYW0>

2) розчин спирту: <https://youtu.be/gdmNv9DJoII>

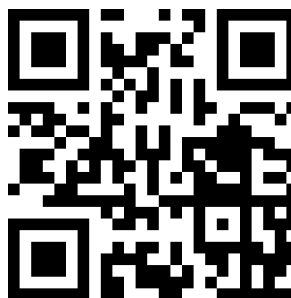


Модуль 3. Електрика.

Лабораторна робота 3.1. Дослідження електростатичного поля

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/LBf69wwzijM>



Лабораторна робота 3.2. Визначення електрорушійної сили (Е.Р.С.) джерела струму методом компенсації

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/UzPm1GSWqul>



Лабораторна робота 3.3. Вивчення залежності опору металів від температури

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/SOG5Wr2fvCA>



Модуль 4. Електромагнетизм.

Лабораторна робота 4.1. Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/iDksoGz4ja4>



Лабораторна робота 4.3. Вимірювання циркуляції вектора напруженості магнітного поля соленоїда

Відео-демонстрації виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланнями:

- 1) 50 поділок на амперметрі відома котушка: https://youtu.be/jlfmQw_BYPE
- 2) 50 поділок на амперметрі невідома котушка: https://youtu.be/r0UwN7ik7_A
- 3) 65 поділок на амперметрі відома котушка: <https://youtu.be/eBSKizqWjIE>
- 4) 65 поділок на амперметрі невідома котушка: https://youtu.be/kTLA_v2xvBo



1)



2)



Модуль 5. Оптика.

Лабораторна робота 5.1. Визначення показника заломлення за допомогою мікроскопа

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/8zXZAv68yIk>



Лабораторна робота 5.3. Визначення довжини світлової хвилі за допомогою кілець Ньютона

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/hnGcTMgHtjk>



Лабораторна робота 5.7. Перевірка закону Малюса

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/T62MvB0MOBU>



Модуль 6. Фізика твердого тіла, атома та атомного ядра

Відео-демонстрація виконання лабораторної роботи знаходиться за посиланням:

<https://youtu.be/SOG5Wr2fvCA>




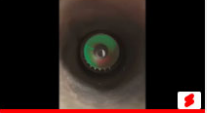


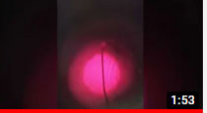


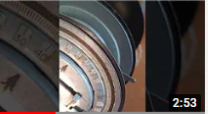







youtube.com/channel/UUCUQ-x3dx5Lw2SL6w9a6DNDg/videos

кафедра фізики нубіп

КАФЕДРА ФІЗИКИ НУБІП УКРАЇНИ
Підписалося 28 користувачів

ГОЛОВНА **ВІДЕО** СПИСКИ ВІДТВОРЕННЯ КАНАЛИ ПРО КАНАЛ

Завантаження ПОРЯДОК СОРТУВАННЯ

 Лабораторна робота 3-1 579 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-1 984 перегляди · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-3 146 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-1 321 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-3 296 переглядів · 1 рік тому
 Лабораторна робота 1-8 (маятник без пружин) 351 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 1-8 (маятник з пружинами) 249 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-7 427 переглядів · 1 рік тому	 Установка для лабораторних робіт 6-1 та... 253 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 61 перегляд · 1 рік тому
 Пояс Роговського 0 312 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 1 119 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 2 203 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 3 187 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 4 166 переглядів · 1 рік тому


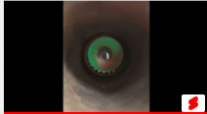


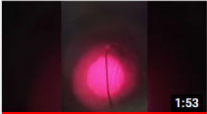


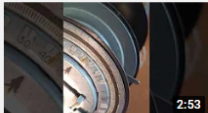







youtube.com/channel/UUCUQ-x3dx5Lw2SL6w9a6DNDg/videos

кафедра фізики нубіп

КАФЕДРА ФІЗИКИ НУБІП УКРАЇНИ
Підписалося 28 користувачів

ГОЛОВНА **ВІДЕО** СПИСКИ ВІДТВОРЕННЯ КАНАЛИ ПРО КАНАЛ

Завантаження ПОРЯДОК СОРТУВАННЯ

 Лабораторна робота 3-1 579 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-1 984 перегляди · 1 рік тому	 Лабораторна робота 4-3 146 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-1 321 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-3 296 переглядів · 1 рік тому
 Лабораторна робота 1-8 (маятник без пружин) 351 перегляд · 1 рік тому	 Лабораторна робота 1-8 (маятник з пружинами) 249 переглядів · 1 рік тому	 Лабораторна робота 5-7 427 переглядів · 1 рік тому	 Установка для лабораторних робіт 6-1 та... 253 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 61 перегляд · 1 рік тому
 Пояс Роговського 0 312 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 1 119 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 2 203 перегляди · 1 рік тому	 Пояс Роговського 3 187 переглядів · 1 рік тому	 Пояс Роговського 4 166 переглядів · 1 рік тому

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

навчальне видання

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ
**Методичні вказівки до виконання лабораторних
робіт в змішаному та дистанційному режимі**

Укладачі: **БОЙКО Володимир Васильович,
ВІДЬМАЧЕНКО Анатолій Петрович,
ГУМЕНЮК Ярослав Олександрович,
ЗАЛОЇЛО Ігор Анатолієвич,
ІЛЬІН Петро Петрович,
МАЛЮГА Микола Володимирович
ЧОРНИЙ Віталій Петрович**

Відповідальний за випуск доц. В.В. Бойко

Редактор

Підписано до друку

Ум. друк. арк. _____

Наклад ___ пр.

Видавничий центр НУБіП України.

03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 15.

Формат 60 x 84 1/16.

Обл.-вид. арк. _____

Зам. № _____