

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Ф І З И К А

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

БАЗОВИЙ ЦИКЛ

*Рекомендовано науково-методичною радою
Київського національного університету будівництва і архітектури
як навчальний посібник для студентів усіх спеціальностей*

Третє видання, виправлене і доповнене

Київ 2012

УДК: 53(075)

ББК 22.3я7

Ф50

Рецензент: І.К. Коваль, доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри фізики та астрономії Чернігівського національного педуніверситету, заслужений діяч науки та техніки
Л.Є. Пелевін, канд. техн. наук, професор кафедри будівельних машин

Автори: В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян, Н.Б. Бурдейна, Ю.І. Григораш, В.Б. Долгошей, В.Є. Дугінов, О.Ю. Колесник, Г.Ю. Краснянський, Г.В. Кучерова, О.В. Панова, С.М. Пономаренко, Г.Д. Потапенко, В.І. Тарасевич, Ф.Є. Хлистун, О.О. Худенко, О.М. Бесараб

Рекомендовано науково-методичною радою Київського національного університету будівництва і архітектури, протокол № 8 від 21 червня 2011 року.

Фізика. Лабораторний практикум. Базовий цикл: Навчальний посібник. / В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян, Н.Б. Бурдейна та ін./ За заг.ред. В.І. Клапченка. – К.: КНУБА, 2012. – 18 с.

Мета навчального посібника – допомогти студентам при підготовці, виконанні, оформленні та захисті лабораторних робіт базового практикуму, який виконується студентами усіх спеціальностей КНУБА.

Посібник має окрему главу “На допомогу студенту”, в якій розглянуто на конкретних прикладах всі етапи виконання лабораторної роботи.

Призначено для студентів усіх спеціальностей КНУБА.

УДК: 53(075)

ББК 22.3я7

© В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян,
Н.Б. Бурдейна та ін., 2012
© КНУБА, 2012

ЗМІСТ

Передмова.....	5
Вступ до практикуму	7
Глава I. НА ДОПОМОГУ СТУДЕНТУ	10
<i>Розділ 1. ЯК НАПИСАТИ ЗВІТ?.....</i>	<i>10</i>
<i>Розділ 2. ПРАВИЛА НАБЛИЖЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ</i>	<i>21</i>
<i>Розділ 3. ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК ФІЗИЧНИХ ВИМІРІВ</i>	<i>25</i>
Модуль 1. Механіка	30
Лабораторна робота № 1.1. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ ВІД РОЗПОДІЛУ ЇЇ МАСИ ВІДНОСНО ОСІ ОБЕРТАННЯ.....	30
Лабораторна робота № 1.2. ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА.....	34
Лабораторна робота № 1.3. ВИВЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУХУ МАЯТНИКА МАКСВЕЛА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ	39
Лабораторна робота № 1.4. ВИМІРЮВАННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ.....	45
Лабораторна робота № 1.5. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ	51
Лабораторна робота № 1.6. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА.....	56
Модуль 2. Молекулярна фізика.....	59
Лабораторна робота № 2.1. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ ВІДРИВУ КІЛЬЦЯ	59
Лабораторна робота № 2.2. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМУ	63
Лабораторна робота № 2.3. ПЕРЕВІРКА ОСНОВНИХ ГАЗОВИХ ЗАКОНІВ	68
Лабораторна робота № 2.4. ВИЗНАЧЕННЯ C_p/C_v ДЛЯ ПОВІТРЯ МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА.....	72
Лабораторна робота № 2.5. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЕФІЦІЄНТА ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ	78
Модуль 3. Електрика та магнетизм.....	83
Лабораторна робота № 3.1. ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТЕНЦІАЛУ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ.....	83
Лабораторна робота № 3.2. ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРОВІДНИКА ЗА ДОПОМОГОЮ АМПЕРМЕТРА ТА ВОЛЬТМЕТРА.....	87
Лабораторна робота № 3.3. ГРАДУЮВАННЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА	92
Лабораторна робота № 3.4. ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ.....	98
Лабораторна робота № 3.5. ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ.....	102
Лабораторна робота № 3.6. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА.....	107
Лабораторна робота № 3.7. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ СХРЕЩЕНИХ ПОЛІВ.....	112
Лабораторна робота № 3.8. ВИЗНАЧЕННЯ ККД ТРАНСФОРМАТОРА.....	117
Лабораторна робота № 3.9. ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ ТА ДРОСЕЛЯ	121
Модуль 4. Коливальні та хвильові процеси. Оптика	125

Лабораторна робота № 4.1. Визначення параметрів згасання коливань фізичного маятника	125
Лабораторна робота № 4.2. Дослідження резонансних характеристик коливального контуру	130
Лабораторна робота № 4.3. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ	136
Лабораторна робота № 4.4. ВИВЧЕННЯ РОБОТИ РЕЛАКСАЦІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА	140
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5.1. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІПРИЗМИ ФРЕНЕЛЯ	146
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5.2. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ РЕШІТКИ	150
Лабораторна робота № 5.3. Дослідження поляризованого світла	156
Модуль 6. Фізичні основи квантової та ядерної фізики	159
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5.6. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРОНІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ	159
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6.1. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА	163
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6.2. Вимірювання ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА	170
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6.3. ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА	175
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7.1. ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ	179
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7.2. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ	186
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	191
<i>Додаток 1</i>	191
<i>Додаток 2</i>	192

ПЕРЕДМОВА

Фізичний практикум займає чільне місце при підготовці майбутніх фахівців – інженерів та технологів. Він спрямований, з одного боку, на більш глибоке засвоєння основних фізичних закономірностей, а з іншого – допомагає набути майбутнім фахівцям навички експериментування. Фізичний практикум виступає своєрідним вступом до подальшої самостійної роботи студентів.

Даний посібник узагальнює багаторічний досвід проведення лабораторних робіт викладачами кафедри фізики КНУБА та включає ті нововведення, які обумовлені вимогами часу. На відміну від попередніх видань “Методичних вказівок” до виконання окремих лабораторних робіт [3–6], “Фізичного практикуму” [7] 1999 р. та “Фізика. Лабораторний практикум” [8] 2006 р., даний посібник присвячений базовому практикуму, який не менш ніж на 90 % виконують студенти *всіх спеціальностей, так чи інакше пов’язаних з будівельним виробництвом.*

При цьому всі попередні удосконалення збережено, зокрема збережено та доповнено главу «На допомогу студентів». Це враховує ту обставину, що за навчальними планами підготовки бакалаврів фізичний практикум передуює практикумам з інших дисциплін, тому в навчальному посібнику висвітлено цілу низку питань, об’єднаних загальним бажанням якомога швидше та повніше підготувати студента до даного виду навчальної роботи. Зокрема, у “Вступі до практикуму” наведені загальні вимоги, правила поведінки та обов’язки учасників практикуму, відомості про вимірювання фізичних величин, елементи теорії обчислення похибок, наведені конкретні приклади обробки результатів експерименту, побудови графіків та оформлення звітів про виконання лабораторної роботи. Окремо розглянуто методи обробки результатів експерименту за допомогою комп’ютерної техніки.

В даному посібнику продовжено роботу по організаційно-методичному удосконаленню дидактичних матеріалів та робочої програми з «Фізики» згідно з вимогами Болонського процесу. Всі лабораторні роботи базового циклу, приведені в посібнику, згруповані в п’ять мікроциклів відповідно до уніфікованої робочої програми з «Фізики», яка складається з 5 основних навчальних модулів. Розподіл робіт за мікроциклами показано в таблиці 1. Подібний розподіл супроводжує і всі інші види навчальної роботи з фізики. Зокрема практичні заняття та виконання індивідуальних контрольних робіт. Підготовлений та виданий в 2010 році посібник «Фізика. Збірник задач», в якому приведені методичні вказівки до розв’язування та оформлення задач, а також зібрані завдання для індивідуальних контрольних робіт, має аналогічну модульну структуру.

Таблиця 1

Номер модуля	Назва модуля	Номер мікроциклу	Номери лабораторних робіт	Макс. кількість
1.	Механіка	МЦ1	№1.1-1.6	6
2.	Молекулярна фізика	МЦ2	№2.1-2.5	5
3.	Електрика та магнетизм	МЦ3	№3.1-3.9	9
4.	Коливальні та хвильові процеси. Оптика	МЦ4	№4.1-4.4; 5.1-5.3	7
5.	Основи квантової фізики та фізики ядра	МЦ5	№5.6;6.1-6.3;7.1-7.2	6

Таким чином, в технології навчального процесу з вивчення «Фізики» передбачено наступне: паралельно з лекційним курсом за тематикою певного модуля, проводяться практичні заняття по розв'язуванню задач з даного модуля, виконання індивідуальної контрольної роботи з даного модуля та виконання лабораторних робіт з мікроциклу, присвяченому даному модулю. Номери лабораторних робіт, обов'язкові для виконання студентом в даному мікроциклі, визначає лектор, який доводить до відома студентів повний список робіт до початку лабораторних занять.

Для підвищення якості навчальної роботи з виконання лабораторних робіт студентам **рекомендується** проводити підготовку теоретичного матеріалу одразу до всіх робіт, внесених до списку даного мікроциклу. Крім того, викладачам, що ведуть лабораторний практикум, слід привернути увагу студентів на те, що в даному посібнику необхідні для розуміння фізичної суті роботи *поняття, терміни, явища, рівняння та закони* виділені курсивом. А їх визначення можна знайти: а) в межах коротких теоретичних відомостей до даної роботи; б) в межах коротких теоретичних відомостей до інших робіт даного мікроциклу (тоді там будуть відповідні посилання); в) або ж лише в підручнику чи конспекті лекцій з даного модуля.

Якість та повноту підготовки теоретичного матеріалу легко перевірити з допомогою списку контрольних запитань, які приведені в кінці кожної роботи.

ВСТУП ДО ПРАКТИКУМУ

Фізика – наука експериментальна і тому одержання та обробка результатів вимірювань складає значну частину загального обсягу знань та вмінь, які повинен опанувати студент. Все це можна засвоїти, користуючись даним посібником.

У главі I, яка складається з трьох розділів, наведена теорія похибок фізичних вимірювань та способи наближених обчислень.

Зважаючи на те, що більшість студентів знайомиться з лабораторним практикумом вперше, додано розділ “Як написати звіт”, в якому досить детально, на прикладі конкретних робіт, розглянуто всі складові процесу оформлення звіту з використанням матеріалу інших трьох розділів. Тому, перш ніж починати виконання лабораторного практикуму, всім студентам рекомендовано ознайомитись зі змістом вступу та глави I посібника й користуватись ними під час обробки результатів вимірювання та оформлення звітів з кожної лабораторної роботи.

На кафедрі фізики розроблені програми обробки фізичного експерименту за допомогою комп’ютера. Для цього існує комп’ютерний клас кафедри. Обробка результатів вимірювань з допомогою комп’ютера не є обов’язковою, але студентам рекомендується провести розрахунки вимірювань декількох лабораторних робіт саме таким чином. Відмінності в процедурі оформлення звіту, що виникають при такому способі обробки результатів, підкаже викладач.

Лабораторний практикум починається зі вступного заняття. Це перше заняття групи на кафедрі фізики, яке є організаційним. На цьому занятті викладач:

- проводить інструктаж з техніки безпеки в лабораторії кафедри фізики;
- здійснює поділ студентської групи на підгрупи та лабораторні бригади;
- ознайомлює з графіком виконання робіт кожною бригадою;
- надає рекомендації щодо літератури та методичних посібників, які можуть бути використані при підготовці та відпрацюванні лабораторних робіт;
- ознайомлює студентів з вимогами до виконання лабораторних робіт.

Виконання кожної лабораторної роботи передбачає окремі **етапи**:

1. Самостійну домашню підготовку до лабораторної роботи.
2. Отримання дозволу на виконання роботи.

3. Виконання роботи та фіксування результатів вимірювання.
4. Оформлення звіту.
5. Захист лабораторної роботи.

Розглянемо кожний етап детальніше.

1. Що включає самостійна домашня підготовка?

Студент, який знає номер своєї бригади, визначає за графіком номер та назву тієї лабораторної роботи, яка буде виконуватись на даному лабораторному занятті. Скориставшись рекомендованим методичним посібником вдома або у читальному залі, готується до виконання лабораторної роботи. В ході підготовки студент може проконсультуватись у викладача. Результатом підготовки має бути:

- конспект у лабораторному зошиті методичних вказівок до виконання даної лабораторної роботи;
- володіння в достатньому обсязі теоретичним матеріалом за темою роботи. (Для цього можна скористатись наведеними вказівками до виконання лабораторної роботи у методичному посібнику, контрольними запитаннями до лабораторної роботи або підручником);
- вміння чітко формулювати назву, мету та завдання даної лабораторної роботи;
- знання методики виконання лабораторної роботи та необхідного обладнання, яким користуються в даній роботі.

2. Як отримати дозвіл на виконання роботи?

Для того, щоб одержати дозвіл на виконання даної лабораторної роботи необхідно:

- ▶ мати в лабораторному зошиті студента скорочений (або повний) запис методичних матеріалів, необхідних як для виконання самої роботи, так і для оформлення звіту та захисту лабораторної роботи. Теоретичні відомості з рекомендованої літератури можуть бути подані в скороченій формі;
- ▶ знати, яка мета роботи та яке конкретне завдання ставиться перед студентом;
- ▶ знати, які вимірювання, яким чином і в якій послідовності слід здійснювати;
- ▶ знати, які матеріали, прилади, установки необхідні для виконання роботи.

Надаючи допуск викладач попереджує (іноді застерігає) про те, чого не можна робити взагалі чи не можна робити без нагляду викладача або лаборанта.

3. Виконання роботи та фіксування результатів вимірювання.

Студент виконує лабораторну роботу під наглядом викладача. Електричні схеми включаються у коло тільки після перевірки викладачем або лаборантом. Виконання лабораторної роботи фіксується в лабораторному журналі при наявності в студентських лабораторних зошитах результатів вимірювань.

4. Як правильно оформити звіт?

Розрахунок результатів вимірювання, побудова графіків та оформлення звіту проводиться за рамками лабораторних занять. Рекомендації щодо обробки результатів вимірювань (правила наближених обчислень, обчислення похибок фізичних вимірів) та оформлення звіту (на конкретних прикладах) приведені в главі I.

6. Як захистити роботу?

Загальні положення про захист лабораторної роботи такі:

- до захисту роботи допускають студентів, які виконали роботу та здали правильно оформлений звіт;
- захистом роботи є підтвердження студентом в бесіді з викладачем розуміння теоретичних положень, фізичних термінів, понять на тему роботи в обсязі, окресленому набором контрольних запитань, які приведені в кінці кожної роботи;
- додаткові запитання, направлені на виявлення більш глибокого розуміння студентом фізичної суті явищ, можуть бути задані студентові для виставлення оцінки "добре" чи "відмінно";
- результати опитування заносяться до лабораторного журналу з відповідною оцінкою.

Глава I. НА ДОПОМОГУ СТУДЕНТУ

Розділ 1. ЯК НАПИСАТИ ЗВІТ?

Після виконання лабораторної роботи студент повинен написати і здати викладачеві звіт. Звіт пишеться на аркушах формату А-4. Титульний лист повинен мати такий вигляд:

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Кафедра фізики

ЗВІТ

Про виконання лабораторної роботи №...

(назва роботи)

Студентом _____
(прізвище, ініціали)

(група)

(факультет)

Дата виконання роботи: _____

Дата подання звіту: _____

(відмітка про прийняття роботи) (прізвище викладача та підпис)

Звіт має містити такі складові елементи:

1. Формулювання мети та задачі дослідження.
2. Метод, що використовується в роботі (короткий виклад) та схема досліду.
3. Визначення робочої формули.
- 4 Таблиця значень вимірюваних величин.
5. Розрахунки шуканих величин та визначення абсолютної й відносної похибки для них.
6. Графіки.
7. Висновки.

Розглянемо кожний елемент звіту.

1. Формулювання мети та задачі, які ставилися в роботі

Починати звіт треба з чіткої постановки задачі.

Приклади:

а) в роботі ставиться задача визначення коефіцієнта динамічної в'язкості гліцерину;

б) в роботі було необхідно дослідити згасаючі коливання фізичного маятника та визначити параметри згасання;

в) в роботі ставиться задача визначення лінійного та масового коефіцієнтів поглинання γ -випромінювання різними матеріалами. Для вимірювання використовуються зразки з дерева, бетону та сталі.

2. Метод, що використовується в роботі

Якщо в роботі використовується відомий фізичний метод, слід вказати на це і дати коротке описання методу. Останнє повинно супроводжуватися рисунком чи схемою (механічною, електричною, оптичною) або блок-схемою.

У разі, коли проводяться звичайні виміри на лабораторній установці, слід зобразити схематично цю установку та описати характер вимірів і мету, з якою це робиться.

Приклади:

1. В роботі використовується метод Стокса, який базується на дослідженні руху тіла сферичної форми у рідині або газі. Схема досліду зображена на рисунку 1.1.

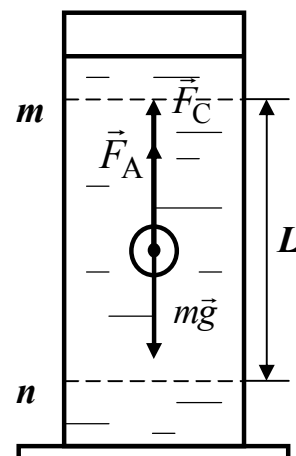


Рис.1.1

Вимірюючи час τ , за який кулька відомого діаметра d проходить у рівномірному русі відстань L , за робочою формулою підраховують значення коефіцієнта динамічної в'язкості гліцерину.

2. Блок-схема лабораторної установки для вимірювання поглинання γ - випромінювання речовиною має вигляд (рис. 1.2), де **1** – контейнер з радіоактивним препаратом; **2** – поглинаюча речовина у формі пластини; **3** – лічильник Гейгера – Мюллера; **4** – перерахунковий пристрій.

Для визначення коефіцієнта поглинання необхідно підрахувати за певний проміжок часу кількість γ - квантів, що попадають на пластину та кількість γ - квантів, що проходять крізь неї.

3. В роботі досліджуються згасаючі коливання фізичного маятника, вигляд якого зображений на рисунку 1.3, де **1** – нерухома вісь обертання; **2** – рухомий вантаж, який може закріплюватись на різних відстанях d від осі обертання; **3** – шкала відліку кута відхилення маятника.

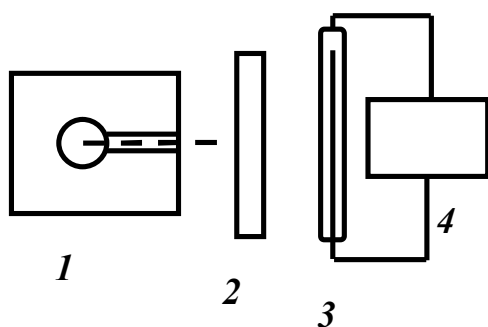


Рис. 1.2

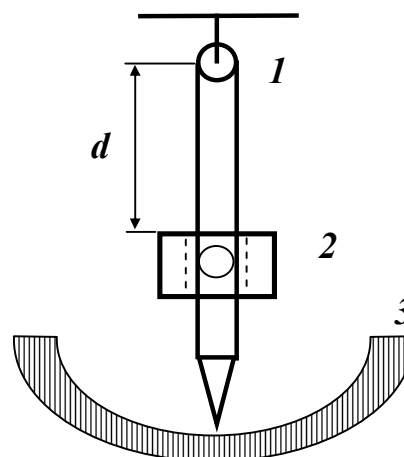


Рис. 1.3

Змінюючи відстань d , ми тим самим змінюємо положення центра ваги та момент інерції маятника відносно осі обертання.

Для визначення параметрів згасання необхідно знати залежність зміни амплітуди коливань від часу. Для цього під час досліду через рівні проміжки часу вимірюють значення амплітуди коливань.

3. Визначення робочої формули

3.1. Формула, за якою визначається значення шуканої величини, є розв'язком певної фізичної задачі. Постановку цієї задачі студент повинен розуміти і детально розібратися у розв'язку. Але у звіті наводиться лише остаточний вигляд розв'язку, який прийнято називати робочою формулою.

Робоча формула може містити:

а) фундаментальні фізичні константи (c – швидкість світла у вакуумі, e – заряд електрона, h – стала Планка тощо);

б) величини, які є сталими для даного експерименту (m – маса вантажу, ρ – густина речовини, ε – електрорушійна сила еталонного джерела струму тощо);

в) величини, що підлягають безпосередньому вимірюванню під час досліду (t – час, d – відстань, U – напруга тощо).

Приклад.

В роботі досліджувався рух свинцевих кульок у гліцерині. Формула для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідини має вигляд:

$$\eta = \frac{gd^2\tau(\rho - \rho_\delta)}{18L},$$

де g – прискорення вільного падіння, d – діаметр кульки, ρ – густина свинцю, ρ_δ – густина рідини, L – шлях, що проходить кулька за час τ .

3.2. Для величин, що є сталими під час досліду прийняті такі позначення: $g=9,81$ м/с², $\rho=11350$ кг/м³, $\rho_\delta=860$ кг/м³.

3.3. Безпосередньо вимірюваними величинами є d , L , τ . Діаметр кульки вимірювався мікрометром з індикатором годинникового типу. Ціна поділки – 0,01 мм. Межі вимірювання 0...10 мм. Шлях L вважався рівним відстані між рисками на посудині і вимірювався стандартною лінійкою з ціною поділки 1мм. Час вимірювався секундоміром з ціною поділки 0,2 с.

4. Таблиця вимірюваних величин

Результати вимірювань подаються у вигляді таблиці. При цьому слід мати на увазі таке: при первинних вимірах допускається (і навіть корисно) записувати значення вимірюваної величини у тих одиницях, у яких градуйована шкала приладу (мм, мГ, мкА, кількість поділок шкали приладу тощо).

Це робиться тому, що у разі помилки при переході до основних одиниць, можна було б її знайти і виправити. Якщо ж таких записів немає, то у разі помилки все треба починати з початку.

Приклади:

а) сила $F = 12,1$ мГ = $12,1 \cdot 10^{-3}$ Г = $0,118 \cdot 10^{-3}$ Н;

б) вимірюється сила струму. Кількість поділок приладу, що відповідає даній силі струму $n = 20$. Ціна поділки – $C = 0,05$ А/под. Тоді сила струму:

$$I = n \cdot C = 20 \text{ под} \cdot 0,05 \text{ А/под} = 1 \text{ А.}$$

У таблиці, що подається у звіті, значення всіх величин наводяться в одиницях системи SI. При цьому може статися так, що в таблицю треба записувати або дуже великі, або дуже малі числа. У таких випадках треба користуватися записом числа в нормованій формі: $a = 1,23 \cdot 10^{-10}$ (1,23 – мантиса, 10^{-10} – порядок). Мантиса числа повинна містити одну цифру до коми.

Приклади:

- а) сила $F = 1520 \text{ Н} = 1,52 \cdot 10^3 \text{ Н};$
б) питома теплоємність $c = 4190 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$
в) момент інерції $I = 0,00312 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$

У таблиці наводяться значення лише тих величин, що безпосередньо вимірюються на досліді. Символ величини, порядок числа та одиниця вимірювання записуються у верхівці таблиці. Числові значення величин (мантиси) записуються у колонці таблиці. Кількість цифр після коми у кожному стовпчику таблиці повинна бути однаковою. Крім того слід пам'ятати, що остання цифра будь-якого числа вважається не точною. Отже кількість цифр у результаті виміру слід обирати з урахуванням відносної похибки вимірювань.

Приклади:

а) результат окремого виміру $x = 15,25$. Відносна похибка виміру не менше за 5%. Абсолютна похибка виміру: $\sigma_x = 15,25 \cdot 0,05 = 0,76$. Отже результат виміру слід обирати з урахуванням відносної похибки виміру $x = 15,2$;

б) отримані такі середні значення для моменту інерції системи, що відповідають різному розподілу маси системи відносно осі обертання:

$$J_1 = 0,0024 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_2 = 0,0030 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_3 = 0,0068 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_4 = 0,0075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_5 = 0,0120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Можливі два варіанти оформлення цих результатів у вигляді таблиці.

$J, 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
2.4
3.0
6.8
7.5
12.0

a

$J\cdot 10^3, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
2.4
3.0
6.8
7.5
12.0

б

У варіанті *б*) множник 10^3 вказує на те, що в колонку записане число у тисячу разів більше за дійсне. Варіант *a*) більш природний, тому рекомендуємо користуватися саме ним.

5. Розрахунок шуканих величин

Розрахунок шуканих величин проводиться за робочими формулами. При цьому слід додержуватись правил наближених обчислень (див. глава I, розділ 1).

Порядок обчислення абсолютної та відносної похибки для прямих вимірів наведено у главі I, розділ 2.

Покажемо, як обчислюються похибки для величин, які є результатом непрямих вимірів. При непрямих вимірах порядок знаходження похибок досліду такий:

а) користуючись робочою формулою для визначення шуканої величини, а також виразом

$$\varepsilon_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{\partial y}{\partial x_i}}{y} \cdot \sigma_{x_i} \right)^2}, \quad (1.1)$$

одержують формулу для підрахунку відносної похибки досліду;

б) підставляючи у робочу формулу середні значення вимірюваних величин, знаходимо середнє значення шуканої величини $\langle y \rangle$;

в) визначаємо абсолютну похибку шуканої величини:

$$\sigma_y = \varepsilon_y \cdot \langle y \rangle; \quad (1.2)$$

г) кінцевий результат подаємо у вигляді:

$$y = \langle y \rangle \pm \sigma_y. \quad (1.3)$$

Як приклад, розглянемо підрахунок похибок у роботі №1.1.

Робоча формула для визначення моменту інерції системи має вигляд:

$$J = \frac{mg\tau^2 r^2}{2h}. \quad (1.4)$$

У досліді вимірюються величини: h – висота, на яку опускається тягарець, τ – час, за який це відбувається, r – радіус вала, на який намотана нитка.

Отже, ми можемо вважати, що шукана величина J є функцією трьох змінних $J = J(r, \tau, h)$.

Знаходимо частинну похідну $\frac{\partial J}{\partial r}$ (при цьому всі інші величини, що входять у робочу формулу (1.4), вважають сталими):

$$\frac{\partial J}{\partial r} = \frac{mg\tau^2}{2h} \cdot 2r.$$

Знаходимо відношення цієї похідної до самої функції:

$$\frac{\frac{\partial J}{\partial r}}{J} = \frac{2}{r}.$$

Помножуємо одержану величину на стандартну похибку величини R та підносимо одержаний результат до квадрату:

$$\left(\frac{2}{r} \cdot \sigma_r\right)^2 = 4\left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2.$$

Це і буде перший доданок суми у формулі (1.1). Величини у дужках – відносна похибка вимірювання радіуса вала.

Аналогічно знаходимо другий доданок суми для часу τ :

$$\left(\frac{2}{\tau} \cdot \sigma_\tau\right)^2 = 4\left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2.$$

Для визначення третього доданку для висоти h знаходимо похідну:

$$\frac{\partial J}{\partial h} = \frac{mg\tau^2 r^2}{2} \cdot \left(-\frac{1}{h^2}\right).$$

Знаходимо відношення цієї похідної до самої функції:

$$\frac{\partial J}{\partial h} = -\frac{1}{h}.$$

Помножуємо одержану величину на стандартну похибку вимірювання висоти (σ_h) та підносимо до квадрату:

$$\left(-\frac{1}{h} \cdot \sigma_h\right)^2 = \left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2.$$

В результаті таких дій одержуємо формулу для визначення відносної похибки досліду:

$$\varepsilon_y = \sqrt{4\left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2}.$$

Аналізуючи вираз, що знаходиться під радикалом, можна зробити висновок про внесок кожного вимірювання у загальну похибку досліду.

Декілька зауважень щодо визначення похибок досліду.

1. До визначення похибок слід приступати тоді, коли робота виконана, тобто зроблені всі необхідні виміри, оброблені аналітично та графічно, знайдено середнє значення шуканої величини і немає ніяких підстав вважати одержаний результат невірним.

2. Якщо дослід проводиться декілька разів, то для визначення похибок обирається той дослід, у якому абсолютні похибки для вимірюваних величин – найбільші.

3. При визначенні відносної похибки слід її не занижувати, а завишувати, виходячи з тих міркувань, що коли нас задовольнятиме знайдена таким шляхом похибка, то тим більше нас задовольнятиме реальна похибка, яка буде меншою від неї. Звичайно для лабораторних вимірювань відносна похибка досліду не повинна перевищувати 10%.

6. Графіки

Побудова графічної залежності між вимірюваними величинами або між вимірюваними і шуканими величинами є важливою частиною звіту. З одного боку, графіки дозволяють наочно побачити залежність між фізичними величинами. З іншого – вигляд графічної залежності у багатьох випадках дозволяє дійти висновку щодо якості проведеного експерименту.

Перед тим, як побудувати графік, слід визначити, яку величину ми будемо відкладати по осі абсцис і яку по осі ординат. Звичайно по осі абсцис відкладають незалежну змінну (час, температура, відстань, напруга тощо), а по осі ординат величину, яка є функцією незалежної змінної (опір провідника, сила струму, момент інерції тощо).

На другому етапі побудови графіка треба оцінити інтервал, в якому знаходяться значення цих величин.

Є ряд загальних правил, яких потрібно дотримуватися при побудові графіка:

- 1) масштаби для величин, що відкладаються по різних осях незалежні;
- 2) кожна вісь може починатися з нуля, або з будь-якого цілого значення;
- 3) масштаби слід обирати таким чином, щоб крива, що відображає шукану залежність, розташовувалася поблизу бісектриси координатного кута;
- 4) бажано, щоб результати вимірів на графіку були показані з тією ж точністю, з якою вони вимірювалися на досліді;
- 5) графік не повинен мати вигляд ламаної лінії (рис. 4,*а*) бо це означало б, що при зміні однієї величини інша змінюється стрибкоподібно. Більш імовірно, що залежність має бути подібна до тієї, яка показана на рис. 4,*б*;

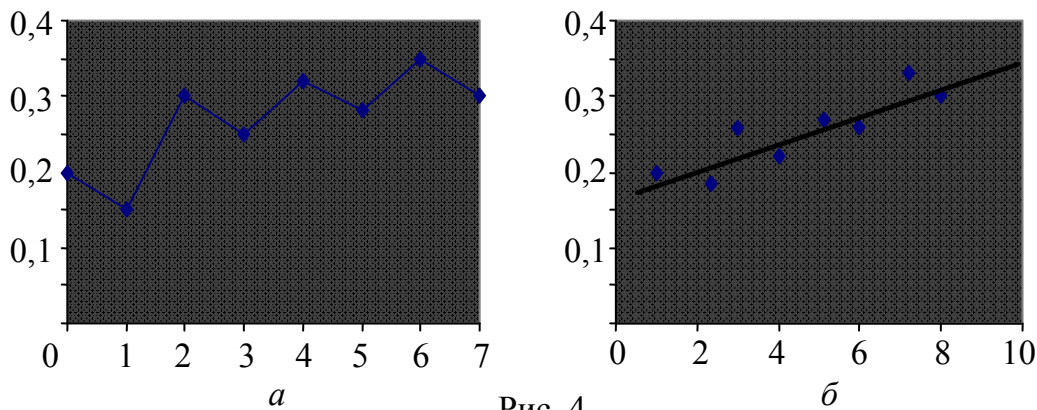


Рис. 4

- б) масштаб по осях треба обирати так, щоб залежність була чіткою (рис.5,*б*). При невдалому виборі масштабів наочність втрачається (рис.5,*а*);

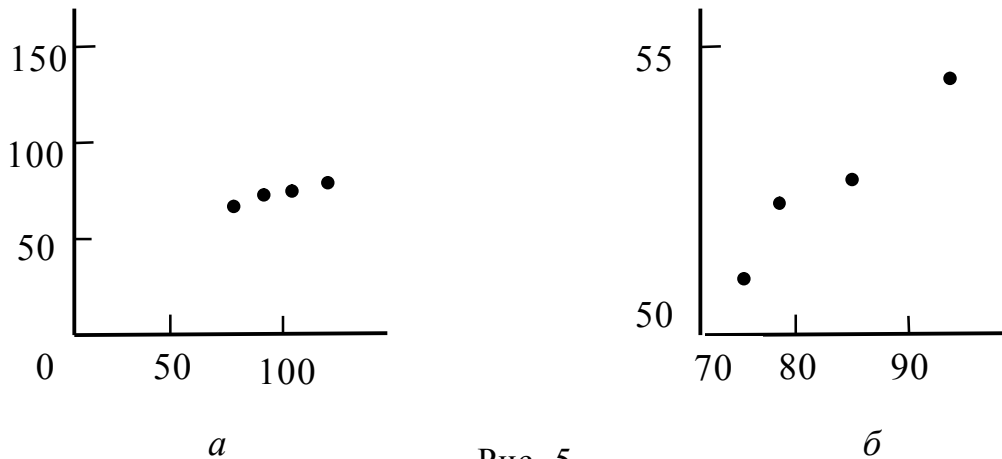
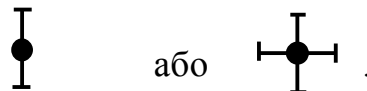


Рис. 5

7) символ величини, множник, що визначає порядок числа та одиниця виміру записуються в кінці координатної осі на вільному від експериментальних точок місці.

У багатьох випадках доводиться зображати залежність, яка має вигляд степеневі або експоненціальної функції: $y=a+bx^2$; $y=a \cdot \exp[bx]$. В першому випадку зручно зображати залежність $y=y(x^2)$, бо графік матиме вигляд прямої лінії. В другому випадку зручно зображати залежність $\ln y=f(x)$. Якщо у таких координатах ми одержимо пряму лінію, то це буде непрямым доказом справедливості експоненціальної залежності “ y ” від “ x ”.

Похибку у експериментальному значенні можна показувати на графіку таким чином:



Довжина горизонтальної риски задає інтервал можливих значень для даного виміру незалежної змінної, а вертикальна – відповідний інтервал для функції.

Якщо біля експериментальної точки ми побудуємо прямокутник із сторонами $2\sigma_x$ та $2\sigma_y$ (рис. 6), то кожна точка площі цього прямокутника буде задавати значення, яке з однаковою ймовірністю належить даній залежності.

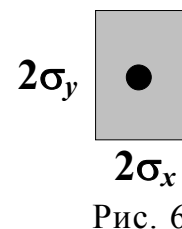


Рис. 6

На рис. 7 зображені приклади обробки тих самих експериментальних точок, але для різних значень абсолютної похибки вимірювань. На рис. 7,а абсолютна похибка досить велика, тому правомірно провести

пряму лінію. У випадку, коли абсолютна похибка мала (рис. 7,б), ми повинні провести плавну криву лінію. Основною вимогою до цих ліній є те, що вони мусять перетинати всі прямокутники, побудовані навколо експериментальних точок.

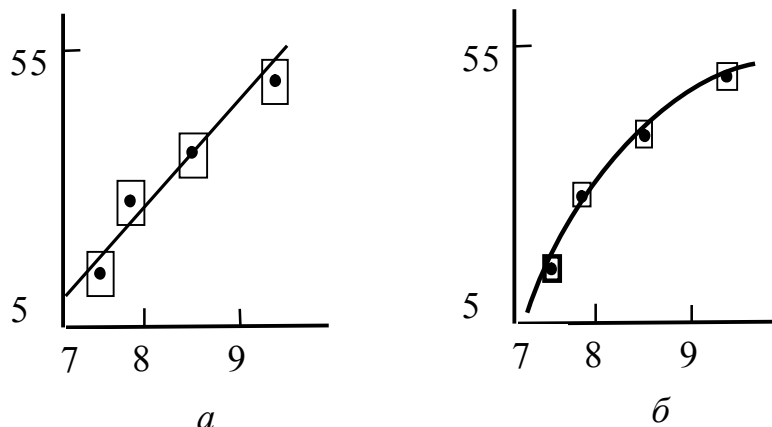


Рис. 7

7. Висновки

Під час виконання лабораторної роботи студент повинен навчитися не тільки виконувати вимірювання і обчислення шуканих величин за робочими формулами, але і осмислювати одержані результати.

Висновки не повинні бути простим констатуванням факту: “Я вивчив такі-то питання”, “Я виміряв таку величину” тощо. Висновки повинні підкреслювати певну фізичну закономірність і ґрунтуватися на тих результатах, які одержані під час виконання роботи. Отже, висновки треба писати тільки тоді, коли в роботі виконується певне дослідження.

Приклад 1. В роботі ставиться задача визначення коефіцієнта в’язкості рідини. Студент одержує певний результат для деякої рідини, наприклад, для гліцерину. Ясно, що після закінчення роботи ніяких висновків зробити неможливо.

Приклад 2. В роботі ставиться задача дослідити залежність коефіцієнта в’язкості рідини від температури. Зробивши низку вимірювань коефіцієнта в’язкості рідини, студент осмислює одержані результати і в короткій формі формулює одержану залежність.

При цьому треба бути дуже обережними. Покажемо це на прикладі.

Деяка фізична залежність описується синусоїдою (рис. 8).

Якщо ми досліджуємо цю залежність в інтервалі $(0...a)$, то можемо зробити висновок, що шукана величина “ y ” зі збільшенням “ x ” монотонно зростає. Досліджуючи цю залежність в інтервалі $(a...b)$ – ми повинні

відмітити монотонне зменшення шуканої величини “ y ” зі зростанням величини “ x ”.

Отже, якщо ми хочемо сформулювати характер деякої фізичної залежності $y=f(x)$, треба максимально конкретизувати величину “ y ” і обов’язково вказувати інтервал, в якому змінювалася величина “ x ”.

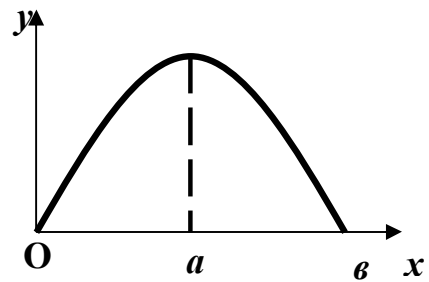


Рис. 8

Розділ 2. ПРАВИЛА НАБЛИЖЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

1. Наближені обчислення. Виконуючи обчислення, слід пам'ятати про ту точність яку треба, або можна одержати. Вкрай неприпустимо вести обчислення з великою точністю, коли дані задачі *не дозволяють або не вимагають* цього.

Числові значення величин, які ми одержуємо в результаті лабораторного експерименту, є наближеними. Навіть значення констант, які ми беремо з таблиць, також наближені. Так, для прискорення вільного падіння ми беремо $g=9,81 \text{ м/с}^2$, для відношення довжини кола до діаметра $\pi=3,14$, для маси електрона $m=9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$. Для більш точних обчислень беруть точніші значення:

$$g = 9,80665 \text{ м/с}^2;$$

$$\pi = 3,1416;$$

$$m = 9,106 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Але і ці значення величин є наближеними або в результаті недостатньої точності вимірювання, або в силу того, що одержані шляхом округлення більш точних значень.

Дуже часто люди, що не мають певного досвіду щодо обчислень, намагаються одержати результат із такою точністю, яка не виправдовується точністю величин, з якими вони проводять обчислення. Це призводить лише до даремних витрат зусиль та часу.

Користування мікрокалькулятором або ПК, коли результат на табло містить від 8 до 16 цифр створює ілюзію великої точності обчислень, але це не так.

2. Похибки. Різниця між точним числом x та його наближеним значенням x_a має назву похибки даного наближеного числа.

Абсолютна похибка $\Delta_a = |x - x_a|$,

відносна похибка $\delta_a = \frac{\Delta_a}{a}$.

3. Значущі цифри. Наближене число звичайно характеризують кількістю значущих цифр. До значущих цифр відносять всі цифри крім нулів з лівого боку. Так, наприклад, числа **253**; **702**; **0,00375** мають по три значущі цифри.

Кажуть, що число a має всі знаки *вірні*, якщо похибка не перевищує половини одиниці розряду останньої цифри наближеного числа. Наближені числа слід записувати так, щоб зберігалися *лише вірні* знаки.

Якщо число a має n вірних значущих цифр, то його відносна похибка може бути знайдена за формулою:

$$\delta_a \leq \frac{1}{Z \cdot 10^{n-1}},$$

де Z – перша значуща цифра числа a .

4. Округлення. При округленні числа зберігаються лише вірні знаки, зайві знаки відкидаються. Якщо відкидається цифра більша від 5, то попередня цифра збільшується на одиницю. У випадку, коли відкидається цифра 5, округлення виконується так: якщо попередня цифра парна, вона залишається сама собою, якщо непарна – збільшується на одиницю.

Приклади: округлення до трьох значущих цифр:

$$4,5237 \approx 4,52;$$

$$2,3152 \approx 2,32;$$

$$3,2453 \approx 3,25.$$

5. Дії над наближеними числами. Результатом дій над наближеним числом є також наближене число. Похибка результату може виражатись через вихідні дані за допомогою таких теорем:

1. Гранична абсолютна похибка алгебричної суми дорівнює сумі граничних абсолютних похибок доданків.
2. Відносна похибка суми обмежена найменшою та найбільшою відносною похибкою доданків.
3. Відносна похибка добутку та частки дорівнює сумі відносних похибок множників, або, відповідно, діленого та дільника.

4. Відносна похибка n -го степеня наближеного числа в n разів більша за відносну похибку основи (як для цілих так і для дробових n).

Користуючись цими теоремами можна визначити похибку результату будь-якої комбінації арифметичних дій над наближеними числами.

6. Обчислення без точного урахування похибок. При масових обчисленнях, коли не враховують похибку кожного окремого результату, користуються *правилами підрахунку цифр*. Додержуючись цих правил можна вважати, що в середньому одержані результати обчислень будуть мати всі знаки вірними.

Правила підрахунку цифр:

6.1. При додаванні та відніманні наближених чисел кінцевий результат округлюють таким чином, щоб у ньому не було значущих цифр у тих розрядах, які відсутні хоча б в одному з доданків.

Наприклад, при додаванні чисел:

$$\begin{array}{r} 4,462 \\ 3,38 \\ + 1,17273 \\ \hline 1,0262 \\ 10,04093 \end{array}$$

Слід округлювати результат до трьох значущих цифр, тобто прийняти його рівним 10,04.

6.2. При добуткові слід округлювати множники так, щоб кожний множник містив стільки значущих цифр, скільки їх є у множнику з найменшою кількістю значущих цифр.

Наприклад, замість виразу

$$3,723 \cdot 2,4 \cdot 5,1846$$

слід обчислювати вираз

$$3,7 \cdot 2,4 \cdot 5,2.$$

В кінцевому результаті необхідно залишати таку саму кількість значущих цифр, яка була у множниках після їх округлення. В проміжних результатах слід залишати на одну значущу цифру більше.

$$3,7 \cdot 2,4 \cdot 5,2 = 8,88 \cdot 5,2 = 46,176 \approx 46,2.$$

Такого самого правила слід дотримуватися і при діленні.

6.3. При піднесенні до квадрата чи куба слід у степені брати стільки значущих цифр, скільки їх має основа.

Наприклад: $1,32^2 \approx 1,74$.

6.4. При добуванні квадратного чи кубічного кореня в результаті слід брати стільки значущих цифр, скільки їх має число, що стоїть під коренем.

Наприклад: $\sqrt{1,17 \cdot 10^{-8}} \approx 1,08 \cdot 10^{-4}$.

6.5. При обчисленні складних виразів слід дотримуватися вказаних вище правил відповідно до виду виконуваних дій.

Наприклад: Виконати обчислення: $\frac{(3,2 + 17,062) \cdot \sqrt{3,7}}{5,1 \cdot 2,007 \cdot 10^3}$.

Множник 5.1 має найменшу кількість значущих цифр – дві. Тому результати всіх проміжних дій треба округлювати до трьох значущих цифр:

$$\frac{(3,2 + 17,062) \cdot \sqrt{3,7}}{5,1 \cdot 2,007 \cdot 10^3} \approx \frac{20,3 \cdot 1,92}{10,3 \cdot 10^3} \approx 3,79 \cdot 10^{-3}.$$

Після округлення результату до двох значущих цифр, одержуємо $3,8 \cdot 10^{-3}$.

7. Формули для наближених обчислень.

7.1. Якщо $a \ll 1$, то в першому наближенні можна приймати:

1. $\frac{1}{1 \pm a} = 1 \pm a;$

6. $\sqrt{1 - a^2} = 1 - \frac{1}{2}a^2;$

2. $(1 \pm a)^2 = 1 \pm 2a;$

7. $\frac{1}{1 - a^2} = 1 + a^2;$

3. $(1 \pm a)^3 = 1 \pm 3a;$

8. $e^a = 1 + a;$

4. $\sqrt{1 \pm a} = 1 \pm \frac{1}{2}a;$

9. $\ln(1 + a) = a;$

5. $\sqrt[3]{1 \pm a} = 1 \mp \frac{1}{3}a;$

10. $\ln \frac{1+a}{1-a} = 2a.$

7.2. Якщо a та b мало відрізняються одне від одного, то в першому наближенні можна прийняти:

$$\sqrt{a \cdot b} = \frac{1}{2}(a + b).$$

7.3. Якщо кут $\alpha < 5^\circ$ і виражений у радіанах, то у першому наближенні можна приймати: $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$; $\cos \alpha = 1$.

Розділ 3. ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК ФІЗИЧНИХ ВИМІРІВ

Вимірювання фізичних величин (прямі та непрямі) повинні закінчуватись не тільки визначенням їх числового значення, але й оцінкою похибок вимірювань.

Похибка (помилка) виміру – кількісна міра його якості. Похибки вимірювань діляться на систематичні та випадкові.

Систематичні похибки зумовлюються недосконалістю вимірювальних приладів, їх несправністю або неправильним користуванням ними. Систематичні похибки можна виявити і виключити або звести до мінімуму.

Випадкові похибки зумовлюються неконтрольованими обставинами. Вони виникають внаслідок недосконалості наших органів чуття, впливу навколишнього середовища та інших причин. Виключити ці похибки неможливо, тому після будь-якого вимірювання отримані наближені значення дещо відрізняються від дійсного значення вимірюваної величини.

Випадкові похибки підкоряються статистичним закономірностям і описуються теорією ймовірностей.

Для оцінки похибки виміру і знаходження дійсного значення величини, вимірювання виконуються n разів. Середньоарифметичне значення $\langle x \rangle$ ближче до дійсного значення x , ніж результат окремого виміру:

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (3.1)$$

Абсолютна похибка окремого виміру:

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle. \quad (3.2)$$

Відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle},$$

або у відсотках

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

Характеристикою точності виміру є середньоквадратична похибка S_n , яка для даного середньоарифметичного $\langle x \rangle$ визначається так:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}}. \quad (3.4)$$

Стандартною похибкою називають $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$. Якщо великі n , то $\sigma \approx S_n$. Для даного значення похибки вказують коефіцієнт надійності. Коефіцієнт надійності α (довірча ймовірність) – це ймовірність того, що справжня похибка за абсолютною величиною менша або дорівнює Δx . Інтервал значень ($\langle x \rangle \pm \Delta x$) називають довірчим інтервалом вимірюваної величини.

У теорії ймовірностей доводять, що для середньоквадратичної (стандартної) похибки $\alpha=0,68$. Це означає, що із 100 вимірів 68 матимуть похибки в інтервалі ($\langle x \rangle \pm \Delta x$).

Щоб збільшити надійність, треба вибрати більший довірчий інтервал. Беручи до уваги той факт, що на практиці кількість вимірів не перевищує $n=3\dots 5$, результат обчислювань за формулою (3.4) буде значно відрізнятись від стандартної похибки. За допомогою множників $t_{\alpha,n}$ (коефіцієнти Стюдента), наведених у табл.1, можна обчислити стандартну похибку S , що відповідає даному коефіцієнту надійності, а для відомого числа вимірів n :

$$\sigma_{\bar{x}} = t_{\alpha,n} S_n. \quad (3.5)$$

Наприклад, для $n=3$ та $\alpha=0,68$ коефіцієнт Стюдента $t_{\alpha,n}=1,26$.

Під час прямих вимірювань величин поряд з випадковими похибками зустрічаються і систематичні, що виникають внаслідок обмеженої точності вимірювальних приладів. Останні не можуть бути виключеними й мають враховуватись разом з випадковими похибками.

Таблиця 1

α	n							
	2	3	4	5	7	10	20	40
	$t_{\alpha,n}$							
0,68	1,9	1,26	1,20	1,14	1,08	1,05	1,03	1,01
0,95	12,7	4,30	3,13	2,78	2,45	2,26	2,09	2,02

Вважають, що середньоквадратична (стандартна) похибка дорівнює 1/3 максимальної абсолютної похибки приладу. Наприклад, при вимірюванні проміжку часу за допомогою секундоміра з ціною поділки 0,1 с:

$$\Delta\tau = \sigma_{\tau} = \frac{0,1}{3} = 0,03 \text{ с}.$$

Розглянемо порядок підрахунку похибок для непрямих вимірювань величини y . Нехай $y=f(x_1, x_2 \dots x_n)$. Середньоквадратична похибка виміру величини y :

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)^2 \sigma_{x_j}^2}. \quad (3.6)$$

Отже, для знаходження стандартної помилки величини y треба знайти частинні похідні, розглядаючи робочу формулу як функціональну залежність y від безпосередньо вимірювальних величин x_j .

У більшості випадків можна уникнути знаходження частинних похідних, якщо скористатися готовими формулами для підрахунку S_y при непрямих вимірах деяких типів закономірностей (див. табл. 2).

Можна запропонувати такий порядок визначення похибок для непрямих вимірювань:

1. Взяти робочу формулу для підрахунку шуканої величини y .
2. Одержати формулу для підрахунку стандартної похибки S_y відповідно до формули (3.6) або скористатись таблицею 2.
3. Виконати прямі вимірювання усіх величин, що входять до робочої формули, не менше як N раз. Виняток становлять величини, які неможливо виміряти більше одного разу (наприклад, вимірювання часу тривалості якогось процесу).
4. Обчислити середнє значення вимірних величин $\langle x \rangle$, а також середнє відхилення $\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$.
5. Обчислити середньоквадратичні похибки прямих вимірів за формулою (3.4).
6. Привести знайдену похибку до стандартної. Для цього за табл.1 знайти коефіцієнт Стьюдента, що відповідає кількості вимірів та довірчій імовірності $\alpha = 0,68$. Стандартна похибка $\sigma_{\bar{x}} = t_{\alpha,n} S_n$. Якщо похибка приладу виявиться більшою за S_n , то вважають, що стандартна похибка дорівнює 1/3 похибки приладу.
7. Обчислити відносну стандартну похибку непрямого виміру:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_y}{\langle y \rangle},$$

для цього використати середні значення вимірних величин $\langle y \rangle$ та їх стандартні похибки σ_y .

8. При обчисленні відносної похибки ε додаються квадрати відносних похибок прямих вимірів. Внаслідок піднесення до квадрату деякі похибки, може статись, будуть дуже малими порівняно з іншими. Завжди можна відкинути похибку меншу від 1/3 найбільшої похибки у даній сумі (тобто меншу 10% при порівнянні їх квадратів). Якщо таких похибок декілька, їх відкидати не можна, бо в сумі вони можуть складати величину того самого порядку, що й найбільша похибка.

9. Визначити число значущих чисел, котрі треба зберегти, записуючи кінцевий результат. Похибку обчислюють з точністю до 10%.

10. Обчислити середнє значення вимірюваної величини $\langle y \rangle$, підставляючи в робочу формулу середні значення результатів прямих вимірів $\langle x \rangle$.

11. Обчислити абсолютну похибку величини $\langle y \rangle$: $S_y = \langle y \rangle \cdot \varepsilon$.

12. Записати кінцевий результат у вигляді $y = \langle y \rangle \pm S_{\langle y \rangle}$ при $\alpha=0,68$, або $y = \langle y \rangle \pm 2S_{\langle y \rangle}$ при $\alpha=0,95$.

Таблиця 2

Тип залежності	Формула для обчислення стандартної похибки
$\left. \begin{array}{l} y = x_1 + x_2 \\ y = x_1 - x_2 \end{array} \right\}$	$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$
$\left. \begin{array}{l} y = x_1 x_2 \\ y = \frac{x_1}{x_2} \end{array} \right\}$	$\varepsilon = \frac{\sigma_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x_1}}{\langle x_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{x_2}}{\langle x_2 \rangle}\right)^2}$
$y = x^n$	$\varepsilon = \frac{\sigma_y}{y} = n \frac{\sigma_x}{\langle x \rangle}$
$y = e^x$	$\varepsilon = \frac{\sigma_y}{y} = \sigma_x$
$y = \ln x$	$\sigma_y = \frac{\sigma_x}{\langle x \rangle}$

Прийняті позначення та найважливіші формули

1. $\langle x \rangle$ – середньоарифметичне: $\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$.
2. Δx_i – абсолютна похибка: $\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$.
3. $\langle \Delta x \rangle$ – середня абсолютна похибка: $\langle \Delta x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}$.
4. ε – відносна похибка: $\varepsilon = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle}$.
5. S_n – середньоквадратична похибка середнього арифметичного:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}}.$$

6. σ – стандартна похибка: $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$.
7. α – довірна ймовірність (коефіцієнт надійності).
8. $t_{\alpha, n}$ – коефіцієнт Стюдента.

Формула для знаходження стандартної похибки при незначній кількості вимірів:

$$\sigma_{\bar{x}} = t_{\alpha, n} S_n = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}}.$$

Формула знаходження стандартної похибки при непрямих вимірах:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)^2 \sigma_{x_j}^2}.$$

Глава II. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Модуль 1. МЕХАНІКА

Лабораторна робота № 1.1. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ ВІД РОЗПОДІЛУ ЇЇ МАСИ ВІДНОСНО ОСІ ОБЕРТАННЯ

Мета роботи: вивчити основний закон динаміки обертального руху; встановити залежність моменту інерції системи від рівномірного розподілу її маси відносно осі обертання; ознайомитись з методом екстраполяції.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: обертальний рух абсолютно твердого тіла; кутова швидкість та кутове прискорення, їх зв'язок з лінійною швидкістю та лінійним прискоренням; момент сили; момент інерції та закон динаміки обертального руху абсолютно твердого тіла відносно нерухомої осі.

[1, т.1 §§ 1.2–1.5, 2.2–2.5, 2.9, 4.1–4.3; 2, §§ 1–7, 16, 18; 3, §§ 1.1–1.4, 2.2, 2.5, 2.7, 2.16; 4, т.1 §§ 1, 3, 4, 7–9, 11, 13, 29, 39; 6, §§ 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.3; 7,]

В даній лабораторній роботі застосовують непрямий метод визначення моменту інерції системи, що ґрунтується на законі динаміки обертального руху:

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{M}}{J} \quad (1.1.1)$$

де β – кутове прискорення системи; M – момент сили; J – момент інерції.

Момент інерції абсолютно твердого тіла відносно нерухомої осі є скалярною фізичною величиною, яка дорівнює алгебраїчній сумі добутків мас m_i всіх його елементарних точок на квадрат їхніх найкоротших відстаней до осі обертання r_i та є величиною адитивною:

$$J = \sum_{i=1}^N J_i = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2. \quad (1.1.2)$$

Робота виконується на установці (рис. 1.1.1), що складається із хрестовини, жорстко зв'язаної з нерухомим блоком радіуса r . На хрестовині можуть закріплюватись на різних відстанях R від осі обертання тягарця m_1 . На блок намотується нитка, один кінець якої закріпленій на блоці, а до іншого прив'язано вантаж масою m . Коли описаній системі тіл надати свободу, вантаж m почне опускатися, а блок з хрестовиною і тягарцями – обертатися навколо нерухомої осі. На вантаж діють сила тяжіння $m\vec{g}$ і сила натягу нитки \vec{F} . Під дією цих сил вантаж рухатиметься зі сталим прискоренням. Обертання блока, якщо знехтувати тертям на осі, викликає момент сили F' , модуль якої за третім законом Ньютона дорівнює модулю сили F . Плечем сили F' буде радіус блока r , тому момент сили:

$$M = F'r. \quad (1.1.3)$$

Для визначення сили $F'=F$ записують динамічне рівняння руху вантажу m . Використовуючи зв'язок кутового прискорення β з лінійним прискоренням a і, виражаючи останнє через висоту h і час опускання вантажу τ , з (1.1.1) із урахуванням (1.1.3) можна одержати формулу для визначення моменту інерції системи тіл, що обертається:

$$J = m \left(\frac{g\tau^2}{2h} - 1 \right) r^2. \quad (1.1.4)$$

Оскільки величина $\frac{g\tau^2}{2h} \gg 1$ (у чому можна переконатися безпосередніми підрахунками), то формула (1.1.4) набуває більш простого вигляду:

$$J \approx \frac{mgr^2}{2h} \cdot \langle \tau^2 \rangle. \quad (1.1.5)$$

Момент інерції системи J складається з моменту інерції блока з хрестовиною J_0 і моменту інерції J' тягарців m_1 , закріплених на хресто-

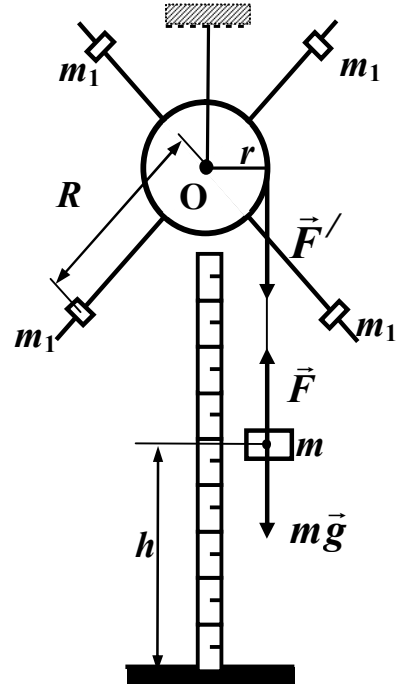


Рис. 1.1.1

вині. Якщо вважати тягарці точковими масами, у випадку симетричного їх розташування відносно осі обертання можна записати:

$$J = J_0 + 4m_1R^2, \quad (1.1.6)$$

де R – відстань тягарців від осі обертання.

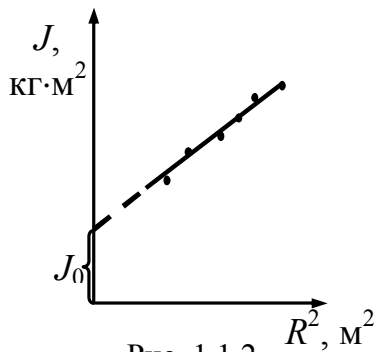


Рис. 1.1.2

З (1.1.6) випливає лінійна залежність між J та R^2 . Визначивши момент інерції системи для різних значень R , можна побудувати графік залежності $J = f(R^2)$ та методом екстраполяції отримати значення моменту інерції блока з хрестовиною J_0 . Приклад побудови такої залежності наведено на рис. 1.1.2.

Екстраполяція, екстраполювання (від лат. extra і polio – пригладжую, виправляю, змінюю) – особливий тип апроксимації, при якому функція апроксимується поза заданого інтервалу, а не між заданими значеннями. Тобто екстраполяція – наближене визначення значень функції $f(x)$ в точках x , що лежать поза відрізка $[x_0, x_n]$, за її значенням в точках $x_0 < x_1 < \dots < x_n$. У статистиці екстраполяція – поширення встановлених у минулому тенденцій на майбутній період (екстраполяція у часі застосовується для перспективних розрахунків населення); поширення вибірових даних на іншу частину сукупності, не піддану спостереженню (екстраполяція в просторі).

Для більш точного вимірювання часу опускання вантажу, в установці використовується електронний секундомір, який фіксує тривалість руху.

Хід роботи

1. Встановити тягарці m_1 на максимальній і однаковій відстані R від осі обертання.
2. Намотуючи нитку на блок, підняти вантаж m на висоту h і зупинити, зафіксувавши хрестовину.
3. Відпустити хрестовину і виміряти час τ опускання вантажу. Дослід повторити тричі і знайти середнє значення часу опускання вантажу m .
4. Розрахувати значення моменту інерції J , підставляючи у формулу (1.1.5) середнє значення часу.
5. Проробити пп. 1-4 для кількох різних положень тягарців відносно осі обертання. Результати вимірів і обчислень записати до таблиці 1.1.1.

6. Побудувати графік залежності J від R^2 (рис. 1.1.2) і методом екстраполяції визначити J_0 .
7. Визначити похибки вимірювання J .
8. Визначити масу тягарця m_1 , який закріплений на хрестовині.
9. Обчислити за формулою (1.1.6) моменти інерції J , скориставшись знайденими за графіком значеннями J_0 , величиною m_1 та вимірними значеннями відстані R .
10. Одержані за формулою (1.1.6) значення моментів інерції J нанести на графік залежності J від R^2 .

Таблиця 1.1.1.

№ пор	R , м	r , м	m , кг	h , м	τ , с	$\langle \tau \rangle$, с	J , кг·м ²	R^2 , м	J_0 , кг·м ²

Контрольні запитання

1. Дати означення: механічного руху; поступального і обертального рухів.
2. Яке тіло називають абсолютно твердим?
3. Дати означення таким фізичним величинам: переміщення, шлях, швидкість, прискорення.
4. Дати означення таким фізичним величинам: кутова швидкість, кутове прискорення. Вкажіть напрям цих векторів.
5. Запишіть формули зв'язку між лінійними та кутовими величинами при русі по колу.
6. Дати означення нормального і тангенціального прискорень.
7. Сформулюйте закони Ньютона.
8. Запишіть основний закон динаміки обертального руху.
9. Дайте означення моменту сили відносно нерухомої точки O . Як визначається напрямок цього моменту сили?
10. Дайте означення моменту сили відносно нерухомої осі Oz .
11. Що називають моментом інерції точки (тіла або системи точок) відносно осі обертання?
12. Виведіть робочу формулу для розрахунку моменту інерції (1.1.5).
13. Сформулюйте теорему Штейнера.

Лабораторна робота № 1.2. ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Мета роботи: ознайомитись із суттю явища внутрішнього тертя в газах та рідинах; експериментально визначити коефіцієнт динамічної в'язкості певної рідини.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: явища переносу; внутрішнє тертя; рух тіл у рідинах та газах.

[1, т.1 §§ 15.2, 19.2; 2, §§ 31–33, 48; 3, вступ до розділу 5, §§ 3.3, 5.6; 4, т.1 §§ 19, 58–60, 112; 6, §§ 2.6.3; 3.6.5

В'язкість (внутрішнє тертя) – це властивість реальних рідин та газів чинити опір переміщенню однієї частини рідини (газу) відносно іншої. При переміщенні одних прошарків реальної рідини (газу) відносно інших (рис. 1.2.1) виникають сили внутрішнього тертя, які мають напрямок вздовж дотичної до поверхні прошарків. Наряду з *дифузією* та *теплопровідністю* (див. лаб роб. 2.2) в'язкість відносять до *явищ переносу*, які детально вивчаються в молекулярній фізиці.

За фізичною суттю в'язкість обумовлена *переносом імпульсу* ($m\vec{v}$) напрямленого руху від одного прошарку рідини до іншого. В газах

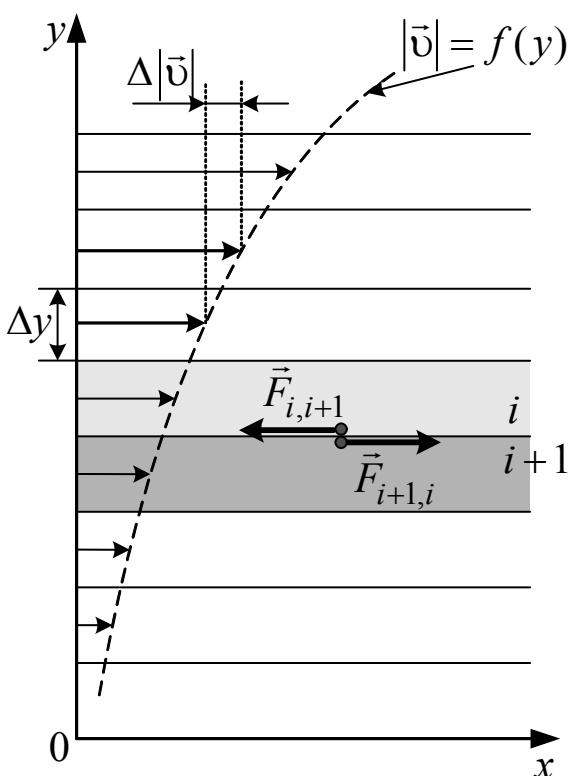


Рис. 1.2.1

це явище обумовлене виключно обміном молекул на межі двох прошарків (тобто, власне дифузією), в той час як в рідинах до подібного механізму обміну імпульсом додається ще й обмін імпульсом за рахунок безпосередньої взаємодії молекул (див. лаб. роб. 2.4) на межі двох сусідніх прошарків. Відмінність в механізмах переносу проявляє себе різною залежністю в'язкого тертя від температури. В газах з ростом температури в'язкість завжди зростає, а в рідинах, найчастіше, вона спочатку спадає, як і поверх-

невий натяг (зменшується міжмолекулярна взаємодія, див. лаб. роб. 2.1), а потім зростає за рахунок дифузійного механізму.

В механіці сила внутрішнього тертя описується *законом Ньютона* для в'язких рідин, який має вигляд:

$$F = \eta \frac{dv}{dy} S,$$

де F – сила внутрішнього тертя; $\frac{dv}{dy}$ – *градієнт швидкості*, який показує

зміну величини напрямленої швидкості потоку на одиницю довжини при переході від прошарку до прошарку у напрямку осі Oy , перпендикулярному до напрямку руху рідини (газу) (рис. 1.2.1); S – площа поверхні прошарків; η – коефіцієнт пропорційності, який має назву *динамічної в'язкості* рідини (газу) та залежить від природи рідини (газу) та температури.

З рівняння Ньютона може бути визначена динамічна в'язкість рідини (газу):

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{dv}{dy} \right| S}.$$

Динамічна в'язкість η чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє на одиницю площі паралельно до шарів при градієнті швидкості, рівному одиниці. Одиниця вимірювання в'язкості в СІ – [Па·с].

У зв'язку з тим, що пряме визначення градієнта швидкості викликає певні труднощі, в даній роботі використовується *метод Стокса*. Цей метод полягає у вимірюванні швидкості невеликих тіл сферичної форми, які повільно та рівномірно рухаються у рідині або газі.

На тіло, що падає в рідині (у даному випадку – металеву кульку), діють:

$$\begin{cases} \text{сила тяжіння} & mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \\ \text{сила Архімеда} & F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p g \\ \text{сила опору Стокса} & F_C = 6\pi\eta r v \end{cases} \quad (1.2.1)$$

Вираз для сили опору було виведено англійським фізиком та математиком Дж. Стоксом для рівномірного руху кульки в необмеженій рідині при малих значеннях критерію Рейнольдса $Re < 1$ (рис. 1.2.2.). Тобто, обтікання кульки рідиною відбувається за умов ламінарної течії.

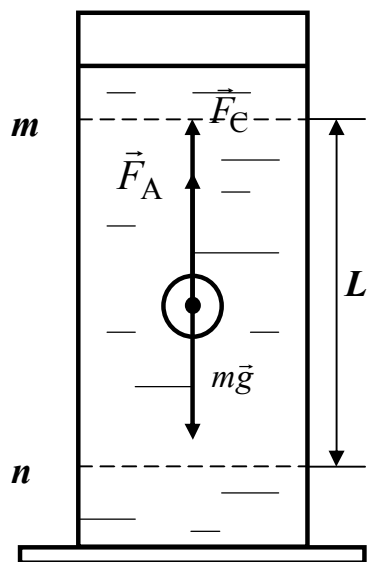


Рис.1.2.2.

Сила Стокса $F_C = 6\pi\eta r v$ виникає тому, що під час руху кульки в рідині має місце тертя між окремими прошарками рідини. Так, найближчий до поверхні кульки прошарок рідини матиме швидкість кульки, бо рідина немовби налипає на неї. Інші прошарки матимуть тим меншу швидкість, чим далі знаходяться від кульки.

Внаслідок зростання швидкості падіння кульки сила опору також зростатиме (див. формулу сили Стокса). Тоді настане такий момент, коли сила $m\vec{g}$ зрівноважиться силами F_C

та F_A , після чого кулька почне рухатись рівномірно:

$$mg - F_A - F_C = 0 \quad \Rightarrow \quad mg = F_A + F_C. \quad (1.2.2)$$

З системи рівнянь (1.2.1) та рівняння (1.2.2) можна одержати робочу формулу:

$$\eta = \frac{g(\rho - \rho_p)}{18L} \cdot \langle d \rangle^2 \cdot \tau, \quad (1.2.3)$$

де g – прискорення вільного падіння; d – діаметр кульки; ρ – густина матеріалу, з якого зроблена кулька; ρ_p – густина досліджуваної рідини; L – шлях, що проходить кулька за час τ .

Коефіцієнт динамічної в'язкості η рідини пов'язаний з коефіцієнтом кінематичної в'язкості ν співвідношенням:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_p}, \quad (1.2.4)$$

де ρ_p – густина рідини.

В технології багатьох виробництв (наприклад, при формуванні будівельних матеріалів чи підготовці будівельних розчинів) коефіцієнт

в'язкості є важливою технологічною характеристикою, а тому існує багато способів його визначення (наприклад, *віскозиметрія*).

Найпростіший прилад для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості приведено на рис. 1.2.2. Він складається з скляного циліндра, заповненого досліджуваною рідиною. На бічній поверхні циліндра є дві позначки m та n , розташовані на відстані L одна від одної. Позначка m знаходиться трохи нижче від поверхні рідини. Її положення обирається так, щоб рух кульки між позначками можна було вважати рівномірним.

Хід роботи

1. За допомогою масштабної лінійки тричі виміряти відстань між позначками m та n і знайти середнє значення $\langle L \rangle$. Результати цього та наступних вимірювань занести до таблиці 1.2.1.
2. За допомогою мікрометра тричі виміряти діаметр d кульки (після кожного виміру кульку слід виймати з мікрометра та вкладати в іншому положенні).
3. Розрахувати середнє значення $\langle d \rangle$.
4. Розташувати кульку на незначній висоті над поверхнею рідини у центральній частині циліндричної посудини і, відпустивши її, виміряти час, за який вона пройде відстань між позначками m та n .
5. За формулою (1.2.3) визначити коефіцієнт динамічної в'язкості рідини η .
6. Виконати пп. 2 -4 ще для двох кульок.
7. Розрахувати кінематичну в'язкість ν досліджуваної рідини за формулою (1.2.4).
8. Визначити похибки вимірювання коефіцієнта динамічної в'язкості рідини η (див. глава I, розділ 3).

Таблиця 1.2.1

$L, \text{ м}$	Дослід з 1-ю кулькою			Дослід з 2-ю кулькою			Дослід з 3-ю кулькою		
	$d, \text{ м}$	$\langle d \rangle, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$d, \text{ м}$	$\langle d \rangle, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$d, \text{ м}$	$\langle d \rangle, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$

Контрольні запитання

1. Які Ви знаєте явища переносу?
2. Дайте означення в'язкості (внутрішнього тертя).
3. Поясніть фізику виникнення внутрішнього тертя.
4. Запишіть закон Ньютона для сили внутрішнього тертя.
5. Дайте означення коефіцієнта динамічної в'язкості. Яку розмірність він має?
6. Дайте означення коефіцієнта кінематичної в'язкості. Який зв'язок між коефіцієнтами кінематичної і динамічної в'язкості?
7. Що називають градієнтом швидкості?
8. Дайте означення ламінарної і турбулентної течії.
9. Що визначає критерій Рейнольдса?
10. У чому полягає метод Стокса? Виведіть робочу формулу.
11. Поясніть практичне значення коефіцієнта в'язкості в будівельних га-лузях.

Лабораторна робота № 1.3. ВИВЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУХУ МАЯТНИКА МАКСВЕЛА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ

Мета роботи: вивчити закономірностей складних рухів абсолютно твердих тіл та законів, що його описують: закони динаміки поступального та обертального руху, закону збереження механічної енергії; визначити на їх основі момент інерції тіла.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: кінетична та потенціальна енергії, закон збереження енергії, центр мас, закон руху центра мас, обертання твердого тіла, момент сили, основне рівняння динаміки обертального руху, момент інерції, плоский рух абсолютно твердого тіла.

[1, т.1 §§3.2, 3.3, 4.2, 4.3, 4.4, 2, §§ 12, 13, 16, 17, 18; 6, §§ 2.2.3, 2.3.3, 2.5.1, 2.5.2, 2.5.3;]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 1.1.

Маятник Максвелла (рис. 1.3.1) – це диск (1) з кільцем (2), насаджений на стрижень (3), на який намотані нитки (4). Диск маятника являє собою безпосередньо сам диск і змінні кільця, які закріплюються на ньому. Маятник в зафіксованому верхньому положенні має *потенціальну енергію*:

$$W_{\text{п}} = mgh \quad (1.3.1)$$

Оскільки потенціальна енергія визначається з точністю до адитивної константи, то за її нульовий рівень вибране положення, при якому маятник знаходиться в нижньому положенні (в положенні, при якому нитки повністю розмотані).

При звільненні маятника диск починає рухатись. Рух маятника це складний рух, який є суперпозицією поступального руху центра мас та

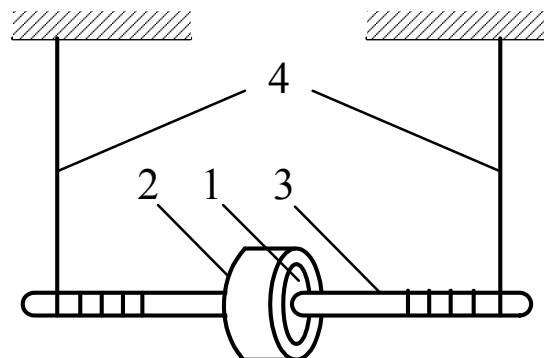


Рис. 1.3.1

обертального руху навколо осі, яка проходить через центр мас і перпендикулярна до площини, в якій він рухається. Такий рух називається плоским рухом.

Потенціальна енергія маятника при його русі перетворюється на суму кінетичної енергії його поступального руху та кінетичної енергії обертального руху в деякій точці траєкторії:

$$W_{\text{Кпост}} + W_{\text{Коб}} = \frac{m v_C^2}{2} + \frac{J \omega^2}{2}, \quad (1.3.2)$$

де v_C – швидкість руху центра мас маятника, ω – кутова швидкість його обертання, m – маса маятника, J – момент інерції маятника відносно осі, яка проходить через його центр мас (про визначення моменту інерції дивись лабораторну роботу 1.1).

Якщо тертям знехтувати, то згідно закону збереження енергії, потенціальна енергія, яку маятник мав у найвищій точці відносно нульового рівня, перетворилась на кінетичну енергію в найнижчій точці:

$$mgh = \frac{m v_C^2}{2} + \frac{J \omega^2}{2}. \quad (1.3.3)$$

Після потрапляння маятника у найнижчу точку (коли нитки розмотані) завдяки інерції відбувається намотування ниток на стрижень, що призводить до подальшого підйому маятника вгору. При підйомі рух маятника вповільнюється, маятник зупиняється, а потім знову починає свій рух вниз. Такий процес відбувається з деякою періодичністю, завдяки чому це тіло і називається, власне, маятником.

Прискорення поступального руху центра мас маятника a_C може бути визначене за допомогою формул кінематики, тобто для його розрахунку достатньо виміряти час τ , за який маятник проходить відстань h :

$$a_C = \frac{2h}{\tau^2}. \quad (1.3.4)$$

Знаючи лінійне прискорення центра мас a_C та його кутове прискорення β , яке визначається із формул зв'язку кутових та лінійних величин як:

$$\beta = \frac{a_C}{r}, \quad (1.3.5)$$

де r – радіус осі маятника, можна знайти кутову швидкість його обертання ω в найнижчій точці згідно кінематичних рівнянь як:

$$\omega = \beta \cdot \tau, \quad (1.3.6)$$

та швидкість центра мас маятника в цій точці:

$$v_C = a_C \cdot \tau. \quad (1.3.7)$$

Підставимо формули (1.3.4) – (1.3.7) в формулу (1.3.3), та виразимо з останньої величину моменту інерції:

$$J = mr^2 \left(\frac{g\tau^2}{2h} - 1 \right).$$

Аналогічна формула отримана на основі законів динаміки поступального та обертального рухів в лабораторній роботі 1.1.

Враховуючи, що радіус осі $r = d/2$ (d – діаметр осі), а маса маятника m є сумою мас його частин $m = m_0 + m_d + m_k$ (де m_0 – маса осі, m_d – маса диска і m_k – маса кільця), маємо:

$$J = \frac{1}{4} md^2 \left(\frac{g\tau^2}{2h} - 1 \right).$$

Оскільки величина $\frac{g\tau^2}{2h} \gg 1$, то остаточно отримаємо:

$$J = \frac{md^2 g\tau^2}{8h} \quad (1.3.8)$$

З іншого боку, формулу для визначення моменту інерції маятника Максвелла можна також отримати за допомогою законів динаміки поступального та обертального рухів, оскільки маятник здійснює плоский рух, який є суперпозицією поступального і обертального рухів.

Момент інерції маятника Максвелла, як симетричного тіла, можна також обчислити, знаючи його геометричні розміри за формулою:

$$J_t = J_0 + J_d + J_k, \quad (1.3.9)$$

де J_0, J_d, J_k – відповідно моменти інерції осі, диска й кільця маятника.

Момент інерції осі J_0 маятника дорівнює:

$$J_0 = \frac{m_0 r^2}{2} = \frac{m_0 d^2}{8}. \quad (1.3.10)$$

Момент інерції диска $J_{\text{д}}$ може бути знайдений як:

$$J_{\text{д}} = \frac{m_{\text{д}} R_{\text{д}}^2}{2} = \frac{m_{\text{д}} D_{\text{д}}^2}{8}, \quad (1.3.11)$$

де $R_{\text{д}}$ – радіус диска; $D_{\text{д}}$ – діаметр диска.

Момент інерції кільця $J_{\text{к}}$ розраховується за формулою:

$$J_{\text{к}} = m_{\text{к}} \left(\frac{D_{\text{к}}^2 + D_{\text{д}}^2}{8} \right), \quad (1.3.12)$$

де $D_{\text{к}}$ – зовнішній діаметр кільця.

Підставляючи (1.3.10) – (1.3.12) в (1.3.9), остаточно маємо:

$$J_t = \frac{1}{8} \left(m_0 d^2 + m_{\text{д}} D_{\text{д}}^2 + m_{\text{к}} (D_{\text{к}}^2 + D_{\text{д}}^2) \right) \quad (1.3.13)$$

Загальний вигляд установки показано на рис. 1.3.2. Підставка (1) оснащена регульованими ніжками (2), які дозволяють вирівняти прилад.

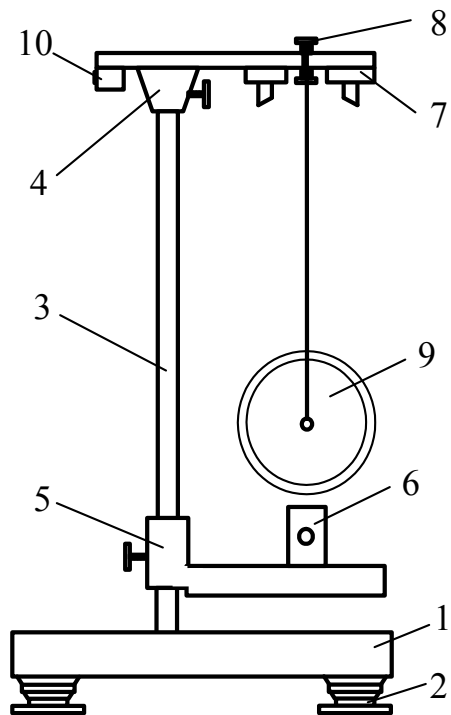


Рис. 1.3.2

На підставці закріплена стійка (3) до якої прикріплено нерухомий верхній кронштейн (4) і рухомий нижній кронштейн (5) із фотоелектричним датчиком (6). На верхньому кронштейні знаходиться електромагніт (7) і воротки (8) для закріплення й регулювання довжини біфілярної підвіски маятника (9). Маятник з накладеним кільцем утримується у верхньому положенні електромагнітом. Довжина маятника визначається за допомогою лінійки. Для вимірювання часу опускання маятника, на підставці (10) закріплено секундомір, який автоматично вмикається при вимиканні електромагніту.

Хід роботи

1. За допомогою штангенциркуля виміряти діаметр осі маятника d , диска $D_{\text{д}}$ і зовнішній діаметр кільця $D_{\text{к}}$. Результати вимірювань занести до таблиці 1.3.1.

2. Занести значення мас осі m_0 , диска m_d та кільця m_k , які вказані на відповідних частинах маятника до таблиці 1.3.1.

3. Розрахувати момент інерції маятника за формулою (1.3.13). Результат записати до таблиці 1.3.1.

Таблиця 1.3.1

m_0 , кг	m_d , кг	m_k , кг	J_t , кг·м ²
d , м	D_d , м	D_k , м	

4. Увімкнути прилад в мережу.

5. Встановити нульові покази секундоміра, натиснувши кнопку «S».

6. Перевірити стійкість приладу. Зробити регулювання положення підставки установки (рис. 1.3.2) за допомогою ніжок опор 2 і регулювання нижнього кронштейна 5 так, щоб диск 9 на біфілярному підвісі перебував в центрі вікна фотодатчика 6.

7. Накласти на диск кільце. Установити необхідну довжину біфілярного підвісу так, щоб нижній край кільця маятника перебував на рівні оптичної осі фотодатчика. При цьому вісь маятника повинна зайняти горизонтальне положення.

8. Визначити за допомогою лінійки хід маятника h (відстань між положеннями центру мас маятника в найвищій та найнижчій точками). Для цього необхідно за допомогою олівця нанести позначку на стійці, яка вказує положення центра мас маятника в найнижчій точці, далі акуратно обертаючи маятник зафіксувати його у верхньому положенні і зробити позначку, яка визначає положенні центру мас в найвищій точці. Результати занести до таблиці 1.3.2.

9. Перевести вмикач у положення «Увімкнено» для фіксації маятника у верхньому положенні за допомогою електромагніту 7.

10. Натиснути на кнопку «Пуск». Відбудеться вимикання електромагніту, маятник почине опускатися, і секундомір почине відлік часу. При першому перетині маятником оптичної осі фотодатчика відлік часу припиниться.

11. Одразу після цього перевести вмикач у положення «Вимкнено».

12. Записати показання таймера, тобто час руху вантажу τ до таблиці 1.3.2. Скинути покази секундоміра натиснувши кнопку «S».

13. Дослід повторити 3-и рази.

14. Обчислити середній час $\langle \tau \rangle$.

15. За формулою (1.3.8) розрахувати момент інерції маятника. Результат обчислення занести до таблиці 1.3.2.

16. Порівняти одержані значення моментів інерції, знайдених експериментально J (1.3.8) та за розрахунком J_t (1.3.13).

Таблиця 1.3.2.

№	m , кг	d , м	h , м	τ , с	$\langle \tau \rangle$, с	J , кг·м ²

Контрольні питання

1. Що являє собою маятник Максвелла? Який рух він здійснює?
2. Що називають моментом інерції точки (тіла або системи точок) відносно осі обертання?
3. Сформулюйте закон збереження механічної енергії.
4. Як визначається кінетична енергія поступального та обертального руху абсолютно твердого тіла?
5. Який рух називають плоским рухом абсолютно твердого тіла?
6. На основі закону збереження енергії отримайте формулу для визначення моменту інерції маятника Максвелла.
7. Як розрахувати момент інерції маятника Максвелла, користуючись його геометричними розмірами?
8. Отримайте формулу для визначення моменту інерції маятника Максвелла на основі законів динаміки поступального та обертального рухів абсолютно твердого тіла.

Лабораторна робота № 1.4. ВИМІРЮВАННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: вивчити закономірності пружної деформації твердих тіл; визначити залежність деформації сталюого дроту від діючої сили та обчислити модуль Юнга.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити наступний матеріал: пружні сили, закон Гука; потенціальна енергія системи; консервативні сили; енергія пружної деформації.

[2. §21; 3. т.1 §14, 21, 25; 6, §§ 2.6.1, 3.6.1, 3.6.2, 3.6.3, 3.6.4;

Під дією прикладених сил будь-яке тверде тіло деформується, тобто змінює свої розміри та форму. Якщо після припинення дії сили тіло приймає початкові розміри, то *деформацію називають пружною* (в іншому випадку – пластичною). Одне й те саме тверде тіло може при короточасній дії сили вести себе як крихке, а при досить тривалій, але слабкій дії буде пластичним.

Пружні деформації спостерігаються тоді, коли сила (а точніше, сила, віднесена до одиниці площі, тобто напруга), що зумовлює деформацію, не перевищує деяку, визначену для кожного тіла межу – *межу пружності*. Деякі речовини (метали, каучук) можуть зазнавати значної пружної деформації, в той час як в інших випадках (кераміка, пресовані матеріали) навіть незначна деформація перестає бути пружною.

Пластичною називається деформація, яка не зникає (принаймні повністю) після припинення дії навантаження, а отже форма твердого тіла не відновлюється (таку деформацію називають необоротною). На пластичних деформаціях основані технологічні процеси обробки матеріалів, об'єднані назвою «обробка металів тиском», або холодна обробка металів. До таких процесів належать: прокатування (прокатне виробництво), пресування, штампування і кування (ковальсько-штампувальне виробництво) тощо.

Деформації реального тіла завжди є пластичними, але якщо величина залишкової деформації є дуже малою, то нею можна знехтувати та розглядати випадок пружної деформації, що ми і будемо надалі робити

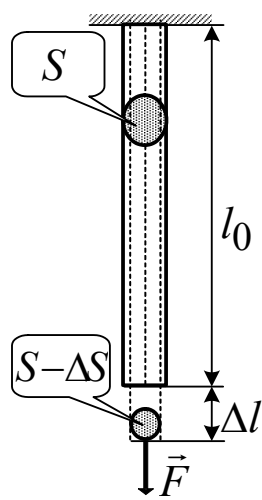


Рис. 1.4.1

Для встановлення робочої формули даної роботи розглянемо стрижень, який піддається деформації розтягу (рис. 1.4.1). Під дією сили \vec{F} стрижень з початковою довжиною l_0 та площею поперечного перерізу S розтягується на величину абсолютного видовження $\Delta l = l - l_0$.

Як величину, що характеризує деформацію стрижня, беруть відносну зміну її довжини $\Delta l/l_0$. Для стрижня із сталі *відносне видовження* при пружній деформації є пропорційним силі, що припадає на одиницю площі поперечного перерізу стрижня, тобто на-

прузі розтягу. При малих деформаціях Δl можна знехтувати зміною S при деформації (рис. 1.4.1). Тоді:

$$\frac{\Delta l}{l_0} \propto \frac{F}{S}.$$

Закон Гука, що виражає таку залежність, має вигляд:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (1.4.1)$$

де E – модуль пружності, або модуль Юнга.

Отже, виходячи з (1.4.1) можна записати:

$$E = \frac{F}{\left| \frac{\Delta l}{l_0} \right| \cdot S}. \quad (1.4.2)$$

Модуль Юнга характеризує пружні властивості матеріалу і, як видно з формули (1.4.2) є чисельно рівним силі, яку теоретично треба прикласти до стрижня, щоб збільшити його довжину вдвічі. *Одиницею вимірювання* модуля Юнга є 1 Н/м^2 . Співвідношення (1.4.1) справджується не лише для сил розтягу, але і для сил стиску.

В розглянутому вище випадку сила спрямована перпендикулярно до поверхні, і *напруга називається нормальною*. Якщо сила спрямована

по дотичній до поверхні (рис. 1.4.2), на яку вона діє, *напругу називають тангенціальною*. Позначимо її буквою $\tau = F_\tau / S$, де S – площа грані, і розглянемо деформацію зсуву, що супроводжує тангенціальну напругу. Під дією напруг тіло деформується і одна грань зміститься відносно іншої на деяку відстань Δx . Якщо тіло уявно розбити на елементарні паралельні до граней прошарки, то виникне відносний зсув прошарків. З цієї причини деформація такого виду називається деформацією зсуву.

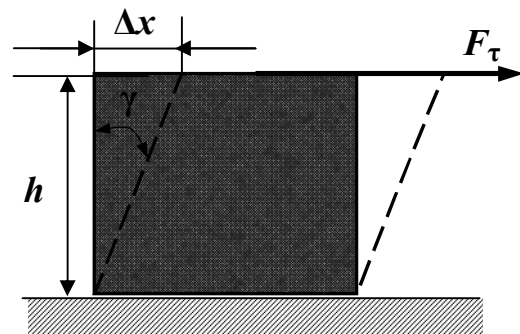


Рис. 1.4.2

При деформації зсуву будь-яка пряма, що на початку є перпендикулярною шарам, повернеться на деякий кут γ , тангенс якого є характеристикою деформації зсуву і називається відносним зсувом. Оскільки пружна деформація проявляється в області малих зсувів, то $\text{tg} \gamma \approx \gamma$.

Дослід показує, що відносний зсув є пропорційним тангенціальній напрузі, тобто: $\gamma = \frac{1}{G} \tau$, де G – коефіцієнт, який називається *модулем зсуву* і, як і для модуля Юнга, його одиницею вимірювання є 1 Н/м^2 .

Модуль Юнга і модуль зсуву повністю визначають механічні властивості однорідного твердого тіла у випадку пружних деформацій, зокрема швидкість поширення повздовжніх ($v = \sqrt{E/\rho}$) та поперечних ($v = \sqrt{G/\rho}$) звукових хвиль, де ρ – густина речовини. При поширенні повздовжніх хвиль в середовищі розповсюджується періодична деформація стиску і розтягу, а при поширенні поперечних – деформація зсуву.

Для визначення модуля Юнга в даній роботі необхідно знати довжину дроту, площу поперечного перерізу та виміряти видовження під дією відомої сили. Найбільші труднощі виникають при вимірюванні видовження, оскільки ця величина є дуже малою. Всі інші величини вимірюють звичайним способом: довжину – з допомогою лінійки, діаметр – з допомогою мікрометра.

Для виконання лабораторної роботи використовують установку, показану на рис. 1.4.3. Установка складається із досліджуваного сталю-

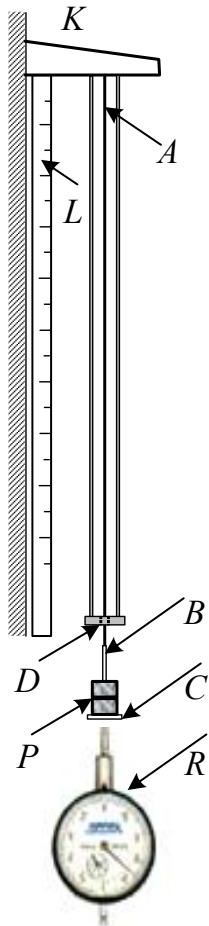


Рис. 1.4.3

го дроту A , верхній кінець якого нерухомо закріплено в стінному кронштейні K , а до нижнього кінця дроту прикріплено платформу C , на яку можна накладати набір каліброваних тягарців P . Тягарці, необхідні для розтягування дроту A , беруть з спеціального підвісу D , закріпленого на тому ж кронштейні K . При розвантаженні дроту тягарці слід розмістити назад на підвіс, адже саме цим досягається постійність навантаження підвісу.

Лінійка L , встановлена вертикально поблизу дроту A , використовується для вимірювання початкової довжини дроту l_0 від місця його вертикального закріплення до нижньої мітки B на дроті. Прецизійне вимірювання видовження дроту забезпечується за допомогою індикатора переміщення годинникового типу R , ціна поділки якого рівна $0,01$ мм.

Для вимірювання видовження дроту при покроковому його навантаженні тягарцями щоразу після навантаження фіксують покази індикатора годинникового типу R . Розтягуючою силою, що діє з боку тягарців на дріт, є сила тяжіння, тобто $F = mg$, де m – сумарна маса усіх тягарців, що розтягують дріт, $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

Нарешті, виразивши площу поперечного перерізу S через діаметр дроту d , з формули (1.4.2) отримаємо робочу формулу у вигляді:

$$E = \frac{4l_0 \cdot mg}{\Delta l \cdot \pi d^2}, \quad \text{або} \quad E = \frac{4l_0 g}{\frac{\Delta l}{m} \cdot \pi d^2}. \quad (1.4.3)$$

Ця формула є справедливою за умови, що деформація, якої зазнає дріт, залишається в межах її пружності.

Хід роботи

1. Ознайомитися із лабораторною установкою рис. 1.4.3.
2. Виміряти за допомогою мікрометра діаметр d та за допомогою лінійки L довжину дроту l_0 до мітки B на ньому.

3. Записати видовження l дроту за показами індикатора переміщення годинникового типу R до навантаження (тобто без тягарців на платформі C).
4. Покласти на платформу C перший тягарець із набору тягарців P та записати його масу m і покази індикатора переміщення годинникового типу R .
5. Поступово додавати по черзі всі інші тягарці, виконуючи п.4 для кожного з них.
6. Отримані експериментальні дані занести до таблиці 1.4.1.
7. Побудувати графік залежності видовження l дроту від маси тягарців m та визначити тангенс кута нахилу цієї залежності, тобто знайти відношення $\Delta l/m$.
8. Розрахувати величину модуля Юнга E за результатами досліду, використовуючи для цього формулу (1.4.3).
9. Визначити похибки вимірювання E .
10. Порівняти отримане значення модуля Юнга E з табличним його значенням для цього ж матеріалу.

Таблиця 1.4.1

№ п/п	d , м	l_0 , м	m , кг	l , м	$\frac{\Delta l}{m}$, м/кг	E , 10^9 Па	$E_{\text{табл.}}$, 10^9 Па

Контрольні запитання

1. Що називається деформацією твердого тіла?
2. Якою є залежність між видовженням тіла та прикладеним зусиллям?
3. Охарактеризувати основні види деформації.
4. Що таке залишкова деформація?
5. Що таке відносна деформація?
6. Що таке межа пружності?
7. Сформулюйте та запишіть закон Гука.
8. Які умови застосовності закону Гука?
9. Фізичний зміст модуля Юнга. Розмірність модуля Юнга.
10. Що таке деформація зсуву?

11. Виведіть робочу формулу для розрахунку модуля Юнга (1.4.3).
12. Обчислити похибки вимірювання модуля Юнга.
13. Які методи вимірювання модуля Юнга Ви ще знаєте?

Лабораторна робота № 1.5. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

Мета роботи: вивчити явища тертя, експериментальним шляхом визначити коефіцієнт тертя кочення.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити наступний матеріал: сили тертя; тертя спокою; коефіцієнт тертя ковзання; тертя кочення; коефіцієнт тертя кочення.

[2, §8; 3, т.1 §15; 6, §§ 2.3.1, 2.5.2]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 1.3.

Зовнішнє тертя є механічним опором, що виникає в площині дотику двох притиснутих одне до одного тіл, при їх взаємному переміщенні. Сила опору, що спрямована протилежно відносному переміщенню даного тіла, називається *силою тертя* $F_{тр}$, що діє на це тіло. Зовнішнє тертя – є дисипативним процесом, пов'язаним з втратами енергії, він супроводжується виділенням теплоти, електризацією тіл, їх руйнуванням.

Розрізняють тертя ковзання і кочення. Кожний із цих видів характеризується відповідним коефіцієнтом. Так, *коефіцієнт тертя ковзання* є рівним відношенню сили тертя до сили реакції опори, напрямленої по нормалі до поверхні: $\mu_{ковз} = F_{тр}/N$. Значення сили тертя кочення є малим порівняно з силами тертя ковзання.

При коченні циліндра (кулі) завжди має місце сила тертя кочення. Тому циліндр, що котиться без проковзування, поступово зупиняється. В цьому випадку сила тертя кочення залежить від властивостей матеріалу циліндра (кулі) і площини. *Тертя кочення* обумовлюється взаємною деформацією тіл, яка при коченні без ковзання є не пружною і тому несиметричною відносно точки контакту поверхонь тіл, що знаходяться в спокої (рис. 1.5.1) (циліндр, куля, колесо – горизонтальна поверхня).

Такий характер деформації поверхні призводить до того, що сила реакції N має як горизонтальну, так і вертикальну складові, причому вертикальна складова сили N_y дорівнює силі тяжіння mg . Точка прикладення сили N виявляється зміщеною відносно точки контакту тіл, що перебу-

вають у спокої, на деяку відстань μ_k в напрямку руху тіла (рис. 1.5.2). Ця відстань і називається коефіцієнтом тертя кочення.

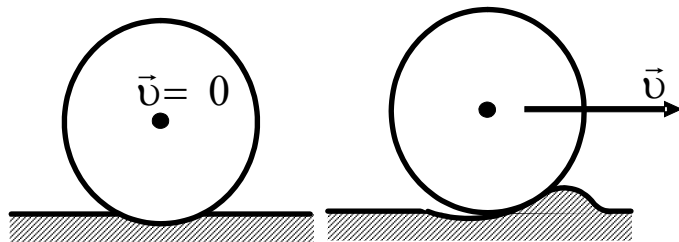


Рис. 1.5.1

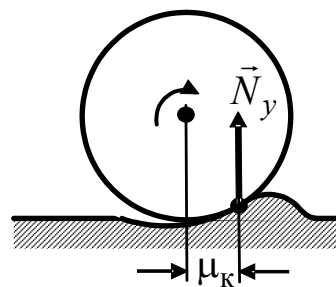


Рис. 1.5.2.

Формально коефіцієнт тертя кочення визначається як відношення моменту сили тертя до сили нормального тиску:

$$\mu_k = \frac{M}{N}. \quad (1.5.1)$$

Момент сили тертя кочення можна представити добутком сили тертя кочення на радіус кривизни поверхні, що котиться:

$$M = F_{\text{тр.к}} \cdot R. \quad (1.5.2)$$

Записаний вираз (1.5.2) необхідно розглядати як перше наближення. Теоретичний розгляд процесу перекочування із врахуванням величин, що характеризують матеріал тіл, швидкості їх руху, тиску на них призводить до складних виразів для величини сили тертя кочення.

З врахуванням рівності (1.5.2) можна записати рівняння закону Кулона – Амонтона для сили тертя кочення:

$$F_{\text{тр.к}} = \mu_k \frac{N}{R}. \quad (1.5.3)$$

Із цього закону випливає, що сила тертя кочення є пропорційною силі нормального тиску і обернено пропорційною радіусу тіла, що котиться. Коефіцієнт тертя кочення має розмірність довжини, на відміну від безрозмірного коефіцієнта тертя ковзання. Він залежить від матеріалу тіл, швидкості їх руху, стану їх поверхонь і цілого ряду інших факторів, якими в першому наближенні можна знехтувати.

В даній лабораторній роботі використовується непряма методика визначення коефіцієнта тертя кочення на основі дослідження руху кульки похилого маятника. Він нагадує математичний маятник, але коливання здійснюються не у вертикальній, а на похилій площині. Зміна площини коливання заставляє кульку маятника качатися по поверхні, тобто реалізувати тертя кочення (без проковзування). Розрахункову формулу для

коефіцієнта тертя кочення можна отримати на основі закону збереження енергії.

Маятник, що здійснює коливальний рух по похилій площині (рис. 1.5.3), має механічну енергію, яку в крайніх положеннях маятника (точки A і B) представлено максимальним значенням потенціальної енергії кульки, піднятої на висоту h відносно горизонтального рівня, що відповідає рівноважному положенню маятника (точка O). Цьому значенню висоти відповідає кут відхилення маятника β .

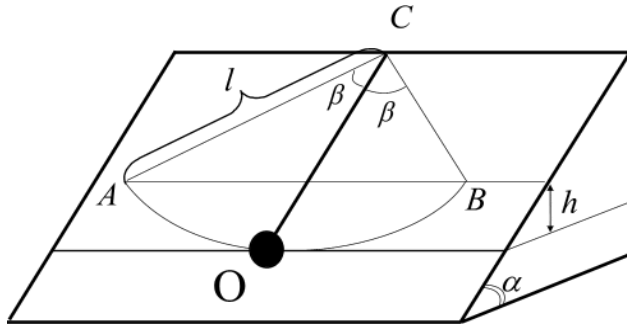


Рис. 1.5.3.

При коливаннях похилого маятника кулька котиться по похилій площині і в першому наближенні можна вважати, що цьому руху заважає лише одна сила – сила тертя кочення. Дія цієї сили буде призводити до зменшення повної механічної

енергії маятника, отже коливання похилого маятника будуть згасаючими. Зменшення енергії буде дорівнювати роботі сил тертя кочення, тобто:

$$\Delta E = A, \quad (1.5.4)$$

і призведе до зменшення максимального кута відхилення β з часом.

Максимальне значення потенціальної енергії маятника залежить від цього кута наступним чином:

$$\Pi = mgh = mgl \cdot \sin\alpha \cdot (1 - \cos\beta). \quad (1.5.5)$$

Малі зміни потенціальної енергії маятника можна знайти операцією диференціювання рівняння (1.5.5):

$$d\Pi = mgl \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot d\beta. \quad (1.5.6)$$

Для кутів $\beta \leq 6^\circ$ справджується наближена рівність $\sin\beta \approx \beta$, де кут β вимірюється в радіанах. Тому попередній вираз можна записати так:

$$d\Pi = mgl \cdot \sin\alpha \cdot \beta \cdot d\beta. \quad (1.5.7)$$

Робота сили тертя кочення за час, рівний одному періоду коливань вздовж дуги AOB , очевидно, буде:

$$A_1 = F_{\text{тр.к}} \cdot 2AOB = F_{\text{тр.к}} \cdot 4l\beta. \quad (1.5.8)$$

Якщо було здійснено n повних коливань, то:

$$A = F_{\text{тр.к}} \cdot 4l\beta n. \quad (1.5.9)$$

Із (1.5.4) з врахуванням (1.5.3), (1.5.7) і (1.5.9) отримаємо співвідношення:

$$\mu_k \frac{N}{R} \cdot 4l\beta_n = mgl \cdot \sin\alpha \cdot \beta \cdot \Delta\beta. \quad (1.5.10)$$

Через те, що сила нормального тиску кульки на площину $N = mg \cdot \cos\alpha$, кінцева формула для розрахунку коефіцієнта тертя кочення набуде вигляду:

$$\mu_k = R \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \frac{\beta_0 - \beta_n}{4n}, \quad (1.5.11)$$

де R – радіус кульки маятника; α – кут нахилу площини; β_0 – кут початкового відхилення маятника; β_n – кут відхилення маятника після здійснення n повних коливань.

Експериментальна установка (рис. 1.5.3) складається з похилої площини (кут нахилу якої може змінюватись), набору металевих кульок та пластин.

Хід роботи

1. Вибрати для дослідження комплект, що складається із металевої пластини і кульки. Встановити пластину в напрямні пази похилої площини.
2. Вибрати і встановити кут нахилу площини коливань похилого маятника α . ($\alpha = 20^\circ$; $\alpha = 30^\circ$; $\alpha = 45^\circ$; $\alpha = 60^\circ$; $\alpha = 75^\circ$; встановити послідовно).
3. Відхилити маятник від положення рівноваги на кут $\beta_0 = 10^\circ \div 14^\circ$ (відхиляємо завжди на однаковий кут). Відпустити маятник і полічити кількість повних коливань n , зроблених маятником за час досліді. Коливання маятника згасають, тому при зниженні кутової амплітуди до $\beta_n = 2^\circ$ рахунок n припинити. Число повних коливань n занести до таблиці 1.5.1.
4. Кожен з дослідів по визначенню n для конкретного значення α повторити 3 рази. Визначити середнє значення $n_{\text{ср}}$ і занести до таблиці 1.5.1..
5. Виміряти штангенциркулем діаметр кульки маятника і визначити D .
6. Значення кутів β_0 ; β_n перевести в радіанну міру за формулою:

$$\beta_{\text{рад}} = \frac{3,1415927}{180} \cdot \beta_{\text{град}}.$$

7. Коефіцієнт тертя кочення для отриманого значення $n_{\text{ср}}$ розрахувати за формулою:

$$\mu_k = R \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \frac{\beta_0 - \beta_n}{4 \cdot n_{\text{ср}}} = D \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \frac{\beta_{0\text{рад}} - \beta_{n\text{рад}}}{8 \cdot n_{\text{ср}}}.$$

8. Вибрати новий кут нахилу площини похилого маятника і повторити пункти 3 – 8.

9. Оскільки результат обчислень коефіцієнта залежить від похибок підрахунку $n_{\text{ср}}$, необхідно накреслити графік залежності $n_{\text{ср}} = f(\text{tg}\alpha)$. Для

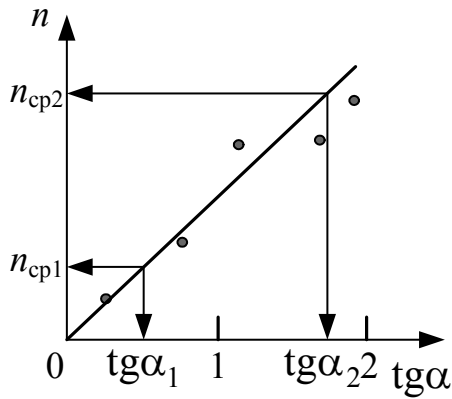


Рис. 1.5.4

цього нанести експериментальні точки з таблиці 1.5.1 і по їх положенню провести пряму лінію для графічного усереднення отриманих результатів (рис. 1.5.4).

10. На початку та кінці графіка (рис. 1.5.4) вибрати дві точки 1 і 2, спроектувати точки на осі $n_{\text{ср}}$ і $\text{tg}\alpha$ і отримати по два значення координат, $(n_{\text{ср}1}; n_{\text{ср}2})$ і відповідно $(\text{tg}\alpha_1; \text{tg}\alpha_2)$. Розрахувати значення $\mu_{\text{к}}$

за формулою:

$$\mu_{\text{к}} = D \cdot \frac{\beta_{0\text{рад}} - \beta_{n\text{рад}}}{8} \cdot \frac{\text{tg}\alpha_2 - \text{tg}\alpha_1}{n_{\text{ср}2} - n_{\text{ср}1}}$$

Таблиця (1.5.1)

α , град	$\text{tg } \alpha$	n	$n_{\text{ср}}$	β_0 град	β_n град	β_0 рад	β_n рад	D , м	$\mu_{\text{к}}$, м

Контрольні запитання

1. Що називається тертям? Які бувають види тертя?
2. Що називається силою тертя? Природа цієї сили.
3. Як встановити напрям вектора сили тертя?
4. Поясніть виникнення сили тертя кочення при русі тіла без проковзування?
5. Якою є умова кочення тіла без ковзання?
6. Що називається коефіцієнтом тертя ковзання? Яка його розмірність?
7. Що називається коефіцієнтом тертя кочення? Яка його розмірність?
8. Опишіть метод вимірювання коефіцієнта тертя кочення в установці похилого маятника.
9. Як вивести формулу для розрахунку коефіцієнта тертя кочення в даній лабораторній роботі?
10. Які фактори впливають на величину коефіцієнта тертя кочення?

Лабораторна робота № 1.6. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: вивчити основні поняття та закони кінематики поступального руху; закон збереження імпульсу; закон збереження енергії при поступальному русі; практично визначити швидкість кулі.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: система відліку, траєкторія шлях та переміщення; швидкість та прискорення; збереження імпульсу та енергії в механіці; абсолютно пружний та непружний удар.

[1. т.1 §§ 1.1–1.4; 2.5; 3.3 – 3.5; 3.7. 2. §§ 1–4; 9; 13;15. 4. т.1 §§ 1; 3; 4; 19; 21; 24; 27; 28; 6, §§ 2.2.1, 2.2.2, 2.3.2, 2.5.3

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 1.3.

Балістичний маятник представляє собою масивне тіло симетричних розмірів підвішене на довгих та нерозтяжних нитках довжиною l (рис. 1.6.1). Принцип дії такого пристрою для визначення швидкості кулі ґрунтується на тому, що куля масою m , яка летить горизонтально з швидкістю U , попадає в масивне тіло масою M і застряє в тілі. Розглядаємо взаємодію кулі з тілом використовуючи принцип абсолютно непружного удару. В результаті взаємодії тіл утворюється складне тіло масою $(M + m)$, яке починає рухатися з швидкістю u .

Для визначення швидкості U кулі скористаємося законом збереження імпульсу для непружного удару:

$$m \cdot U = u(M + m); \quad (1.6.1)$$

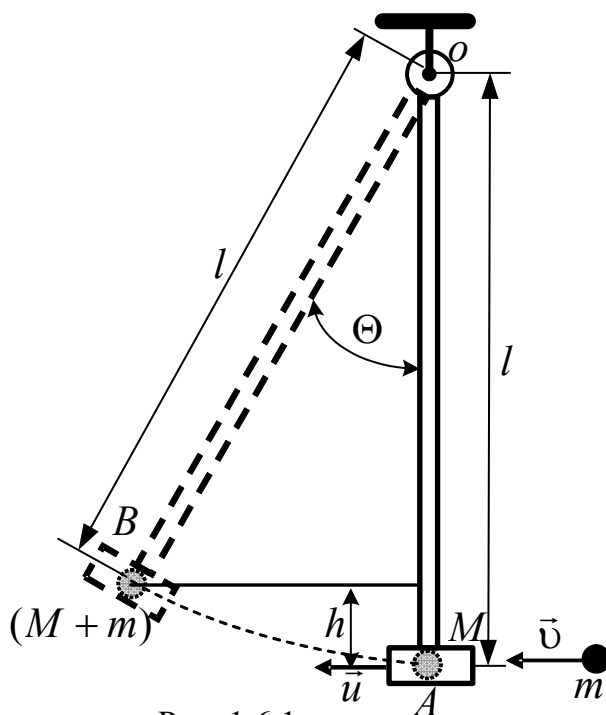


Рис. 1.6.1

Запишемо рівняння закону збереження енергії складного тіла $(M + m)$, яке утворилось в процесі непружної взаємодії. За рахунок руху складного тіла зі швидкістю u його кінетична енергія перетворюється на потенціальну енергію на висоті h (рис. 1.6.1).

$$\frac{M + m}{2} \cdot u^2 = (M + m) \cdot gh. \quad (1.6.2)$$

Висоту підйому h можна виразити через довжину нитки l (рис. 1.6.1):

$$h = l - l \cos \Theta = l \cdot 2 \frac{1 - \cos \Theta}{2} = 2l \cdot \sin^2 \frac{\Theta}{2}, \quad (1.6.3)$$

де Θ – кут, на який відхиляється підвіс маятника після влучення кулі.

Після чого з (1.6.1) та (1.6.3) визначається швидкість u початкового руху тіла $(M + m)$:

$$u = \sqrt{4gl \cdot \sin^2 \frac{\Theta}{2}} = 2 \cdot \sin \frac{\Theta}{2} \sqrt{gl}. \quad (1.6.3)$$

З рівняння закону збереження імпульсу для непружного удару (1.6.1) та врахувавши (1.6.3), знайдемо швидкість v , з якою летіла куля:

$$v = 2 \cdot \sin \frac{\Theta}{2} \cdot \frac{M + m}{m} \cdot \sqrt{gl}, \quad (1.6.4)$$

де M – маса тіла, яка складається з суми мас мішені та підвісу $(M_m + m_l)$; m – маса кулі; l – довжина підвісу маятника; g – прискорення вільного падіння.

Отже, виконання роботи зводиться до вимірювання кута Θ після пострілу та розрахунку швидкості v за формулою (1.6.4).

Хід роботи

1. Притримуючись техніки безпеки встановити прилад, який копіює балістичний маятник. Техніка безпеки стосується встановлення приладу таким чином, щоб в напрямку польоту кулі не могли розташуватися люди.
2. Встановити пристрій для проведення прицільного пострілу.
3. Визначити значення маси кулі m ; маси тіла M та довжини нитки l (вимірюються перед початком досліду або задаються викладачем).
Всі дані занести в таблицю 1.6.1.

4. Зробити постріл і виміряти кут Θ .
5. Розрахувати значення швидкості v за формулою (1.6.4) і записати в таблицю 1.6.1.
6. Дослід повторити декілька разів (n).
7. Розрахувати середнє значення швидкості руху кулі $\langle v \rangle$ за формулою:

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}.$$

Таблиця 1.6.1.

Довжина нитки l , м	Маса тіла, М, г		Маса кулі, m , г	Значення кута Θ , градус	Швидкість кулі v , м/с	Середнє значення швидкості $\langle v \rangle$, м/с
	Маса підвісу m_l , г	Маса мішені, M_m , г				

Контрольні запитання

1. Що розуміють під поняттям «Система відліку»?
2. Що таке траєкторія, шлях та переміщення при поступальному русі?
3. Що таке швидкість поступального руху?
4. Що таке прискорення тіла? Як класифікують рух тіла за значенням прискорення?
5. Що таке імпульс тіла та імпульс сили?
6. Як формулюється закон збереження імпульсу в механіці?
7. Дайте визначення та запишіть формули кінетичної та потенціальної енергії.
8. Як формулюється закон збереження енергії в механіці?
9. Які фізичні процеси використовуються для визначення швидкості на приладі лабораторної установки?
10. Виконайте математичні перетворення для отримання розрахункової формули.

Модуль 2. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

Лабораторна робота № 2.1. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ ВІДРИВУ КІЛЬЦЯ

Мета роботи: ознайомитись з основними властивостями поверхневого шару рідин; визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: особливості рідкого стану речовини, поверхневий натяг, капілярні явища.

[1, т.1, §§ 19.1, 19.3, 19.5; 2, §§ 60, 66; 3, 4.2, 6.2; 4, т.1, §§ 115–119; 6, §§ 4.12, 4.13; 5.5.6;

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 2.5.

Поверхневі явища відіграють значну роль не тільки у природних процесах, а й при виробленні, зберіганні, транспортуванні та використанні різних матеріалів, будівельних в тому числі. Капілярні явища обумовлюють існування у матеріалів *гідрофізичних властивостей*, таких як: гігроскопічність, водостійкість, паропроникність, водопоглинання, гідрофільність та гідрофобність, вологі деформації (набухання та усадку), морозостійкість, корозійну стійкість, що зумовлюють реакцію матеріалу на дію вологи.

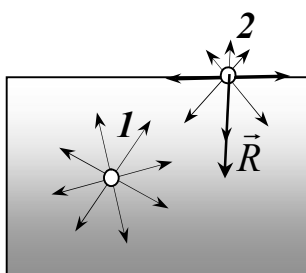


Рис. 2.1.1

Розглянемо поведінку молекул рідини, які знаходяться всередині рідини та на її поверхні (рис. 2.1.1). Очевидно, що молекула всередині рідини зазнає в середньому рівномірної дії з боку інших молекул, які її оточують, і рівнодійна таких сил дорівнює нулеві. Рівнодійна сил \vec{R} , які діють на поверхневу молекулу, спрямована всередину рідини і поверхня рідини веде себе як розтягнута плівка.

Таким чином, всі молекули, які знаходяться в поверхневому шарі, рівному радіусу молекулярної дії, втягуються всередину рідини. Але простір всередині рідини зайнято іншими молекулами, тому поверхневий шар створює тиск на рідину, який називається *молекулярним тиском*.

Теоретичні розрахунки показали, що молекулярний тиск є дуже великим, наприклад, для води він має порядок $11 \cdot 10^8$ Па, а для ефіру – $1,4 \cdot 10^8$ Па.

Отже, на поверхні рідини виникають сили поверхневого натягу. Сила поверхневого натягу рідини F_H , обумовлена взаємодією молекул рідини, викликає скорочення площі її вільної поверхні та напрямлена вздовж дотичної до цієї поверхні. Вона є пропорційною довжині периметру поверхневого шару l :

$$F_H = \sigma \cdot l,$$

де σ – коефіцієнт пропорційності, який залежить від роду та стану речовини.

В останній формулі коефіцієнт пропорційності σ називається *коефіцієнтом поверхневого натягу* та чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, яка діє на одиницю довжини вільної поверхні рідини:

$$\sigma = \frac{F_H}{l}, \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right]. \quad (2.1.1)$$

Для перенесення молекул із глибини об'єму рідини в її поверхневий шар необхідно здійснити роботу проти рівнодійної сили \vec{R} , і тим самим збільшити потенціальну енергію молекули:

$$A = (W_1 - W_2) N,$$

де W_1 – потенціальна енергія молекули в поверхневому шарі; W_2 – потенціальна енергія молекули в об'ємі рідини; N – кількість молекул в поверхневому шарі.

Отже, молекули поверхневого шару рідини мають додаткову потенціальну енергію, яку називають *вільною енергією*. Через те, що зміна вільної енергії $\Delta W_{\text{п}}$ є прямо пропорційною зміні площі вільної поверхні рідини ΔS , то:

$$A = \Delta W_{\text{п}} = \sigma \cdot \Delta S.$$

Звідси випливає, що *коефіцієнт поверхневого натягу рідини* чисельно дорівнює роботі ізотермічного збільшення площі поверхні рідини на одиницю:

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right].$$

Треба зазначити, що коефіцієнт поверхневого натягу є функцією температури, тобто при нагріванні коефіцієнт поверхневого натягу зменшується і в критичній точці переходу рідина-пара дорівнює нулю.

В даній роботі для визначення коефіцієнта поверхневого натягу α використовують метод відриву кільця від поверхні рідини.

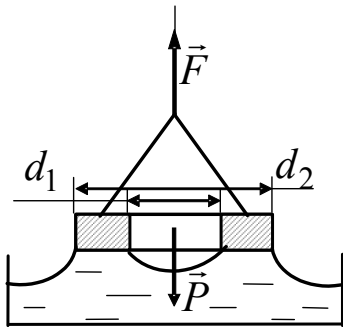


Рис. 2.1.2

Сила відриву кільця від поверхні визначається за допомогою торсійних терезів (рис. 2.1.2). Основним елементом терезів є плоска спіральна пружина, яка деформується під дією ваги предмета. Величина деформації пружини пропорційна навантаженню, а тому шкалу терезів, яка показує кут закручування пружини, градуйовано в одиницях сили. В момент відриву кільця терези показують силу F , яка дорівнює сумі сил поверхневого натягу F_H та ваги вогкого кільця P :

$$F = F_H + P. \quad (2.1.2)$$

Відрив кільця від поверхні (рис. 2.1.1) пов'язаний з розривом поверхні рідини по двох периметрах кільця: $L = \pi(d_1 + d_2)$. Враховуючи (2.1.1) та (2.1.2.) можна одержати робочу формулу для визначення коефіцієнта поверхневого натягу α :

$$\sigma = \frac{F_H}{L} = \frac{F - P}{\pi(d_1 + d_2)}, \quad (2.1.3)$$

де d_1 та d_2 відповідно внутрішній та зовнішній діаметри кільця.

Хід роботи

1. За допомогою опорних гвинтів встановити бульбашку, яка контролює горизонтальність терезів, у центральне положення.
2. Користуючись ручкою, розташованою на правому боці терезів, звільнити коромисло з підвішеним на ньому кільцем від затискувача.
3. За допомогою розташованої на лівому боці терезів ручки встановити зусилля відриву 800 мГ.
4. Розташувати під кільцем склянку з водою.
5. За допомогою лівої ручки зменшувати зусилля доти, поки кільце не доторкнеться до поверхні води.

6. Повільно обертаючи ліву ручку, відірвати кільце від поверхні води. Після відриву зафіксувати величину сили відриву F . При цьому слід враховувати, що шкалу терезів градуйовано в міліграмах.
7. Обертаючи ліву ручку в протилежний бік, прийти до такої ситуації, коли коромисло терезів займає горизонтальне положення і починає коливатись навколо нього. Визначити вагу вогкого кільця P .
8. Повторити пункти 5 - 7 два рази.
9. Нагріти воду у склянці до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і виконати пункти 3 - 8.
10. Знайти силу $F_{\text{H}} = F - P$ для кожного виміру.
11. За формулою (2.1.3) визначити величину σ . Виконати розрахунки середнього значення (за результатами трьох вимірів) для двох значень температури води.
12. Всі результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці 2.1.1.

Таблиця 2.1.1

№ пор.	Температура води t , $^{\circ}\text{C}$	Сила відриву F , Н	Вага вогкого кільця P , Н	F_{H} , Н	σ , Н/м

Контрольні запитання

1. Який вигляд має графічна залежність потенціальної енергії взаємодії однієї пари молекул від відстані між ними?
2. Яке співвідношення між потенціальною і кінетичною енергіями, характерне для різних агрегатних станів речовини?
3. Який характер руху молекул у рідині? Що називають сферою молекулярної дії та вільною енергією?
4. Чим обумовлена практична нестисливість рідин? Якого розміру за порядком величини є поверхневий шар рідин?
5. Як напрямлена сила поверхневого натягу? Який фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу та в яких одиницях він вимірюється?
6. Поясніть температурну залежність коефіцієнта поверхневого натягу.
7. Чи мають коефіцієнт поверхневого натягу тверді тіла?
8. Поясніть явище адсорбції. Що таке поверхнево-активні речовини? Де вони застосовуються? Наведіть приклади.

Лабораторна робота № 2.2. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМУ

Мета роботи: вивчити явища переносу; виміряти коефіцієнт теплопровідності ебоніту.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий матеріал: явища переносу; теплопровідність.

[1, т.1 §§ 15.3; 2, §§ 48; 3, вступ до розд.5, §§ 5.8–5.10; 4, т.1 §§ 112, 113; 6, §§ 4.11, 5.3.1, 5.3.3;

В термодинамічних нерівновісних системах виникають *необоротні процеси*, які мають назву явищ переносу, в результаті чого проходить просторовий перенос енергії (теплопровідність), маси (дифузія) і кількості руху (внутрішнє тертя, або в'язкість). Для цих процесів характерним є те, що перенос енергії, маси та кількості руху завжди протікає в напрямку, оберненому градієнту їхнього просторового розподілу, тобто система наближається до термодинамічної рівноваги.

Щоб експериментально визначити коефіцієнт теплопровідності λ можна використати процес передачі теплоти в твердому тілі, оскільки закономірності такого процесу завжди пов'язані з коефіцієнтом теплопровідності.

Коефіцієнт теплопровідності можна знайти з основного рівняння, яке описує процес теплопровідності – *рівняння Фур'є*:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Delta S \Delta \tau,$$

де ΔQ – кількість тепла, що передається вздовж осі x крізь елемент площі ΔS за час $\Delta \tau$ при градієнті температури $\frac{\partial T}{\partial x}$.

З рівняння Фур'є можна отримати:

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\frac{\partial T}{\partial x} \Delta S \Delta \tau},$$

та дати таке визначення фізичного змісту коефіцієнта теплопровідності: *коефіцієнт теплопровідності* чисельно дорівнює кількості теплоти, що переноситься через одиницю площі поперечного перерізу тіла за одиницю часу при градієнті температури, рівному одиниці.

Практичне вимірювання величин, які входять в останнє рівняння, має деякі ускладнення, тому краще розглядати такі процеси, в яких можна легко і точно виміряти всі величини, що входять до розрахункової формули для визначення λ . Один з таких процесів – *регулярний режим нагрівання*.

Нехай нагріте до деякої температури T тіло внесено в середовище, яке добре проводить тепло (наприклад вода) температура цього середовища підтримується сталою і рівною T_0 . Тоді внаслідок теплопровідності різниця температур тіла та середовища $T - T_0 = \Delta T$ буде постійно зменшуватиметься і, в момент встановлення рівноваги, дорівнюватиме нулю. Закон цього зменшення, тобто функція $\Delta T = f(\tau)$, залежить від розмірів та форми тіла, його теплофізичних властивостей, а також від того, як було нагріте тіло (рівномірно чи ні) перед початком досліду. В початковій стадії теплообміну цей закон досить складний.

З часом настає так званий регулярний режим нагрівання (чи охолодження), при якому різниця температур між будь-якою точкою зразка та навколишнім середовищем залежить від часу за законом:

$$\Delta T(x, \tau) = A(x)e^{-a\tau}. \quad (2.2.1)$$

Величина a у формулі (2.2.1) називається темпом нагрівання (чи охолодження) і пов'язана з властивостями тіла:

$$a = \frac{\lambda}{k\rho c}, \quad (2.2.2)$$

де k – коефіцієнт форми, що залежить від форми та розмірів тіла; c – питома теплоємність тіла; ρ – густина тіла. Для циліндра:

$$k = \frac{1}{\frac{5,78}{R^2} + \frac{9,87}{h^2}}, \quad (2.2.3)$$

де R , h – відповідно радіус і висота циліндра.

Таким чином, визначення коефіцієнта теплопровідності λ циліндричного зразка з відомими густиною речовини ρ та питомою теплоємністю

стю C зводиться до визначення темпу нагрівання a . З цією метою вимірюють різницю температур між зразком і зовнішнім середовищем у різні моменти часу.

Згідно з (2.2.1):

$$\ln \Delta T = \ln A - a\tau. \quad (2.2.4)$$

a

Залежність $\ln \Delta T = f(\tau)$

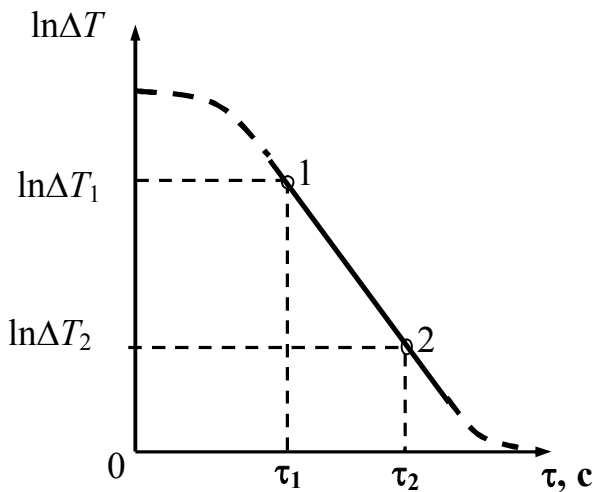


Рис.2.2.1

після настання регулярного режиму на графіку має вигляд прямої з кутовим коефіцієнтом a (рис. 2.2.1).

Щоб знайти темп нагрівання a , на прямолінійній ділянці графіка вибирають довільно (але на досить великій відстані одна від одної) точки 1 і 2. Для цих точок визначають моменти часу τ_1 та τ_2 , а також відповідні

їм значення логарифмів різниці температур $\ln \Delta T_1$ і $\ln \Delta T_2$.

Тоді темп нагрівання розраховується за формулою:

$$a = \frac{\ln \Delta T_1 - \ln \Delta T_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (2.2.5)$$

Після визначення темпу нагрівання можна знайти коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda = k \cdot a \cdot c \cdot \rho. \quad (2.2.6)$$

За середовище, в якому нагрівається зразок, доцільно взяти воду, яка кипить, оскільки, по-перше, в цьому разі забезпечується достатній теплообмін поверхні зразка з водою за рахунок перемішування, по-друге, температура води, що кипить, відома та не змінюється, коли зразок нагрівається.

Температуру вимірюють за допомогою або звичайного термометра, або диференціальної терморпарі та потенціометра постійного струму та самозаписувача.

Хід роботи

Спосіб 1

1. Ознайомитися з установкою. Увімкнути нагрівник та довести воду у посудині до кипіння. Підтримувати температуру води протягом усього дослід.
2. Виміряти радіус R та висоту зразка h . За формулою (2.2.3) обчислити коефіцієнт форми k .
3. Занурити циліндр у воду. Температуру зразка T вимірювати з допомогою термометра. Протягом перших 5 хвилин вимірювати температуру через кожні 30 секунд, а далі – через кожну хвилину. Тривалість дослід 15 - 20 хвилин.
4. Результати занести до таблиці 2.2.1
5. Розрахувати різницю між температурою зразка та киплячою водою $\Delta T = T - T_0$ і занести її до табл. 2.2.1.
6. Побудувати графік залежності $\ln \Delta T = f(\tau)$.
7. Обробити графік $\ln \Delta T = f(\tau)$ та за формулою (2.2.5) визначити темп нагрівання a .
8. За формулою (2.2.6) розрахувати коефіцієнт теплопровідності ебоніту λ .

Спосіб 2

1. Ознайомитися з установкою. Увімкнути нагрівник та довести воду у посудині до кипіння. Підтримувати температуру води протягом усього дослід.
2. Виміряти радіус R та висоту зразка h . За формулою (2.2.3) обчислити коефіцієнт форми k .
3. Занурити циліндр у воду та увімкнути самозаписувач. Протягом 15-20 хв. отримати діаграму залежності температури зразка від часу τ (рис. 2.2.2).
4. Для визначення темпу нагрівання опрацювати діаграмну стрічку. Для цього:

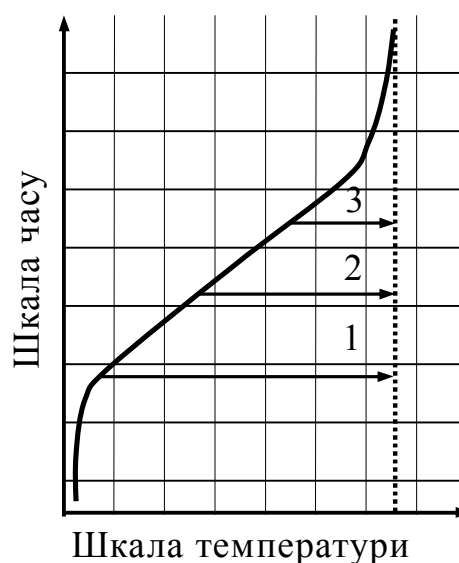


Рис. 2.2.2

а) нанести на діаграму шкалу температур (мінімальна температура зразка – кімнатна, а максимальна – 100 °С);

б) знаючи швидкість руху діаграмної стрічки, нанести на діаграму шкалу часу;

в) через кожні 120 с одержати значення температури зразка t °С. Значення температури та часу занести до таблиці 2.2.1.

5. Розрахувати різницю між температурою зразка та киплячою водою ($T_0 = 100$ °С) $\Delta T = T_0 - T$ і занести її до табл. 2.2.1.

6. Побудувати графік залежності $\ln \Delta T = f(\tau)$.

7. За формулою (2.2.5) визначити темп нагрівання a .

8. За формулою (2.2.6) розрахувати коефіцієнт теплопровідності ебоніту λ .

Таблиця 2.2.1

№ пор.	τ , с	t °С	ΔT , К	$\ln \Delta T$	λ , Вт/(м·К)

Контрольні запитання

1. Які явища переносу Вам відомі?
2. Дайте означення явища теплопровідності.
3. Запишіть закон Фур'є для явища теплопровідності.
4. Що називається коефіцієнтом теплопровідності? Його фізичний зміст.
5. Від чого залежить теплопровідність твердих тіл?
6. Дайте означення градієнта температури.
7. Поясніть фізичний зміст знака «мінус» в законі Фур'є.
8. Що таке регулярний режим нагрівання? Запишіть закон зміни температури від часу при регулярному режимі.
9. Поясніть практичне значення коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів.

Лабораторна робота № 2.3. ПЕРЕВІРКА ОСНОВНИХ ГАЗОВИХ ЗАКОНІВ

Мета роботи: вивчити та експериментально перевірити закономірності ізотермічного, ізохорного та ізобарного процесів в газах.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: рівняння стану ідеального газу, ізопроцеси, перший закон термодинаміки, рівняння Майєра.

[1, т.1, §§14.6, 14.7, 16.1 – 16.5; 2, §§41, 42, 51 – 56; 6, §§ 4.3, 4.6, 4.7;]

Стан газу характеризується макроскопічними параметрами: об'ємом V , тиском p і температурою T . Зміна одного з цих параметрів приводить до відповідних змін інших. Для ідеальних газів справедливий закон Клапейрона – Менделєєва:

$$pV = \nu RT, \quad (2.3.1)$$

$$\nu = m/\mu, \quad (2.3.2)$$

де ν – кількість молей, m і μ – відповідно маса і молярна маса газу, R – універсальна газова стала (див. дод. 2)

Перехід певної маси газу з одного стану в інший називають термодинамічним процесом. Якщо такий перехід відбувається при сталому значенні одного із параметрів рівності (2.3.1) та $m = \text{const}$, то він називається *ізопроцесом*. Розрізняють три ізопроцеси:

– *ізотермічний* ($T = \text{const}$, закон Бойля – Маріотта):

$$p \cdot V = \text{const}, \text{ або } p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad (2.3.3)$$

– *ізохорний* ($V = \text{const}$, закон Шарля):

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (2.3.4)$$

– *ізобарний* ($p = \text{const}$, закон Гей-Люссака):

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2.3.5)$$

На основі *першого начала термодинаміки* кількість теплоти δQ , яка підводиться до системи, йде на заміну її внутрішньої енергії dU і на виконання роботи δA :

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (2.3.6)$$

Для ізобарного процесу $dA = pdV$ і для ν молів газу:

$$A = p \cdot (V_2 - V_1), \quad (2.3.7)$$

або з урахуванням (2.3.1):

$$A = \frac{m \cdot R \cdot (T_2 - T_1)}{\mu}, \quad (2.3.8)$$

Звідси

$$R = \frac{A \cdot \mu}{m \cdot (T_2 - T_1)}. \quad (2.3.9)$$

Універсальна газова стала чисельно дорівнює роботі ізобарного розширення об'єму 1 моля ідеального газу при нагріванні його до температури 1 К.

Для ізохорного процесу: $dA = pdV = 0$ і $dQ = dU = C_V dT$, де C_V – молярна теплоємність при сталому об'ємі.

Отже,

$$Q = C_V \cdot (T_2 - T_1) = U. \quad (2.3.10)$$

Кількість теплоти при ізобарному процесі для 1 моля газу з урахуванням (2.3.8):

$$Q = C_V \cdot (T_2 - T_1) + R \cdot (T_2 - T_1) = (C_V + R) \cdot (T_2 - T_1) = C_P \cdot (T_2 - T_1),$$

де C_P – молярна теплоємність при сталому тиску.

Отже,

$$C_P = C_V + R \text{ (формула Майєра).}$$

Для вивчення законів ідеальних газів користуються лабораторною установкою (рис. 2.5.1), яка складається з герметичного гофрованого циліндра 1 з'єднаного з манометром М, нагрівника 2, термopари 3 для вимірювання температури (див. лаб. роб. 3.4), гвинта 4, лінійки 5 та кранів 6 і 7.

Хід роботи

I. Ізотермічний процес.

1. Встановити температуру нагрівника 2 за допомогою термостату (значення температури задається викладачем).
2. Відкрити крани 6 і 7, манометр М повинен показати нуль. Встановити положення циліндра, яке відповідає мінімальному об'єму.
3. Встановити гвинтом 4 максимальний об'єм у циліндрі 1. При цьому газ у циліндрі знаходиться під атмосферним тиском p_0 .
4. Закрити кран 7. Зменшуючи об'єм циліндра обертанням гвинта 4, виміряти кожного разу тиск p манометром М та висоту циліндра h за допомогою лінійки 5. Одержати 4 – 5 різних значень тиску і висоти.
5. Розрахувати об'єм повітря у циліндрі за формулою $V = S \cdot h$, де S – площа дна циліндра.
6. За формулою (2.3.3) розрахувати для кожного виміру добуток $p \cdot V$ та знайти його середнє значення $\langle p \cdot V \rangle$.
7. Результати вимірів та обчислень занести до таблиці 2.3.1
8. Побудувати графік $p = f(V)$. Пересвідчитись, що графік відповідає ізотермічному процесу (2.3.3).

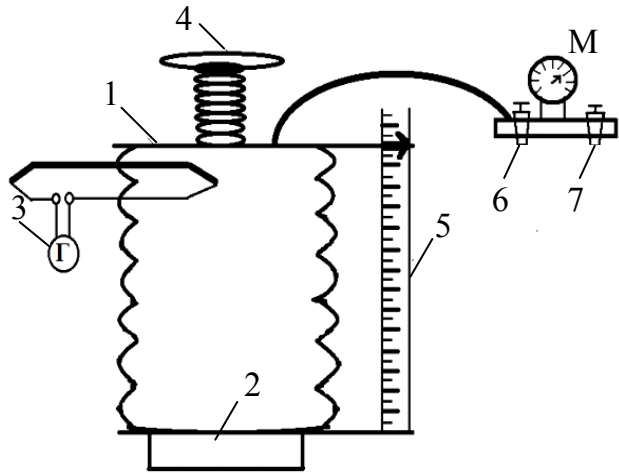


Рис. 2.5.1

Таблиця 2.3.1

№ п/п	h , м	s , м ²	V , м ³	p , Па	$p \cdot V$	$\langle p \cdot V \rangle$

II. Ізохорний процес.

1. Встановити на манометрі М нульовий показ. Записати значення тиску p і температури T .
2. Закрити кран 7 і ввімкнути нагрівник 2. Змінюючи температуру повітря через кожні 4 – 5 °С записувати значення тиску p .
3. Вимкнути електронагрівник.
4. Результати вимірів занести до таблиці 2.3.2

- Побудувати графік $p = f(T)$. Пересвідчитись, що графік відповідає ізохорному процесу (2.3.4).

Таблиця 2.3.2

№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$p, \text{Па}$

III. Изобарний процес.

- Відкрити крани 6 і 7. Записати початкові значення об'єму V_0 і температури T_0 . Зафіксувати початкове значення тиску p .
- Закрити кран 7 і увімкнути електронагрівник. Для підтримання сталого тиску ($p = \text{const}$) гвинтом 4 змінювати об'єм до відповідного значення початкового тиску. Записати значення об'єму і температури через кожні 4 – 5 $^\circ\text{C}$.
- Результати вимірів занести до таблиці 2.3.3
- Побудувати графік $V = f(T)$. Пересвідчитись, що графік відповідає ізобарному процесу (2.3.5).

Таблиця 2.3.3

№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$V, \text{м}^3$

Контрольні запитання

- Що таке ідеальний газ?
- Розповісти про мікроскопічні та макроскопічні параметри ідеального газу.
- Записати рівняння Клапейрона – Менделєєва.
- Написати рівняння ізопроцесів та навести їх графічне зображення.
- Записати перше начало термодинаміки та застосувати його для ізопроцесів.
- Дати визначення фізичного змісту універсальної газової сталої.
- Вивести формулу Майєра та пояснити її зміст.
- Дати визначення питомої та молярної теплоємності.
- Привести приклади ізопроцесів в природі.
- В яких галузях науки і техніки використовуються газові процеси?

Лабораторна робота № 2.4. ВИЗНАЧЕННЯ C_p/C_V ДЛЯ ПОВІТРЯ МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА

Мета роботи: вивчити ізопроееси в газах, теплоємність газів; експериментальним шляхом визначити відношення C_p/C_V для повітря і порівняти отримані дані із значеннями, розрахованими теоретично.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити наступний матеріал: внутрішня енергія газу; теплота та робота; перше начало термодинаміки; застосування першого начала термодинаміки до ізопроеесів; залежність теплоємності ідеального газу від виду проеесу; адіабатичний проеес; рівняння адіабати.

[3, §50-55; 4, т.1 §83, 87, 90; 6, §§ 4.3, 4.6, 4.7; 5.3.2].

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 2.3

Стан деякої маси газу визначається трьома термодинамічними параметрами: тиском p , об'ємом V і температурою T .

Рівняння, що зв'язують ці параметри, називаються *рівняннями стану*. Для ідеальних газів таким рівнянням є рівняння Менделєєва – Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad (2.4.1)$$

де m – маса газу, μ – молярна маса, R – універсальна газова стала.

Одним з проеесів, які можуть протікати у газах є адіабатичний проеес. *Адіабатичний проеес* є термодинамічним проеесом, який відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем. В цьому випадку, термодинамічна система не отримує теплоту ззовні і не віддає теплоту назовні.

Перше начало термодинаміки:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (2.4.2)$$

Оскільки для адіабатичного проеесу $\delta Q = 0$, то з (2.4.2):

$$A = -dU.$$

Тобто, в адіабатичному процесі робота виконується за рахунок зменшення внутрішньої енергії термодинамічної системи.

При адіабатичному процесі, на відміну від ізопроцесів, змінюються всі три параметри p , V , T .

Використовуючи рівняння стану (2.4.1) та перше начало термодинаміки (2.4.2) і, можна отримати рівняння для адіабатичного процесу, які носять назву *рівняння Пуассона*:

$$pV^\gamma = \text{const}; TV^{\gamma-1} = \text{const}; T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}. \quad (2.4.3)$$

В рівняннях (2.4.3) γ – коефіцієнт Пуассона, що знаходиться як:

$$\gamma = C_p / C_V, \quad (2.4.4)$$

де C_p і C_V – молярні теплоємності при постійному тиску і об'ємі відповідно.

Із кінетичної теорії газів випливає, що $C_V = \frac{i}{2}R$,

$C_p = C_V + R = \frac{i+2}{2}R$, де i – число степенів свободи, яке показує число незалежних рухів, які молекула ідеального газу здатна здійснити в просторі; $i = 3$ – для одноатомного газу, $i = 5$ – для двоатомного газу, $i = 6$ – для три- та багатоатомного газу (в даному випадку не враховуються коливальні степені свободи).

Тоді:

$$\gamma = \frac{i+2}{i} \quad (2.4.5)$$

Одним із найпростіших методів визначення відношення C_p/C_V є метод Клемана і Дезорма, що ґрунтується на застосуванні адіабатичного процесу.

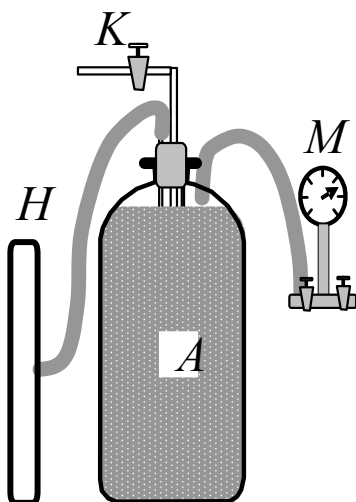


Рис. 2.4.1

Експериментальна установка (рис. 2.4.1) складається з скляного балона A (ємністю 20 л), який за допомогою двох вакуумних гумових трубок з'єднується відповідно з манометром (M) та насосом (H). Насос через пасову передачу сполучено з електричним двигуном. Кран (K) дозволяє з'єднувати балон з атмосферою.

Надлишковий, порівняно з атмосферним, тиск повітря (Δp) в балоні (A) вимірюється манометром, сполученим з гумовою трубкою вхідним краном.

Опишемо експеримент і покажемо термодинамічні процеси, що відбуваються, на діаграмі стану газу в параметрах (pV) (рис. 2.4.2).

З допомогою насоса накачаємо в балон деяку кількість повітря. При накачуванні повітря здійснюється деяка робота, що викликає підвищення температури повітря в балоні. Зупинивши накачування, чекаємо деякий час, щоб дати можливість повітрю, що знаходиться в балоні, охолотитися до температури навколишнього середовища T_1 . Тиск накачаного повітря при цьому дорівнює p_1 , тобто є вищим за атмосферний тиск p_0 (рис. 2.4.2). Будемо вважати цей стан першим: (p_1, V_1, T_1) .

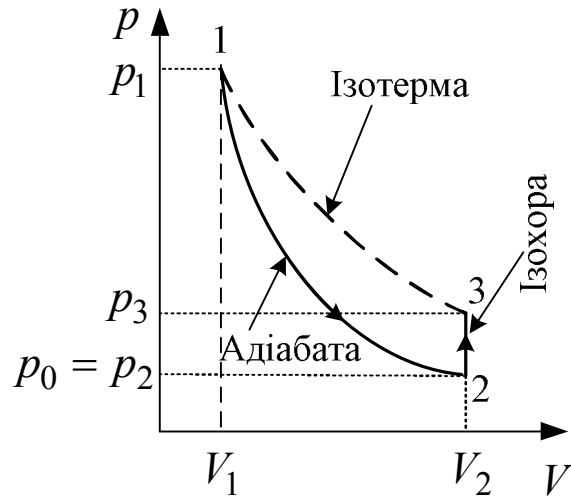


Рис. 2.4.2

Відкриємо кран K , що сполучає балон A з атмосферою (рис. 2.4.1). Тиск газу починає зрівнюватися з атмосферним, а його температура спочатку дещо знизиться через швидке розширення, а потім знову почне наближатися до кімнатної.

Якщо теплопровідність стінок балона є малою (скло має низький коефіцієнт теплопровідності), а отвір крану K достатньо великим, то вирівнювання тиску відбувається значно швидше, ніж вирівнювання температури, тобто:

$$\Delta\tau_p \ll \Delta\tau_T, \quad (2.4.6)$$

де через $\Delta\tau_p$, $\Delta\tau_T$ позначено відповідно час вирівнювання тиску та температури.

Нехай кран K був відкритий протягом проміжку часу $\Delta\tau$ такого, що:

$$\Delta\tau_p \ll \Delta\tau \ll \Delta\tau_T. \quad (2.4.7)$$

В цьому випадку теплообміном, що відбувається за час $\Delta\tau$ через стінки балона, можна знехтувати і процес розширення вважати *адіабатичним*. Газ перейде до стану 2 з параметрами (p_2, V_2, T_2) .

З рівняння адіабатичного процесу (2.4.3) знайдемо:

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma}. \quad (2.4.8)$$

Відмітимо, що в кінці адіабатичного розширення тиск p_2 дорівнює атмосферному тиску p_0 , а температура T_2 виявляється дещо нижча за кімнатну температуру T_1 (температура газу знижується, оскільки робота розширення здійснюється за рахунок зменшення внутрішньої енергії газу).

Після того, як краном K знову від'єднаємо балон від атмосфери, внаслідок чого почнеться повільне ізохоричне нагрівання газу зі швидкістю, що визначається теплопровідністю скляних стінок. Разом із зростанням температури росте і тиск газу. За час $\Delta\tau \approx \Delta\tau_T$ система досягає рівноваги, і температура, що встановлюється, T_3 стає рівною кімнатній температурі T_1 . Газ перейде до стану 3 з параметрами (p_3, V_2, T_1) .

Процес вирівнювання температури при закритому крані підлягає дії закону Гей-Люссака:

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} = \frac{p_3}{T_1}. \quad (2.4.9)$$

Виключаючи з допомогою (2.4.9) відношення температур T_1/T_2 із (2.4.8), знайдемо:

$$\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\gamma} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1}. \quad (2.4.10).$$

Розв'яжемо це рівняння (2.4.10) відносно γ :

$$\gamma = \frac{\ln(p_1/p_2)}{\ln(p_1/p_3)} = \frac{\ln(p_1/p_0)}{\ln(p_1/p_3)}. \quad (2.4.11)$$

Для нашого випадку тиски p_1 та p_3 мало відрізняються від p_0 і формулу (2.4.11) можна суттєво спростити. Введемо позначення:

$$p_1 = p_0 + \Delta p_1, \quad p_2 = p_0 + \Delta p_2 \quad (2.4.12)$$

Враховуючи (2.4.12) та розкладаючи логарифмічну функцію (2.4.11) в ряд Тейлора і нехтуючи членами другого порядку малості,

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\ln[(p_0 + \Delta p_1)/p_0]}{\ln(p_0 + \Delta p_1) - \ln(p_0 + \Delta p_2)} = \\ \text{отримаємо:} & \\ &= \frac{\ln[1 + (\Delta p_1/p_0)]}{\ln[1 + (\Delta p_1/p_0)] - \ln[1 + (\Delta p_2/p_0)]} ; \\ & \gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}. \end{aligned} \quad (2.4.13)$$

Як видно з (2.4.13), для визначення відношення молярних теплоємностей C_p/C_V необхідно знати надлишковий (над атмосферним) тиск в балоні до адіабатичного розширення газу та його надлишковий тиск після ізохоричного нагрівання.

Необхідно підкреслити, що обидві величини повинні вимірюватися в стані термодинамічної рівноваги, тобто після закінчення теплообміну.

Хід роботи

1. Перед початком роботи необхідно впевнитися, що крани та місця з'єднання трубок є достатньо герметичними.
2. Закрити кран K , таким чином від'єднавши балон від атмосфери.
3. Пересвідчитись, що вхідний кран манометра відкритий, а випускний кран закритий.
4. Включити електричний привід форвакуумного насоса та накачати в балон повітря до надлишкового тиску, рівного $\Delta p_1 = 1 \dots 1,5$ атм. Термометр при цьому покаже незначне підвищення температури.
5. Дочекатися, доки температура в балоні не знизиться до кімнатної.
6. Відкрити на короткий час кран K , щоб надлишковий тиск Δp_1 впав до нуля, та знову його закрити (це досягається поворотом ручки крана K на 180°). Температура повітря в балоні при цьому дещо знизиться.
7. Після встановлення термодинамічної рівноваги (температура газу зрівняється з кімнатною через деякий час $\sim \Delta \tau_T$) манометром зафіксувати надлишковий тиск повітря в балоні Δp_2 .
8. За отриманими даними з допомогою (2.4.13) визначити γ .

9. Дослід повторити не менше 3 разів. Результати вимірювань занести до таблиці 2.4.1.
10. Порівняти експериментально отримане в роботі значення γ із теоретичним значенням для повітря.

Таблиця 2.4.1

№ дослідю	Δp_1 , МПа	Δp_2 , МПа	γ	$\langle \gamma \rangle$

Контрольні запитання

1. Сформулювати та записати перше начало термодинаміки.
2. Дати означення адіабатичного процесу.
3. Застосувати перше начало термодинаміки до адіабатичного процесу.
4. Зобразити графічно ізотермічний та адіабатичний процеси в p - V координатах.
5. Що називається теплоємністю речовини? Дати означення.
6. Визначити одиницю вимірювання молярної та питомої теплоємності.
7. Чому $C_p > C_V$? Доведіть, що різниця $C_p - C_V$ молярних теплоємностей ідеального газу дорівнює універсальній газовій сталій.
8. Записати рівняння Пуассона для адіабатичного процесу.
9. Що таке число степенів свободи? Як це число пов'язане з коефіцієнтом Пуассона?
10. Знаючи γ (із дослідю), розрахуйте число степенів свободи молекули повітря.
11. Які процеси відбуваються з термодинамічною системою (повітря, що знаходиться в балоні) при виконанні даної роботи?
12. Як пояснити утворення туману в балоні при миттєвому випусканні стиснутого повітря?
13. Навести приклади адіабатичних процесів в природі та їхнього застосування в техніці.

Лабораторна робота № 2.5. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЕФІЦІЄНТА ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Мета роботи: вивчити механізм теплового розширення твердих тіл, визначити коефіцієнт лінійного розширення алюмінію, розрахувати коефіцієнт об'ємного розширення та порівняти отримані значення з табличними величинами.

Вказівки до виконання роботи.

Для виконання роботи необхідно вивчити наступний матеріал: теплове розширення твердих тіл, ангармонізм міжмолекулярних взаємодій. [3, §476; 4, с.173, 223; 6, §§ 4.9, 4.14, 4.15, 5.1.1, 5.3.4;

Теплове розширення твердих тіл – це властивість тіл, пов'язана зі збільшенням своїх лінійних розмірів (лінійне розширення) чи об'єму (об'ємне розширення) при нагріванні. Теплове розширення в природі, побуті та техніці може бути як корисним так і шкідливим; його обов'язково потрібно враховувати при проектуванні деталей та механізмів, які передбачається експлуатувати в широкому діапазоні температур, оскільки при тепловому розширенні можуть виникати додаткові напруження, непередбачені деформації, руйнування тощо.

Для того щоб пояснити явище теплового розширення твердих тіл, необхідно враховувати їх молекулярну будову, та сили взаємодії між молекулами. Ці сили проявляються на відстанях $\leq 10^{-9}$ м і досить швидко спадають із збільшенням відстані, тому вони є короткодійними і є електромагнітними за своєю природою.

На відстані порядку 10^{-9} м діють сили притягання F_{np} , а на відстанях порядку 10^{-10} м – сили відштовхування $F_{від}$. Вважають, що сили притягання є від'ємні, сили відштовхування – додатні. Сила міжмолекулярної взаємодії $F_{рез}$ є рівнодійною сил притягання та відштовхування (рис. 2.5.1). Із досвіду та теорії слідує, що:

$$F_{np} = \frac{a}{r^7}; F_{від} = \frac{b}{r^m}, \quad 9 < m < 15.$$

Часто приймають $m = 13$, де коефіцієнти a та b залежать від структури молекул.

На рис. 2.5.1,а наведені графіки залежності сил відштовхування та притягання від відстані між молекулами. При відстанях між молекулами r_0 сили притягання рівні силам відштовхування ($F_{рез} = 0$) та система знаходиться в стані стійкої рівноваги. Це положення відповідає мінімальній потенціальній енергії (рис. 2.5.1,б). При абсолютному нулі температури молекули твердого тіла знаходяться в *положенні рівноваги* при $r = r_0$. З підвищенням температури збільшується амплітуда коливання атомів таким чином, що зростання сил відштовхування між атомами переважає над зростанням сил притягання. Якщо відкласти на графіку потенціальної енергії (рис. 2.5.1,б) значення повної енергії W і провести від цього значення лінію паралельну осі абсцис, то вона перетне графік у двох точках r_1 та r_2 між якими періодично змінюється відстань між молекулами. Середня відстань між цими точками $r_0(T)$ є рівноважною відстанню між молекулами тіла при даній температурі. Іншими словами, атому енергетично „легше” віддалитися від сусіда, аніж наблизитися, що призводить до зростання середньої відстані між атомами (позначено зірочками на рис. 2.5.1,б).

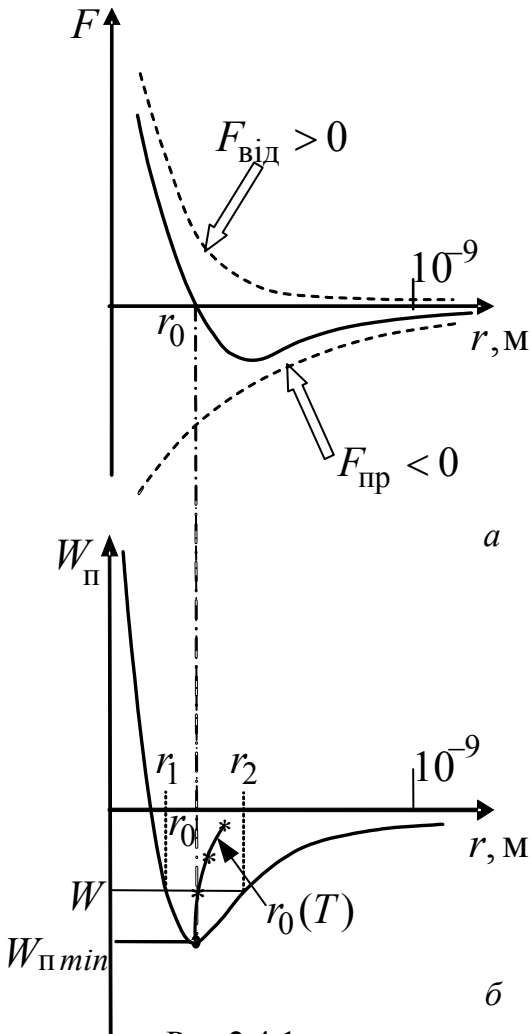


Рис.2.4.1

а

б

Глибина потенціальної ями $|W_{пmin}|$ на рис. 2.5.1,б визначає роботу, яку необхідно виконати проти сил притягання, для того щоб із рівноважної відстані розвести на нескінченність. Оскільки середня кінетична енергія хаотичного теплового руху має порядок kT , то агрегатний стан речовини буде суттєво залежати від співвідношення між $|W_{пmin}|$ та kT .

а) у випадку $|W_{пmin}| \ll kT$, притягання між молекулами набагато більше за енергію теплового руху, тому речовина знаходяться у твердому

агрегатному стані. З цієї умови випливає також що при дуже низьких температурах, будь-які речовини переходять у *твердий агрегатний стан*.

б) у випадку $|W_{\text{пmin}}| \approx kT$, завдяки тепловому руху, молекули будуть переміщуватись в просторі обмінюючись місцями, але на відстані, які несуттєво перевищують r_0 , тому речовина буде знаходитись у *рідкому агрегатному стані*.

в) у випадку $|W_{\text{пmin}}| \ll kT$, інтенсивний тепловий рух буде перешкоджати притяганню молекул, тому речовина знаходяться у *газоподібному агрегатному стані*.

В залежності від розташування молекул в речовині, всі тіла поділяють на *кристалічні* та *аморфні*. *Кристалічні тіла* мають правильне періодичне розташування молекул, яке зберігаються на дуже великих відстанях, тобто, мають дальній порядок. В *аморфних тілах* періодичне розташування молекул зберігається лише на малих відстанях від будь-якої молекули. Таки чином, в аморфних тілах є лише ближній порядок в розташуванні молекул. Переважна більшість твердих тіл мають кристалічну структуру, а аморфний стан притаманний таким речовинам як, наприклад, полімери, скло, бітуми, смола тощо.

Кількісно теплове розширення характеризується *коефіцієнтом лінійного розширення*, що визначається як:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (2.5.1),$$

де l_0 – початкова довжина тіла, Δl – видовження тіла при нагріванні на ΔT градусів Кельвіна.

Величина α характеризує відносне видовження $\Delta l/l_0$, що відбувається при нагріванні тіла на один градус Кельвіна та залежить від хімічної природи самого матеріалу (або хімічного складу сплаву), попередньої його термічної обробки тощо і незначно залежить від температури.

Зміна довжини нагрітого тіла з температурою, визначається:

$$l = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta T). \quad (2.5.2)$$

Об'єм твердого тіла V при нагріванні зростає в першому наближенні пропорційно першій степені приросту температури:

$$V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (2.5.3)$$

де V_0 – початковий об’єм тіла, β – коефіцієнт об’ємного розширення в інтервалі температур ΔT , що характеризує відносне видовження об’єму $\Delta V/V_0$, що відбувається при нагріванні на один градус Кельвіна:

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T}. \quad (2.5.4)$$

Для ізотропних твердих тіл в першому наближенні коефіцієнти лінійного та об’ємного розширення пов’язані співвідношенням:

$$\beta = 3\alpha. \quad (2.5.5)$$

Для більшості твердих тіл α має порядок величини $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Найменший коефіцієнт лінійного розширення мають такі матеріали як інвар – сплав нікелю та заліза (36,1% нікелю, $\alpha = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), алмаз ($\alpha = 0,91 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) та плавлений кварц ($\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Ці речовини отримали широке застосування в прецесійному приладобудуванні. Найбільший коефіцієнт лінійного розширення властивий таким матеріалам як свинець та цинк ($\alpha = 29 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ебоніт ($\alpha = 70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), дерево ($\alpha = 60 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), лід ($\alpha = 50,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Лабораторна установка (рис. 2.5.2) складається з довгого нагрівника (A), всередині якого знаходиться досліджуваний алюмінієвий стержень (B), що нерухомо закріплений з одного боку. З протилежного боку на вільному кінці стержня нанесена відмітка, яка спостерігається у вікні нагрівника з допомогою зорового мікроскопа (C).

При вмиканні приладу за допомогою вмикача D, металевий стержень, який нагрівається за допомогою нагрівника A, починає видовжуватися. Зміна лінійного розміру (довжини) стержня фіксується індикатором годинникового типу C.

Ціна поділки шкали індикатора годинникового типу C становить 0,01 мм (рис. 2.5.3).

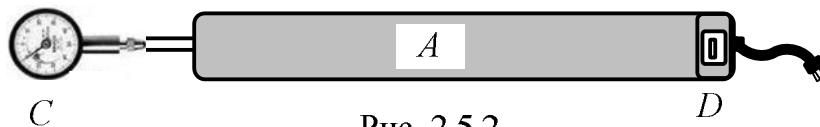


Рис. 2.5.2

Хід роботи

1. Навчитись користуватись зоровим мікроскопом.
2. Зафіксувати початкове положення відмітки на стержні відносно нульової поділки шкали зорового мікроскопа.

3. Ввімкнути установку та включити тумблер D нагрівника.
4. З допомогою термометра, розміщеного на корпусі нагрівника, відмічати температуру стержня t °С, фіксуючи при цьому переміщення відмітки на величину Δl при нагріванні на Δt градусів. Вимірювання проводити з кроком нагрівання $\Delta t = 10$ °С ($\Delta T = 10$ К) до температури 100 °С.
5. Отримані дані занести до таблиці 2.5.1.
6. Побудувати графік залежності $\Delta l = f(T)$.
7. З прямолінійної ділянки графіка знайти відношення $\Delta l / \Delta T$.
8. Користуючись формулою (2.5.1), знайти α . Початкова довжина стержня вказана на робочій установці.
9. Користуючись формулою (2.5.5) обчислити коефіцієнт об'ємного розширення β .
10. Порівняти отримані дані з табличними величинами для алюмінію.

Таблиця 2.5.1

№ п/п	t , °С	Δl , м	l_0 , м	$\Delta l / \Delta T$, м/К	α , К ⁻¹	β , К ⁻¹

Контрольні запитання

1. Побудуйте та поясніть графічну залежність сил та потенціальної енергії взаємодії між молекулами.
2. Які агрегатні стани речовини Ви знаєте? В чому полягає їхня відмінність з точки зору співвідношення між мінімальною потенціальною енергією взаємодії W_{min} та енергією теплового руху kT ?
3. Чим відрізняються кристалічний та аморфний стан речовини?
4. Що таке теплове розширення речовини та чим воно зумовлене?
5. Дати означення температурних коефіцієнтів лінійного та об'ємного розширення. Який зв'язок між цими величинами для твердого тіла?
6. Запишіть формули залежності довжини та об'єму твердих тіл від температури.
7. Наведіть приклади, де потрібно враховувати теплове розширення твердих тіл. Поясніть чому?

Модуль 3. ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ

Лабораторна робота № 3.1. ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТЕНЦІАЛУ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи: вивчити характеристики електростатичного поля, експериментально дослідити характер електростатичного поля; визначити еквіпотенціальні поверхні та лінії напруженості.

[1, т.2, §§ 2.1–2.3, 2.6; 2, §§ 96–98, 100, 101; 3, §§ 8.9; 4, т.2, §§ 31, 33–36]

Вказівки до виконання роботи

Електростатичні поля створюються нерухомими електричними зарядами. Таке поле характеризують в кожній точці простору вектором напруженості \vec{E} , який є його силовою характеристикою і електростатичним потенціалом Φ , який є його енергетичною характеристикою. *Напруженістю електростатичного поля* в будь-якій точці називають вектор \vec{E} , який чисельно дорівнює силі, з якою це поле діє на одиничний позитивний заряд q , вміщений в дану точку. Напрямок вектора \vec{E} співпадає з

напрямом дії сили \vec{F} на позитивний заряд:
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Потенціалом електростатичного поля в будь-якій точці називають скалярну фізичну величину φ , що чисельно дорівнює роботі, яку треба виконати проти сил електростатичного поля при переміщенні одиничного позитивного заряду з нескінченності в дану точку.

При переміщенні заряду q з точки a , потенціал якої дорівнює φ_a , в точку b з потенціалом φ_b , необхідно виконати роботу A :

$$A = q(\varphi_a - \varphi_b). \quad (3.1.1)$$

При переході від більшого потенціалу до меншого робота буде позитивною, тобто її виконують електричні сили. В протилежному випадку – роботу виконують сторонні сили.

Напрямок вектора напруженості поля та розподіл потенціалів можна зобразити наочно, якщо скористатися поняттям ліній напруженості поля (силовими лініями поля) та поняттям поверхні рівного потенціалу (еквіпотенціальними поверхнями). *Силіві лінії* (або *лінії напруженості*) еле-

ктростатичного поля – лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості \vec{E} . Лінії напруженості не перетинаються, оскільки в кожній точці поля вектор \vec{E} має лише один напрям.

Для наочності силові лінії проводять так, щоб число ліній N , яке пронизує одиничну площадку перпендикулярної до них поверхні, дорівнювало чисельному значенню вектора \vec{E} .

Еквіпотенціальною поверхнею називають геометричне місце точок з однаковим потенціалом. Еквіпотенціальні поверхні на площині зображають графічно у вигляді ліній (рис. 3.1.1), які прийнято проводити так, щоб різниця потенціалів між будь-якими двома сусідніми лініями була однакою. Згідно з фізичним змістом потенціалу лінії напруженості завжди перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь (рис. 3.1.1).

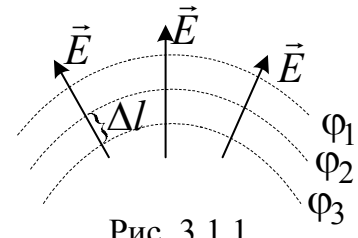


Рис. 3.1.1

Взаємна перпендикулярність ліній напруженості і поверхонь рівного потенціалу істотно полегшує експериментальне дослідження електростатичного поля: знайшовши лінії напруженості, можна визначити еквіпотенціальні поверхні, і навпаки, знайшовши поверхні рівного потенціалу, можна побудувати лінії напруженості.

Експериментально легше виміряти потенціали електростатичного поля, ніж його напруженість. Справа в тому, що більшість електровимірювальних приладів, і в першу чергу зонди в комбінації з електрометрами, різні індикатори струму в комбінації з потенціометрами, вимірюють різницю потенціалів між різними точками поля, а не його напруженість. Тому в більшості випадків, як і в нашій задачі, експериментально вивчають розподіл потенціалів в електростатичному полі, а не лінії напруженості. Силові лінії будують потім як лінії, перпендикулярні до експериментально знайдених поверхонь рівного потенціалу.

Зв'язок між \vec{E} та φ визначають за формулою: $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\varphi$, де $\text{grad}\varphi$ – чисельно дорівнює зміні потенціалу, який припадає на одиницю довжини силової лінії. Якщо поле однорідне, то

$$E = -\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta l}, \quad (3.1.2)$$

де Δl – відстань між поверхнями з потенціалами φ_1 та φ_2 (рис. 3.1.1).

Проте визначення еквіпотенціальних поверхонь за допомогою зондів теж не проста задача, оскільки в непровідному середовищі (наприклад, в повітрі) важко зрівняти потенціали зонда та досліджуваної точки поля. Тому в даній роботі вивчення електростатичного поля нерухомих зарядів замінено вивченням поля постійного електричного струму.

Заміна електростатичного поля еквівалентним по конфігурації електричним полем струму не завжди можлива. Така заміна можлива тоді, коли: 1) середовище однорідне; 2) провідність його надзвичайно мала в порівнянні з провідністю електродів. Виконання цих умов означає, що поле між електродами при проходженні струму буде таким самим, яким воно було б у вакуумі при наявності на електродах тільки нерухомих зарядів.

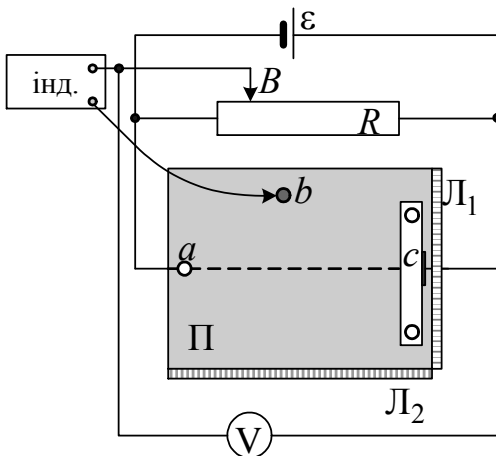


Рис. 3.1.2

В даній роботі електростатичне поле створюють між двома металевими електродами “*a*” і “*c*” різної форми, закріпленими на аркуші електропровідного паперу (рис. 3.1.2), до яких прикладають напругу від джерела електрорушійної сили ε . Такий папір має незначну провідність порівняно з матеріалом електродів, а тому поверхні електродів можна вважати еквіпотенціальними. Потенціал електрода “*c*” приймемо рівним нулю. Тоді потенціал електрода “*a*” буде дорівнювати 9 В.

Для вивчення розподілу потенціалів між електродами “*a*” і “*c*” вміщують в будь-яку точку між ними на папір Π металевий зонд “*b*”, з’єднаний через індикатор (вольтметр) з повзунком потенціометра R (точка B). Якщо між зондом “*b*” і точкою B є якась різниця потенціалів, то індикатор покаже наявність напруги. Змінюючи положення зонда “*b*”, знаходимо точки, які дають однакові покази напруги на індикаторі, фіксуючи одночасно їхні координати x та y за допомогою лінійок L_1 та L_2 . Дані точки мають однаковий потенціал. За результатами вимірів будемо серію еквіпотенціальних ліній, а потім – ліній напруженості досліджуваного електростатичного поля.

Хід роботи

1. Ввімкнути джерело живлення ε та встановити да допомогою потенціометра R на вольтметрі V напругу, меншу за 9 В (задає викладач).
2. Встановити зонд b на осьовій лінії ac електропровідного паперу П поблизу точки a . Записати покази індикатора, тобто потенціал Φ_1 та координати x_1 і y_1 на лінійках L_1 та L_2 цієї точки. Дані вимірювань занести до таблиці 3.1.1.
3. Пересуваючи зонд b вгору та донизу від осьової лінії ac зафіксувати точки з тим самим значенням потенціалу Φ_1 . Записати відповідні координати точок x_1 і y_1 у таблицю 3.1.1.
4. Пересунути зонд b вздовж осьової лінії до електроду c та повторити п.п. 2, 3 для двох інших точок з однаковим значенням потенціалів Φ_2 та Φ_3 (задаються викладачем).
5. Нанести на міліметровий папір для потенціалів Φ_1 , Φ_2 і Φ_3 точки з відповідними координатами x , y . Побудувати екіпотенціальні лінії (лінії рівного потенціалу) і провести лінії напруженості досліджуваного електростатичного поля (рис. 3.1.1).
6. Розрахувати напруженість поля за формулою (3.1.5) у заданій викладачем точці.

Таблиця 3.1.1

x_1 , см	y_1 , см	Φ_1 , В	x_1 , см	y_1 , см	Φ_2 , В	x_1 , см	y_1 , см	Φ_3 , В	Δl , м	E , В/м

Контрольні запитання

1. Що таке електростатичне поле?
2. Дайте визначення напруженості та потенціалу електростатичного поля. Який зв'язок між ними? Дайте поняття градієнту потенціалу.
3. У чому полягає принцип суперпозиції електричних полів?
4. Що таке силові лінії електростатичного поля?
5. Що таке екіпотенціальні поверхні електростатичного поля?
6. Як графічно зображуються електростатичні поля?
7. Як експериментально досліджували в роботі електростатичне поле?
8. Що таке електростатичний захист?

Лабораторна робота № 3.2. ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРОВІДНИКА ЗА ДОПОМОГОЮ АМПЕРМЕТРА ТА ВОЛЬТМЕТРА

Мета роботи: вивчити закони постійного струму на прикладі розгалужених кіл; визначити невідомий опір методом вимірювання напруги та струму при різних способах вмикання приладів.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: електричний струм; сила струму та його густина; закон Ома для однорідної та неоднорідної ділянок кола; опір провідників; правила Кірхгофа для розгалужених кіл.

[1, т.2, §§ 2.1–2.3, 2.6; 2, §§ 96–98, 100, 101; 3, §§ 8.9; 4, т.2, §§ 31, 33–36]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 3.1.

Електричним струмом впорядковане переміщення заряджених частинок (носіїв заряду). *Струмом провідності* називають направлений рух вільних носіїв заряду у провідному середовищі. Струми, які утворюються у процесі руху заряджених тіл, називають *конвекційними*, а короточасні електричні струми, що виникають у діелектричних середовищах внаслідок зміщення зв'язаних зарядів під дією зовнішнього електричного поля – *струмами поляризації*. За напрям струму вважають напрям руху позитивних зарядів. У металах напрям струму є протилежним до напрямку направленої руху електронів.

Основними умовами виникнення струму у провіднику є:

- 1) наявність вільних носіїв заряду,
- 2) створення і підтримання у провіднику електричного поля.

Кількісною мірою електричного струму є сила струму і його густина.

Сила струму – скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Одиницею вимірювання сили струму є 1 А (ампер).

Густина струму – векторна фізична величина, що чисельно дорівнює електричному заряду, який переноситься через перпендикулярний

до напрямку руху носіїв переріз одиничної площі провідника за одиницю часу:

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} = \frac{d^2q}{dt \cdot dS} \vec{n},$$

де dS – площа перерізу провідника; \vec{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні перерізу провідника.

Постійним електричним струмом називають такий струм, значення і напрям якого не змінюються, тобто $\vec{j} = \text{const}$.

Для визначення силу струму в електричних колах використовують закони Ома. Під електричним колом розуміють систему, яка складається із джерел струму (з електрорушійною силою ε , опором r) і споживачів електричної енергії (з опором R), з'єднаних між собою провідниками.

Закон Ома для однорідної ділянки кола, на який діють тільки кулонівські сили (тобто ділянки, яка не містить джерела струму, $\varepsilon = 0$, $r = 0$):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}. \quad (3.2.1)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2$ – різниця потенціалів на кінцях ділянки кола, U – напруга; R – зовнішній опір, тобто опір всіх елементів ділянки кола, крім джерела струму.

Якщо у колі діють і сторонні сили, *то закон Ома для неоднорідної ділянки кола*, тобто ділянки, яка містить джерело струму, буде:

$$I = \frac{U}{R + r} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon}{R + r},$$

де ε – електрорушійна сила джерела струму; r – внутрішній опір джерела струму.

У разі *замкненого (повного) кола*, тобто при $\varphi_1 = -\varphi_2$, маємо:

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

Електричний опір провідника – це скалярна фізична величина, яка є властивістю провідника щодо перешкоджання упорядкованому рухові носіїв заряду вздовж нього і вимірюється в омах: 1 Ом – це опір такого провідника, по якому протікає струм в 1 А при напрузі на кінцях в 1 В.

Наявність опору у металевих провідників першого роду пов'язана із розсіюванням енергії електронів провідності на теплову енергію коли-

вань кристалічної решітки або неоднорідності її структури (домішки, дефекти). Цей опір інакше називають активним, або омичним, оскільки розрізняють ще реактивний (індуктивний і ємнісний) опір у колах змінного струму.

Опір провідника залежить від матеріалу, параметрів (довжини, площі поперечного перерізу) та температури. Для провідника циліндричної форми: $R = \rho \frac{l}{S}$, де ρ – питомий опір матеріалу, з якого виготовлений провідник, вимірюється в 1 Ом·м; l – довжина провідника; S – площа поперечного перерізу провідника.

Існує декілька способів вимірювання електричних опорів. Для безпосереднього вимірювання опорів застосовують омметри. Але часто використовують найпростіший спосіб вимірювання опорів – метод прямого вимірювання струму та напруги за допомогою амперметра і вольтметра.

Як і до інших вимірювальних приладів, до амперметрів та вольтметрів висувають такі вимоги: при вмиканні їх у коло не повинно відбуватись помітної зміни режиму роботи всього кола або окремих його ділянок.

Для того, щоб виміряти величину струму, необхідно через прилад пропустити увесь цей струм (або наперед відому його частину), тому *амперметр потрібно вмикати послідовно* у розрив тієї ділянки мережі, де необхідно виміряти струм. Однак при такому підключенні опір амперметра збільшить загальний опір кола і зменшить струм у ньому. Щоб цей ефект зменшити, обмотку амперметрів роблять із невеликої кількості витків дроту великої товщини, завдяки чому обмотка має невеликий опір.

Для вимірювання напруги між будь-якими двома точками електричного кола до них *паралельно підключають вольтметр*, при цьому частина струму буде відгалужуватись через нього. Щоб зменшити вплив вольтметра на коло, опір вольтметра роблять значно більшим, ніж опір ділянки кола. Тому струм, який проходить через вольтметр, дуже малий.

Якщо амперметр і вольтметр задовольняють названим вимогам, то за їхніми показами величину невідомого опору розраховують, використовуючи закон Ома для ділянки кола (3.2.1).

Задачею цієї роботи є визначити похибку при користуванні формулою (3.2.1). На рис. 3.2.1 та рис. 3.2.2 наведено дві можливі схеми підключення амперметра і вольтметра для визначення невідомого опору.

Першу схему (рис. 3.2.1) використовують для вимірювання малих опорів (порівняно з опором вольтметра). Амперметр у цій схемі вимірює загальний струм, який протікає і по опорі R_X , і по обмотці вольтметра. Якщо опір R_X малий, то по ньому проходить майже весь струм, оскільки струм, який тече через вольтметр, дуже малий.

Невідомий опір можна знайти за формулою

$$R_X = U / (I - U / R_B), \quad (3.2.2)$$

де R_B – опір вольтметра. З формул (3.2.1) і (3.2.2) видно, що $R < R_X$. Причому, чим більший опір вольтметра, тим ближче R до R_X .

Другу схему (рис. 3.2.2) використовують для вимірювання великих опорів (порівняно з опором амперметра). Вольтметр у цій схемі вимірює спад напруги і на опорі R_X , і на обмотці амперметра. Оскільки опір R_X дуже великий, на нього витрачається майже вся напруга мережі.

Невідомий опір можна знайти за формулою

$$R_X = (U / I) - R_A, \quad (3.2.3)$$

де R_A – опір амперметра. З формул (3.2.1) і (3.2.3) видно, що $R > R_X$. Причому, чим менший опір амперметра, тим ближче R до R_X .

Метод амперметра і вольтметра застосовують тоді, коли можна обійтись без великої точності вимірювань.

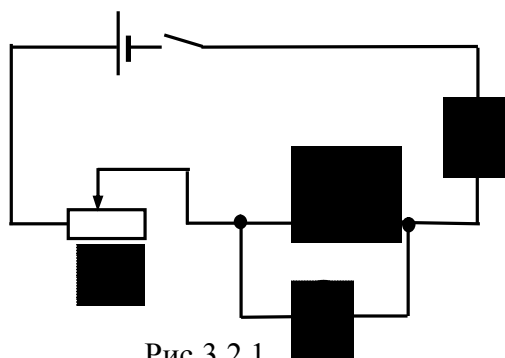


Рис.3.2.1

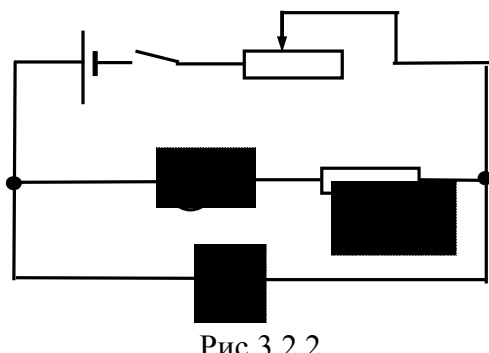


Рис.3.2.2

Хід роботи

1. Зібрати коло за схемою на рисунку 3.2.1.
2. Записати показання вольтметра U при трьох різних значеннях сили струму I . Результати вимірювань занести до таблиці 3.2.1.
3. Зібрати коло за схемою на рисунку 3.2.2

4. Записати показання вольтметра U при трьох різних значеннях сили струму I . Результати вимірювань занести до таблиці 3.2.2.
5. Розрахувати опір R за формулою (3.2.1), знайти його середнє значення $R_{\text{сеп}}$.
6. Обчислити опір R_X за формулою (3.2.2) та (3.2.3). Знайти середнє значення результатів $R_{X\text{сеп}}$ для кожної схеми вмикання приладів.
7. Виразити у процентах та порівняти, наскільки відрізняються результати розрахунків за формулою (3.2.1) від значення розрахованого опору за формулами (3.2.2) та (3.2.3):

$$\varepsilon = \frac{|R_{\text{сеп}} - R_{X\text{сеп}}|}{R_{\text{сеп}}} \cdot 100\%.$$

8. Результати обчислень занести до таблиці 3.2.1 та 3.2.2.

Таблиця 3.2.1

№ пор.	U , В	I , А	R , Ом (3.2.1)	R_X , Ом (3.2.2)	$R_{\text{сеп}}$, Ом	$R_{X\text{сеп}}$, Ом	ε , %

Таблиця 3.2.2

№ пор.	U , В	I , А	R , Ом (3.2.1)	R_X , Ом (3.2.3)	$R_{\text{сеп}}$, Ом	$R_{X\text{сеп}}$, Ом	ε , %

Контрольні запитання

1. Що називають електричним струмом? Які умови існування постійного струму?
2. Дайте означення сили струму та його густини.
3. Дайте означення різниці потенціалів, електрорушійної сили та напруги. Що таке однорідна та неоднорідна ділянка кола?
4. Запишіть закон постійного струму для неоднорідної ділянки кола. Покажіть, що це узагальнений закон, з якого можна дістати закон Ома як для ділянки, так і для замкненого кола.
5. Дайте означення опору провідника. Чим обумовлений опір провідника?
6. Як амперметр і вольтметр вмикають в коло. Чому саме так?

Лабораторна робота № 3.3. ГРАДУЮВАННЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА

Мета роботи: вивчити закони постійного струму, навчитися складати електричні кола, градуювати прилади для вимірювання струму і напруги та визначати ціну поділки шкали градуйованого гальванометра.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: електричний струм; сила струму та його густина; закон Ома для ділянки кола; опір провідників; правила Кірхгофа для розгалужених кіл. [1, т.2, §§ 2.1-2.3, 2.6; 2, §§ 96–98, 100, 101; 3, т.1, §§8, 31, 33-36]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 3.2.

При розрахунку сили струму, опору або ЕРС джерела струму на окремих ділянках розгалужених електричних кіл використовують правила Кірхгофа.

Розгалуженим колом називають коло, в якому є точки з'єднання трьох і більше провідників. Розгалужені кола характеризують:

- 1) *кількістю вузлів*, тобто таких точок, в яких сходяться три і більше провідників зі струмами.
- 2) *кількістю гілок (розгалужень)*, тобто ділянок кола, які з'єднують два сусідні вузли.
- 3) *кількістю незалежних контурів*, тобто замкнених кіл.

Перше правило Кірхгофа (правило вузлів) виражає закон збереження заряду і стосується вузлів розгалуженого кола: алгебраїчна сума сил струмів, які сходяться у вузлі, дорівнює нулеві:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

де n – кількість гілок, що сходяться у вузлі.

Правило знаків: струми, які входять до вузла, записують зі знаком “плюс”, а струми, які виходять із нього, зі знаком “мінус”.

Друге правило Кірхгофа (правило контурів) є узагальненням закону Ома для довільного контуру розгалуженого електричного кола: у замкненому контурі алгебраїчна сума спадів напруг (добутків сил струмів

на опори) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, які діють у цьому контурі:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i + \sum_{k=1}^m I_k r_k = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k,$$

де n – кількість гілок у контурі; m – кількість ЕРС у контурі.

Правила знаків: 1) за обходу контуру за довільно обраним напрямком доданки спадів напруг $\sum_{i=1}^n I_i R_i$ і $\sum_{k=1}^m I_k r_k$ беруться зі знаком “плюс”,

якщо напрямок обходу контуру збігається з напрямком струму, зі знаком “мінус”, якщо напрямок обходу контуру протилежний напрямку струму;

2) доданки $\sum_{k=1}^m \varepsilon_k$ беруться зі знаком “плюс”, якщо в разі обходу контуру

за довільно обраним напрямком джерело струму проходимо від негативного полюсу до позитивного, і зі знаком “мінус”, якщо джерело проходимо від позитивного полюсу до негативного.

У розв’язуванні задач, в яких розглядають розгалужені кола, варто дотримуватись певної послідовності дій.

На всіх ділянках схеми розгалуженого кола довільно позначити стрілками напрям струму.

1. Записати за першим правилом Кірхгофа кількість $n - 1$ рівнянь відповідно до правила знаків.
2. Довільно обрати напрям кожного простого контуру, наприклад, за рухом годинникової стрілки.
3. Записати за другим правилом Кірхгофа кількість $p - (n - 1)$ рівнянь відповідно до правила знаків, де p – кількість гілок кола. Обійти кожен контур треба двічі, перший раз – записуючи ліву частину рівняння відповідно до правила знаків, а другий раз – праву частину рівняння.

Перевірити, щоб усі електрорушійні сили й опори входили в отриману систему рівнянь, а кількість рівнянь дорівнювала кількості різних струмів у розгалуженому колі. Якщо внаслідок обчислення деякі струми матимуть знак “–”, то це означає, що їхні справжні напрями протилежні напрямам, позначеним на схемі.

У колах постійного та змінного струмів для вимірювання сили струму використовують амперметри, а для вимірювання напруги – вольтметри. Ці прилади виготовляються на основі одного й того ж самого вимірювального приладу – гальванометра і відрізняються один від одного внутрішнім опором та шкалою. Зазвичай гальванометр розрахований на вимірювання незначних струмів.

Для того, щоб гальванометром можна було виміряти великі струми, паралельно йому вмикають *шунт* – провідник із малим відомим опором $R_{\text{ш}}$, меншим за опір амперметра. Опір шунта має бути таким, щоб через гальванометр проходив струм не більше допустимого значення, а основна частина струму проходила через шунт. Схема такого підключення зображена на рис. 3.3.1.

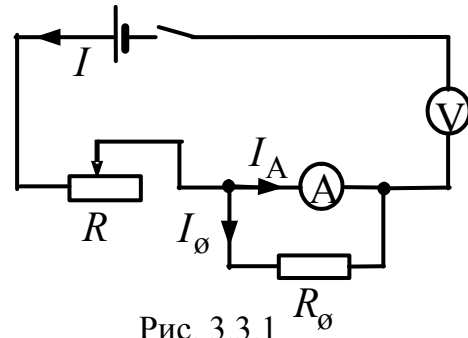


Рис. 3.3.1

Застосувавши закони Ома та правила Кірхгофа отримаємо формулу для розрахунку опору шунта:

$$R_{\text{ш}} = \frac{I_{\Gamma} \cdot R_{\Gamma}}{I - I_{\Gamma}}, \quad (3.3.1)$$

де I_{Γ} – максимальне значення сили струму, на яку розрахований гальванометр, I – максимальне значення сили струму, яку потрібно виміряти цим гальванометром, R_{Γ} – опір гальванометра.

При застосуванні гальванометра для вимірювання дуже великої напруги послідовно до нього вмикають додатковий достатньо *великий додатковий опір* $R_{\text{д}}$. Схема такого підключення зображена на рис. 3.3.2. При цьому загальний опір збільшується і струм у ньому, навіть при значній напрузі, не перевищує величини, допустимої для даного гальванометра. Додатковий опір розраховують за формулою, яку отримують із законів Ома та правил Кірхгофа:

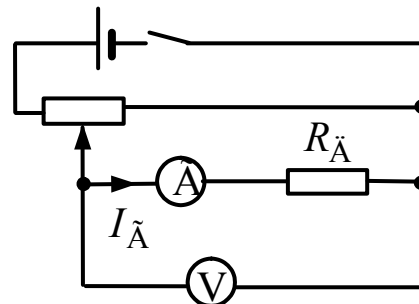


Рис. 3.3.2

$$R_{\text{д}} = \frac{U - I_{\Gamma} R_{\Gamma}}{I_{\Gamma}}, \quad (3.3.2)$$

де U – максимальна напруга, яку необхідно виміряти, а I_{Γ} – максимальне значення сили струму, на яку розрахований гальванометр.

Амперметри, як і вольтметри, часто виготовляють на різні діапазони струмів чи напруг. Для цього в корпусі приладу монтують два або декілька шунтів (чи додаткових опорів), які перемикачем з'єднуються з клемми гальванометра. В приладах, які мають кілька діапазонів вимірювання, максимальну силу струму (напругу) вказують біля перемикача діапазонів або біля відповідної клеми приладу.

Важливими характеристиками електровимірювальних приладів є ціна поділки шкали та клас точності приладу. *Ціна поділки K* – визначається зміною значення вимірюваної фізичної величини для переведення стрілки приладу до наступної поділки шкали. Для її визначення необхідно поділити максимальну силу струму (напругу), яку зможе виміряти даний прилад, на кількість поділок на шкалі приладу.

У даній роботі потрібно *проградувати* гальванометр, тобто за показами приладів з відомою ціною поділки шкали (еталонних) визначити ціну поділки шкали гальванометра.

При градуванні гальванометра як амперметра для зміни сили струму використовується реостат R_p (рис. 3.3.1). У цьому разі змінний опір R_p вмикають в коло послідовно. Для плавного регулювання струму змінний опір підбирають невеликим (кілька десятків Ом). Застосувавши правила Кірхгофа: $I = I_{\Gamma} + I_{\text{ш}}$; $I_{\Gamma} R_{\Gamma} = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}}$; $I_{\Gamma} = nK$, запишемо зв'язок показань еталонного амперметра з показаннями гальванометра:

$$I = nK [1 + R_{\Gamma} / R_{\text{ш}}] = ntg\Theta$$

де K – ціна поділки гальванометра; n – номер поділки; Θ – кут нахилу графічної залежності $I = f(n)$. Повний струм і номер поділки утворюють лінійну функцію, через тангенс кута нахилу якої знаходимо ціну поділки гальванометра, як амперметра:

$$K = tg\Theta = I/n \quad (3.3.3)$$

При градуванні гальванометра як вольтметра, для зміни сили струму використовують потенціометр (подільник або регулятор напруги) R_{Π} (рис. 3.3.2). У цьому разі загальний опір потенціометра повинен бути великим (декілька сотень Ом). Застосувавши правила Кірхгофа:

$U = I_{\Gamma} (R_{\Gamma} + R_{\text{д}})$, де $I_{\Gamma} = nK$, запишемо зв'язок показань еталонного вольтметра з показаннями гальванометра:

$$U = nK [R_{\text{д}} + R_{\Gamma}] = ntg\Theta,$$

де K – ціна поділки гальванометра; n – номер поділки, Θ – кут нахилу графічної залежності $U = f(n)$. Напряга і номер поділки утворюють лінійну функцію, через тангенс кута нахилу якої знаходимо ціну поділки гальванометра, як вольтметра:

$$K = tg\Theta = U/n \quad (3.3.4)$$

Іноді, особливо для приладів, розрахованих для вимірювання малих значень струмів та напруги, зручно розглядати не ціну поділки шкали, а *чутливість приладу* S , яку визначають лінійним або кутовим переміщенням покажчика (стрілки), що відповідає одиниці вимірюваної величини. Ціна поділки шкали та чутливість приладу обернено пропорційні одна одній, тобто:

$$S = 1/K. \quad (3.3.5)$$

Хід роботи

А. Градування гальванометра як амперметра

1. Зібрати коло за схемою (рис. 3.3.1).
2. Змінюючи за допомогою реостата R_p силу струму в колі, записати в таблицю 3.3.1 показання еталонного (в амперах) та градуйованого (в поділках) приладів.
3. За отриманими даними побудувати графік залежності показань градуйованого приладу від струму.
4. Користуючись графіком та формулою (3.3.3), визначити ціну поділки шкали градуйованого приладу та максимальну допустиму силу струму.
5. Розрахувати за допомогою формули (3.3.5) чутливість градуйованого приладу.
6. За формулою (3.3.1) розрахувати величину опору шунта $R_{\text{ш}}$.
7. Всі дані занести до таблиці 3.3.1.

Таблиця 3.3.1

№ пор.	n , поділок	I , А	K , А/поділ.	S , по діл./А	$R_{\text{ш}}$, Ом

Б. Градування гальванометра як вольтметра

1. Зібрати коло за схемою (рис. 3.3.2).
2. Змінюючи напругу за допомогою потенціометра R_{Π} , записати до таблиці 3.3.2 показання еталонного (у вольтах) та градуйованого (в поділках) приладів.
3. За отриманими даними побудувати графік залежності показань градуйованого приладу від напруги.
4. Користуючись графіком та формулою (3.3.4), визначити ціну поділки шкали градуйованого приладу та максимальну допустиму напругу.
5. Розрахувати за допомогою формули (3.3.5) чутливість градуйованого приладу.
6. За формулою (3.3.2) розрахувати величину додаткового опору $R_{\text{д}}$.
7. Всі дані занести до таблиці 3.3.2

Таблиця 3.3.2

№, пор.	n , поділок	U , В	K , В/поділ.	S , поділ./В	$R_{\text{д}}$, Ом

Контрольні запитання

1. Що називають електричним струмом?
2. Дайте означення сили струму та густини струму.
3. Що таке напруга на ділянці кола, різниця потенціалів, ЕРС?
4. Дайте означення опору. Від яких величин і як залежить опір провідника?
5. Що таке шунт? Як його використовують та яким чином вмикають в коло?
6. В яких випадках виникає потреба у застосуванні додаткового опору?
7. Як розрахувати опір шунта? Як розрахувати опір додаткового опору?
8. Що означає проградувати прилад?
9. Що таке ціна поділки і чутливість приладу?
10. Сформулюйте правила Кірхгофа. Доповніть їх правилами знаків.

Лабораторна робота № 3.4. ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ

Мета роботи: вивчити термоелектричні явища, проградувати термопару, засвоїти метод вимірювання температури за допомогою термопар.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: класична теорія електропровідності металів; робота виходу електронів з металу; контактна різниця потенціалів; термоелектричні явища та їхнє практичне використання.

[1, т.2 §§ 4.1 – 4.3, 4.6, 4.7; 2, §§ 240, 246, 247; 4, т.3 §§ 60, 62, 63]

Під *термоелектричними* розуміють фізичні явища зумовлені існуванням взаємозв'язку між тепловими та електричними процесами, що виникають у контактах металів (а також у напівпровідниках). При пропусканні струму через коло, що складається з різнорідних металів (рис. 3.4.1), крім тепла Джоуля – Ленца в одних спаях відбувається виділення, а в інших поглинання тепла. Фізичний зміст цього явища полягає в тому, що носії струму (електрони) в різних металах мають різне значення потенціальної енергії, тому у випадку переходу через спай в область з нижчим рівнем потенціальної енергії, вони віддають надлишок енергії кристалічній решітці, в результаті чого спай нагрівається. При зворотному переході носіїв струму відбувається охолодження спаю. Це явище носить назву явища Пельтьє та використовується в холодильних установках.

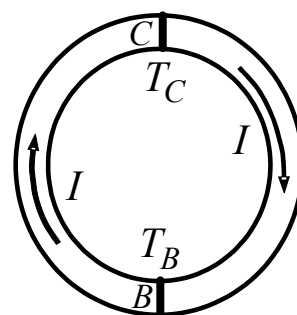


Рис. 3.4.1

Якщо здійснити контакт двох різних металів, то між ними виникає різниця потенціалів, яку називають контактною. *Контактна різниця потенціалів* обумовлена тим, що роботи виходів електронів з цих металів неоднакові, тому що різні рівні потенціальної енергії цих електронів, тобто рівень Фермі. *Рівнем Фермі* називається найвищий енергетичний рівень, зайнятий електронами при абсолютному нулі температур. При виникненні контакту між металами електрони з металу з більш високим рівнем Фермі (тобто з меншою роботою виходу) почнуть переходити на

більш низькі вільні рівні другого металу в якому рівень Фермі лежить нижче. Перехід буде відбуватися доти, поки рівні Фермі не вирівняються. Величина цієї різниці потенціалів, наприклад для контакту C (рис. 3.4.1) визначається формулою:

$$\Delta\varphi_C = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_C}{e} \ln \frac{n_1}{n_2},$$

де A_1 і A_2 – роботи виходів електронів з першого і другого металів, e – заряд електрона, k – стала Больцмана; T_C – температура контакту C ; n_1 та n_2 – концентрація електронів у першому і другому металах.

Якщо контакти з'єднати в точці B і підтримувати цей контакт при температурі T_B , то між точками BC кола виникне різниця потенціалів, що дістала назву *термоелектрорушійна сила* (термо-ЕРС):

$$\varepsilon = \Delta\varphi_B - \Delta\varphi_C = (T_B - T_C) \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2},$$

або
$$\varepsilon = \alpha (T_B - T_C) \quad (3.4.1)$$

Отже, якщо спаї C і B (рис. 3.4.1) підтримувати при різних температурах, то у колі потече струм. Це явище відкрито Зеебеком і назване на його честь:

Коефіцієнт $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ у формулі (3.4.1) називають *питомою термоелектрорушійною силою* даної пари металів. Вона показує як змінюється електрорушійна сила при зміні різниці температур спаїв на 1 К.

Для більшості пар металів α має порядок $10^{-5} \div 10^{-4}$ В/К; для напівпровідників вона може бути значно більшою (до $1,5 \cdot 10^{-3}$ В/К). Явище Зеебека використовується для створення приладів для вимірювання температур (термопар).

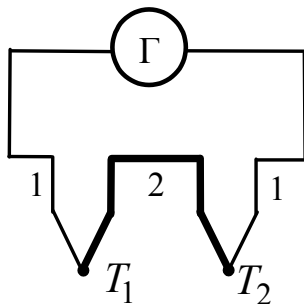


Рис. 3.4.2

Термопара – це пристрій що складається із контакту (спаю) двох різних металів (або сплавів) та приладу для вимірювання термоструму (рис. 3.4.2). Принцип дії термопари (в даному випадку диференціальної термопари) полягає у тому, що один спай вміщують у середовище, температуру якого слід виміряти, а другий – у середовище з ві-

домою сталою температурою (наприклад, у посудину з льодом при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Термопари мають ряд переваг порівняно зі звичайними термометрами: вони дають змогу вимірювати температуру в широкому діапазоні – від десятків до тисяч градусів абсолютної шкали.

Можливість встановлення гальванометра на значному віддаленні від термопари дає змогу проводити дистанційне вимірювання температури. Це дозволяє вимірювати, наприклад, розподіл температурного поля

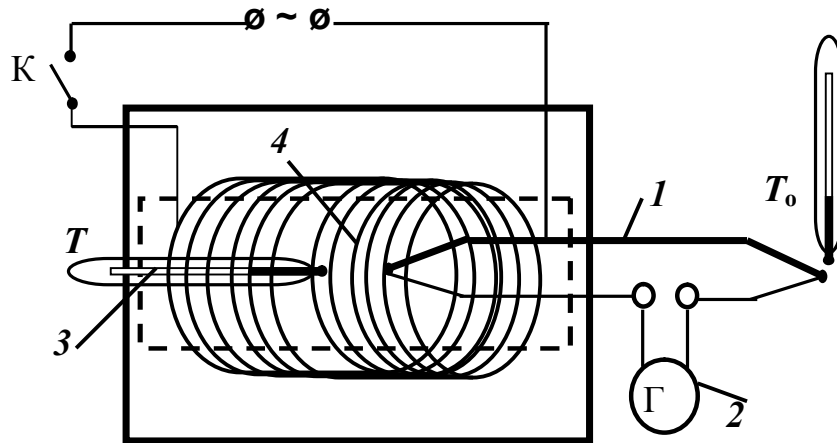


Рис. 3.4.3

в будівельних конструкціях при їх виготовленні або експлуатації. При вивченні фізико-хімічних процесів, які протікають при формуванні структури будівельного матеріалу, широко використовується диференціальний термографічний аналіз, у якому теплота, що виділяється або поглинається матеріалами, також вимірюється за допомогою термопар.

Схема установки для градування термопари (рис. 3.4.3) складається з термопари 1; приладу для вимірювання термоструму (гальванометра) 2; термометра гарячого спаю термопари 3, нагрівника 4. Холодний спай термопари перебуває при кімнатній температурі.

Метою даної роботи є *проградувати термопару* – це означає встановити залежність між термо-ЕРС та різницею температур гарячого та холодного спаїв термопари.

Хід роботи

1. У коло термопари ввімкнути прилад (рис. 3.4.3), що вимірює термострум (гальванометр 2).

- Визначити температуру холодного спаю T_0 , яка дорівнює температурі навколишнього повітря.
- Увімкнути нагрівник. Записати у таблицю 3.4.1 покази гальванометра n та термометра T , який вимірює температуру гарячого спаю (6-8 значень).
- Вимкнути нагрівник. У процесі охолодження записати температури гарячого спаю T , які відповідають тим самим показанням гальванометра n .
- Використовуючи характеристики гальванометра (C_{Γ} – ціну поділки шкали та R_{Γ} – внутрішній опір), розрахувати термо-ЕРС у вольтах:

$$\varepsilon = n \cdot C_{\Gamma} \cdot R_{\Gamma}.$$
- Обчислити середні значення температури, які відповідають раніше розрахованим значенням термо-ЕРС.
- Дані вимірювань та розрахунків занести до таблиці 3.4.1.
- Побудувати графічну залежність $\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$, де $\Delta T = T - T_0$ – різниця середньої температури гарячого T та холодного спаїв термопари T_0 .
- Визначити за допомогою графіка питому термо-ЕРС ($\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta(\Delta T)}$).

Таблиця 3.4.1

Показання гальванометра, поділки n	Термо-ЕРС ε , В	Температура гарячого спаю термопари, °С			Різниця температур $\Delta T = T_{\text{сер}} - T_0$
		при нагріванні	при охолодженні	Середнє значення $T_{\text{сер}}$	

Контрольні запитання

- Які термоелектричні явища Ви знаєте?
- Поясніть фізичну суть явища Зеебека.
- Що таке рівень Фермі? Як виникає контактна різниця потенціалів?
- Дайте означення термоелектрорушійної сили.
- Який фізичний зміст питомої термо-ЕРС α ?
- Що таке термопара? Що означає проградувати термопару?
- Застосування термопари та її переваги перед іншими приладами для вимірювання температури.

Лабораторна робота № 3.5. ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи: визначити горизонтальну складову індукції та напруженості магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: магнітне поле; індукція магнітного поля; закон Ампера; закон Біо – Савара – Лапласа; принцип суперпозиції магнітних полів; магнітне поле колового провідника зі струмом; напруженість магнітного поля.

[1, т.2 §§ 8.1, 8.2, 8.4; 2, §§ 109–112; 3, §§ 9.2–9.5; 4, т.2 §§ 40, 42, 44, 47, 51]

Магнітне поле – це складова загального електромагнітного поля, яка утворюється рухомими зарядами (струмами) або змінним електричним полем і діє тільки на рухомі заряди (струми).

Основною характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції \vec{B} . *Магнітна індукція* є векторною величиною, модуль якої дорівнює оберտальному моменту, що діє на рамку із струмом 1 А площею 1 м². За напрям вектора індукції приймається напрям від півдня “S” до півночі “N” магнітної стрілки, яка займає положення рівноваги в магнітному полі.

Магнітне поле можна зобразити графічно за допомогою ліній магнітної індукції, зображеними на рис. 3.5.1 тонкими лініями. *Лініями магнітної індукції (магнітними силовими лініями)* називають криві, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямком вектора \vec{B} в цих точках.

Крім магнітної індукції \vec{B} , вводиться ще одна характеристика – напруженість \vec{H} . Напруженість магнітного поля не залежить від магнітних властивостей середовища і характеризує магнітне поле, що його створює струм. У випадку однорідного та ізотропного середовища:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H},$$

де μ – відносна магнітна проникність середовища; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Застосовування компаса, магнітна стрілка якого завжди встановлюється в кожному місці Землі певним чином, свідчить про те, що Земля є магнітом і що у навколосемному просторі існує магнітне поле. Північний магнітний полюс – умовна точка на земній поверхні, в якій магнітне поле Землі направлено строго вниз (під кутом 90° до поверхні). Слід зазначити, що з фізичної точки зору цей полюс є «південним» S , оскільки притягує північний полюс стрілки компаса N (рис. 3.5.1).

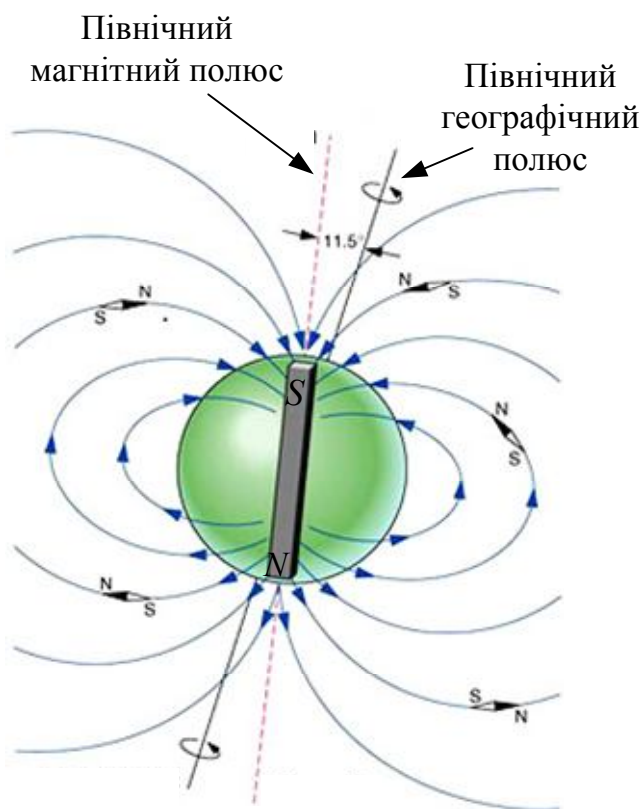


Рис. 3.5.1

Магнітні полюси Землі не збігаються (рис. 3.5.1) з її географічними полюсами. Магнітні полюси дрейфують з часом. Наприклад, магнітний полюс Північної півкулі знаходився у 1600 році на відстані близько 1300 км від географічного полюса, а тепер його відстань – до 2100 км.

Внаслідок розходження магнітних та географічних полюсів, між площиною магнітного меридіана (у цій площині встановлюється стрілка компаса) і площиною географічного меридіана для кожного місця Землі

завжди існує певний кут, який називається кутом схилення. Стрілка компаса встановлюється не горизонтально до поверхні Землі, а під деяким кутом, який називається кутом нахилу. Це означає, що лінії магнітного поля не паралельні поверхні Землі, а дещо нахилені. Кут нахилу неоднаковий для різних точок Землі. Силві лінії магнітного поля Землі на екваторі напрямлені горизонтально до її поверхні, біля магнітних полюсів – вертикально, а у всіх інших місцях – під деяким кутом.

Магнітне поле у кожній точці Землі характеризується горизонтальною складовою напруженості магнітного поля (проекцією напруженості

магнітного поля на горизонтальну площину), кутами схилення і нахилення.

Для визначення горизонтальної складової магнітної індукції B_{Γ} магнітного поля Землі у даній лабораторній роботі користуються тангенс-гальванометром, схему якого показано на рис. 3.5.2.

Тангенс-гальванометр складається з колової рамки, на яку намотано N витків провідника. Магнітна стрілка, насаджена на вертикальну вісь, може вільно обертатись тільки у горизонтальній площині, тому за її допомогою можна визначити тільки горизонтальну складову магнітного поля Землі.

При проходженні струму по коловому провіднику магнітна стрілка буде перебувати під дією двох магнітних полів – горизонтальної складової магнітної індукції поля Землі \vec{B}_{Γ} та

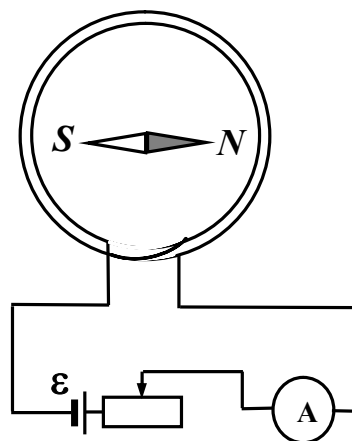


Рис. 3.5.2.

магнітного поля струму \vec{B}_C . Стрілка встановлюється (згідно з принципу суперпозиції магнітних полів) у напрямку *рівнодійної* індукції \vec{B} цих магнітних полів (рис. 3.5.3):

$$\vec{B} = \vec{B}_{\Gamma} + \vec{B}_C.$$

Якщо вісь магнітної стрілки при відсутності струму у рамці збігається з площиною рамки, то кут між B_{Γ} і B_C буде прямим і величини B_{Γ} і B_C будуть зв'язані між собою співвідношенням (рис. 3.5.3):

$$B_{\Gamma} = B_C \operatorname{ctg} \varphi, \quad (3.5.1)$$

де φ – кут відхилення магнітної стрілки (кут між векторами горизонтальної складової магнітної індукції поля Землі B_{Γ} та рівнодійної індукції B , (рис. 3.5.3).

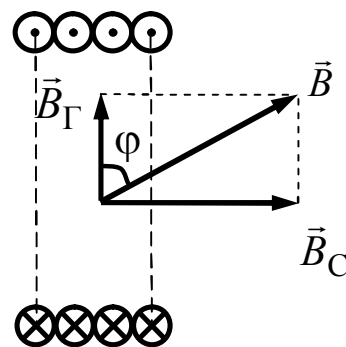


Рис. 3.5.3

За законом Біо – Савара – Лапласа індукція магнітного поля в центрі контуру у вигляді кола зі струмом I :

$$B_C = \mu\mu_0 \frac{IN}{2R}, \quad (3.5.2)$$

то робоча формула для підрахунку горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі записується так:

$$B_{\Gamma} = \mu\mu_0 \frac{IN}{2R} \operatorname{ctg}\varphi, \quad (3.5.3)$$

де R – радіус рамки; I – сила струму; N – кількість витків рамки; μ_0 – магнітна стала; μ – відносна магнітна проникність середовища (у даному випадку $\mu = 1$). У випадку, коли $\varphi = 45^0$, індукція магнітного поля струму дорівнює горизонтальній складовій індукції магнітного поля Землі.

Застосувавши зв'язок між вектором магнітної індукції та напруженістю магнітного поля можна записати для горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі:

$$H_{\Gamma} = \frac{B_{\Gamma}}{\mu\mu_0}; \quad (3.5.4)$$

або з урахуванням (3.5.2):

$$H_{\Gamma} = \frac{IN}{2R} \operatorname{ctg}\varphi. \quad (3.5.5)$$

Тангенс-гальванометр може бути використаний як гальванометр для вимірювання невеликого струму I , якщо відомі величини B_{Γ} , N та R . Тангенс кута відхилення магнітної стрілки пропорційний силі колового струму, тому прилад, який використовується в даній роботі для визначення горизонтальної складової індукції та напруженості магнітного поля Землі, називається тангенс-гальванометром.

Хід роботи

1. Скласти електричне коло за схемою на рисунку 3.5.2.
2. Звільнити магнітну стрілку з допомогою аретиру, рамку розмістити так, щоб магнітна стрілка знаходилась в площині рамки.
3. Визначити ціну поділки шкали компасу та амперметра.
4. Замкнути коло, реостатом встановити значення струму, вказане викадачем.
5. Відрахувати кількість поділок n' , на які відхилилась від нуля магнітна стрілка, при відхиленні стрілки вправо. Знайти кут відхилення стрілки вправо $\varphi' = n' \cdot c$, де c – ціна поділки компасу (визбирати кути, більші за 30^0).
6. Збільшуючи силу струму реостатом на 0,1 А тричі визначити значення кута відхилення магнітної стрілки та занести їх до таблиці 3.5.1.

7. Розімкнути коло та змінити полярність приєднання котушки, замкнути коло і реостатом встановити значення струму значення якого таке саме, як в п.4.
8. Відрахувати кількість поділок n'' , на які відхилилась від нуля магнітна стрілка, при відхиленні стрілки вліво. Знайти кут відхилення стрілки вліво $\varphi'' = n'' \cdot c$.
9. Виміряти значення кута відхилення φ'' магнітної стрілки для тих же значень сили струму, що і в пункті 6 та занести їх до таблиці 3.5.1.
10. Знайти середні значення кута відхилення для кожного із значень сили струму.
11. За формулами (3.5.3) та (3.5.4) обчислити B_{Γ} та H_{Γ} .
12. Знайти середні значення B_{Γ} та H_{Γ} та занести їх до таблиці 3.5.1.

Таблиця 3.5.1

№ пор.	I, A	φ			N	R, m	$B_{\Gamma}, Tл$	$H_{\Gamma}, A/m$
		φ'	φ''	$\varphi_{\bar{n}}$				

Контрольні запитання

1. Що таке магнітне поле?
2. Яку силу називають силою Ампера? Сформулюйте правило для визначення напрямку цієї сили.
3. Дайте визначення індукції магнітного поля.
4. Що називають силовими лініями індукції магнітного поля?
5. В чому різниця між індукцією та напруженістю магнітного поля? Який між ними зв'язок?
6. У чому полягає принцип суперпозиції магнітних полів?
7. Зобразіть картину силових ліній магнітного поля Землі.
8. Сформулюйте та запишіть закон Біо – Савара – Лапласа.
9. Виведіть формулу для індукції та напруженості магнітного поля в центрі колового провідника зі струмом.

Лабораторна робота № 3.6. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА

Мета роботи: визначити індукцію магнітного поля в різних точках осі короткого соленоїда.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи слід вивчити такий теоретичний матеріал: індукція магнітного поля; закон Біо – Савара – Лапласа; принцип суперпозиції магнітних полів; напруженість магнітного поля; закон повного струму; розрахунок магнітних полів тороїда та соленоїда; явище електромагнітної індукції, магнітний потік.

[1, т.2, §§ 8.1, 8.2, 8.4, 8.6; 2, §§ 109, 110, 112, 118, 119; 3, §§ 9.2, 9.3; 4, т.2, §§ 40, 42, 47, 49–51.]

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до робіт № 3.5, № 3.8, № 3.9.

Струм, який протікає по провіднику, створює в навколишньому просторі магнітне поле. Для створення магнітних полів використовують провідники різних форм та розмірів, серед яких типовим є соленоїд. *Соленоїд* – це провідник, намотаний на циліндричний каркас. Лінії індукції магнітного поля соленоїда показані на рис. 3.6.1.

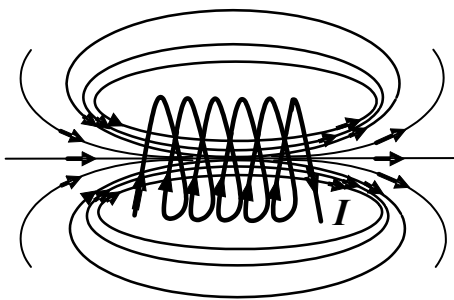


Рис. 3.6.1

Магнітні поля, створені різними провідниками зі струмом, розраховуються за законом Біо – Савара – Лапласа. Проте в деяких випадках (наприклад, в розрахунках поля тороїда або соленоїда) зручно використовувати *закон повного струму*: циркуляція вектора індукції магнітного поля вздовж довільно вибраного у просторі замкненого контуру дорівнює алгебричній сумі струмів, охоплених даним контуром, помноженій на μ_0 :

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{\ell}) = \mu_0 \sum_{i=1}^N I_i, \quad (3.6.1)$$

де \vec{B} – індукція магнітного поля в довільній точці вибраного контуру L ; $d\vec{\ell}$ – елемент довжини контуру; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала;

μ – відносна магнітна проникність середовища; $\sum_{i=1}^N I_i$ – алгебрична сума

струмів, охоплених даним контуром.

При розрахунку суми струмів позитивним слід вважати такий струм, напрям якого зв'язаний з напрямком обходу контуру правилом „правого гвинта”; струм протилежного напрямку слід вважати негативним (рис. 3.6.2).

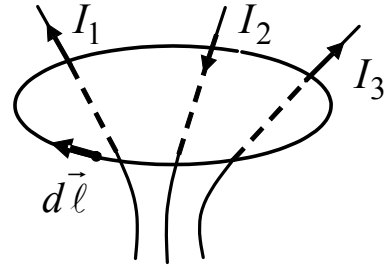


Рис. 3.6.2

Користуючись законом повного струму, можна вивести формулу для індукції магнітного поля B у центрі довгого соленоїда або тороїда зі струмом I :

$$B = \mu\mu_0 In_0, \quad (3.6.2)$$

де I – струм у витках; n_0 – кількість витків на одиницю довжини соленоїда або тороїда.

Розрахунки, виконані на підставі закону Біо – Савара – Лапласа, дають змогу отримати формулу для індукції магнітного поля в довільній точці на осі короткого соленоїда – такого соленоїда, довжина якого має практично той самий порядок, що і ширина:

$$B = \mu\mu_0 \frac{n_0 I}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (3.6.3)$$

де α_1, α_2 – кути між віссю соленоїда та радіус-векторами, проведеними з даної точки до кінців соленоїда (рис. 3.6.3).

Для нескінченно довгого соленоїда $\alpha_1 \rightarrow 0, \alpha_2 \rightarrow \pi$ і вираз (3.6.3) стає тотожним виразу (3.6.2).

Враховуючи геометричні розміри соленоїда (рис. 3.6.3), значення $\cos \alpha_1$ та $\cos \alpha_2$ можна виразити через довжину l та радіус r соленоїда і вираз (3.6.3) записати у вигляді:

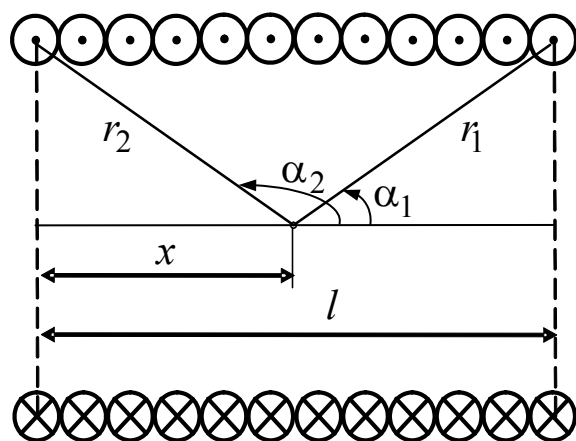


Рис. 3.6.3

$$B = \mu\mu_0 \frac{n_0 I}{2} \left[\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \right], \quad (3.6.4)$$

де l , r – відповідно довжина та радіус соленоїда; x – координата точки.

Досліджуючи цю функцію на екстремум, можна встановити, що індукція магнітного поля досягає максимуму при $x = l/2$. Таким чином, індукція магнітного поля максимальна у центрі короткого соленоїда дорівнює:

$$B = \mu\mu_0 n_0 I \frac{l}{\sqrt{4r^2 + l^2}}. \quad (3.6.5)$$

Для визначення індукції магнітного поля в різних точках осі короткого соленоїда у даній роботі використовують *метод балістичного гальванометра*. Балістичний гальванометр – це дзеркальний магнітоелектричний гальванометр з великим періодом власних коливань рамки (10...20 с), який з'єднаний з вимірювальною котушкою. Такий період коливань досягається збільшенням моменту інерції рухомої частини приладу або послабленням пружини, що підтримує рівновагу рамки. При вимірюваннях час протікання струму повинен бути значно меншим, ніж період власних коливань рамки. Якщо ця умова виконується, максимальне відхилення стрілки гальванометра Φ_{\max} пропорційне кількості електричного заряду, який пройшов по колу:

$$\Phi_{\max} = Cq, \quad (3.6.6)$$

де C – стала величина.

Для виконання роботи складають коло за схемою, зображеною на рис. 3.6.4, де введені такі позначення: Г – гальванометр, ВК – вимірювальна котушка, А – амперметр, К – перемикач.

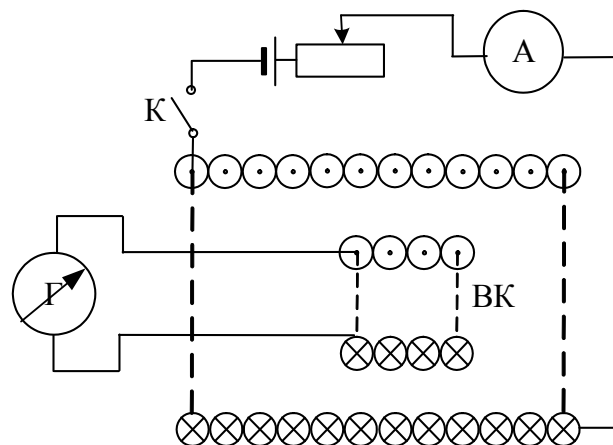


Рис. 3.6.4

У момент замикання перемикача К струм у соленоїді зростає від нуля до I_{\max} , а у вимірювальній котушці ВК за рахунок *явища електромагнітної індукції* виникає індукційний струм, що виражається із закону Фарадея:

$$I_{\text{інд}} = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{1}{R} \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{NS}{R} \left| \frac{dB}{dt} \right|, \quad (3.6.7)$$

де ε_i – електрорушійна сила індукції; $\frac{d\Phi}{dt}$ – зміна магнітного потоку;

N – кількість витків ВК; S, R – відповідно площа перерізу та опір вимірювальної котушки.

Інтегруванням (3.6.7) дістанемо, що

$$B = \frac{R}{NS} \int_0^t I_{\text{інд}} \cdot dt = \frac{R}{NS} \cdot q, \quad (3.6.8)$$

де q – заряд, який протікає по ВК при короткочасній зміні сили струму у короткому соленоїді.

Враховуючи (3.6.6) та (3.6.8), остаточно отримаємо:

$$B = \frac{R}{NSC} \varphi_{\max} = K \varphi_{\max}, \quad (3.6.9)$$

де K – стала величина; φ_{\max} – максимальний кут відхилення стрілки балістичного гальванометра.

Таким чином, між величиною індукції магнітного поля і максимальним кутом відхилення стрілки гальванометра існує пропорційний зв'язок.

Хід роботи

1. Зібрати електричне коло, зображене на рисунку 3.6.4.
2. Помістити вимірювальну котушку в центрі короткого соленоїда.
3. Замкнути вимикач та виміряти максимальний кут відхилення стрілки гальванометра φ_{\max} .
4. Користуючись формулою (3.6.5), розрахувати індукцію в центрі соленоїда B_0 .
5. Знаючи B_0 і φ_{\max} та використовуючи формулу (3.6.9) визначити сталу K :

$$K = B_0 / \varphi_{\max}.$$

6. Послідовно встановити вимірювальну котушку в різних точках осі соленоїда і виміряти для цих точок Φ_{\max} .
7. За формулою (3.6.9) розрахувати індукцію магнітного поля B .
8. Результати вимірювань і обчислень занести до таблиці 3.6.1.
9. За результатами досліду побудувати графік залежності $B = f(x)$.

Таблиця 3.6.1

№ пор.	x , м	Φ_{\max}	l , м	R , м	B , Тл

Контрольні запитання

1. Що таке магнітне поле?
2. Дайте означення індукції та напруженості магнітного поля. Як вони зв'язані між собою?
3. Сформулюйте закон Біо – Савара – Лапласа.
4. Запишіть закон повного струму.
5. Що таке соленоїд? Який соленоїд називають довгим, коротким?
6. Що називають силовими лініями індукції магнітного поля?
7. Зобразіть та поясніть картину силових ліній магнітного поля короткого соленоїда.
8. Виведіть формулу для визначення індукції магнітного поля на осі нескінченно довгого соленоїда із закону повного струму.
9. Який метод застосовується в даній роботі для визначення індукції магнітного поля короткого соленоїда?
10. Сформулюйте явище електромагнітної індукції та запишіть для нього формулу Фарадея.
11. Запишіть та поясніть формулу магнітного потоку.
12. Поясніть появу струму у вимірювальній котушці ВК схеми (3.6.4.).

Лабораторна робота № 3.7. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ СХРЕЩЕНИХ ПОЛІВ

Мета роботи: вивчити рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях; визначити питомий заряд електрона.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: сила Лоренца; рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях.

[1, т.2, §§ 8.7, 8.8; 2, §§ 114; 3, § 9.6; 4, т.2, §§ 40, 43]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 3.6.

Відомо, що на заряджену частинку, яка рухається у магнітному полі, діє сила Лоренца:

$$\vec{F}_л = q[\vec{v} \times \vec{B}],$$

модуль якої дорівнює

$$F_л = qvB \sin \alpha \quad (3.7.1)$$

де q , v – відповідно заряд та швидкість рухомої частинки; α – кут між напрямками векторів швидкості \vec{v} та магнітної індукції \vec{B} .

Рух зарядженої частинки в електричному та магнітному полях залежить, крім величини заряду, і від маси. Тому важливою характеристикою частинки є відношення q/m , яке називають питомих зарядом. Для визначення питомого заряду електрона e/m розглянемо його рух в однорідному магнітному полі.

Нехай електрон влітає в однорідне магнітне поле під прямим кутом до напрямку силових ліній магнітного поля. У цьому випадку сила Лоренца спричиняє доцентрове прискорення, тобто $F_л = ma_{доц}$ тобто, враховуючи (3.7.1) та $\sin \alpha = 1$, маємо:

$$e \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{2}. \quad (3.7.2)$$

З формули (3.7.2) величина питомого заряду електрона буде:

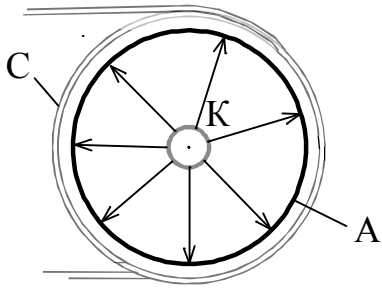


Рис. 3.7.1

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot R}. \quad (3.7.3)$$

Для експериментального визначення питомого заряду електрона використаємо електронну лампу з циліндричними катодом К та анодом А, яку помістимо коаксіально всередину довгого соленоїда С (рис. 3.7.1).

Якщо прикласти між анодом та катодом достатньо велику напругу, то з катода почнуть вириватись електрони і полетять до анода (рис. 3.7.1). Амперметр А буде фіксувати деякий анодний струм I_A (рис. 3.7.5)

Швидкість, якої набуває електрон, прискорений електричним полем лампи, в момент попадання на анод, можна знайти з закону збереження енергії електрона:

$$v = \sqrt{\frac{2eU_A}{m}}, \quad (3.7.4)$$

де U_A – напруга між катодом та анодом у лампі (іншими словами – анодна напруга).

Приєднаємо соленоїд до деякого джерела ЕРС. В соленоїді з'явиться електричний струм I , а навколо соленоїда виникне магнітне поле. Індукція магнітного поля B всередині соленоїда за законом Біо – Савара – Лапласа буде визначатись силою струму I в соленоїді:

$$B = \mu_0 I \cdot n, \quad (3.7.5)$$

де n – кількість витків соленоїда на одиницю довжини.

Всередині соленоїда магнітне поле напрямлене вздовж вісі лампи. Тому на електрони, що рухаються під дією електричного поля між катодом та анодом (перпендикулярно магнітному полю), почне діяти сила Лоренца (3.7.1).

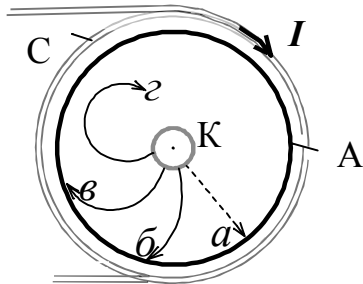


Рис. 3.7.2

Під дією цієї сили траєкторії електронів будуть викривлюватись, причому тим сильніше, чим більша величина магнітного поля (чим більший струм в соленоїді) (рис. 3.7.2 б, в). При деякому критичному значенні струму в соленоїді $I=I_{кр}$ траєкторії електронів пере-

творяться на коло, і струм в анодному колі зникне $I_A = 0$ (рис. 3.7.2 з).

В момент падіння анодного струму радіус кола, по якому рухаються електрони, рівний:

$$R_{кр} = \frac{r_A - r_K}{2}, \quad (3.7.6)$$

де r_A, r_K – відповідно радіуси анода та катода електронної лампи.

Теоретично залежність анодного струму від індукції магнітного поля має вигляд, показаний на рис. 3.7.3 суцільною лінією. Але, оскільки електрони вилітають з катода з різними швидкостями, то дійсна залежність має вигляд показаний на рис. 3.7.3 пунктирною лінією. Тобто при наближенні B до $B_{кр}$ струм уже починає спадати і, навіть, коли $B > B_{кр}$ струм іще існує. Тобто, насправді, струм спадає не миттєво, а поступово.

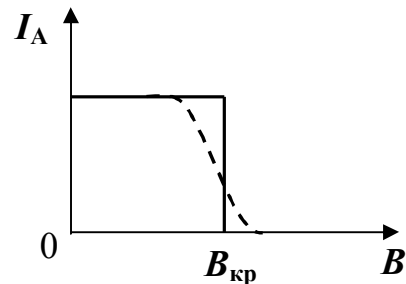


Рис. 3.7.3

З рівнянь (3.7.3) – (3.7.6) виразимо питомий заряд електрона через величини, які в умовах нашої лабораторної роботи можна знайти експериментально:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_A}{(\mu_0 \cdot I_{кр} \cdot n)^2 \cdot (r_A^2 - r_K^2)}. \quad (3.7.7)$$

Таким чином, для експериментального визначення питомого заряду електрона достатньо знайти критичне значення сили струму в соленоїді $I_{кр}$ при певному фіксованому значенні анодної напруги U_A . Для цього необхідно:

1) виходячи з експериментальних даних, побудувати графік залежності анодного струму I_A від струму в соленоїді I_c при певному значенні U_A ;

2) знайти по графіку критичне значення сили струму в соленоїді $I_{кр}$, при якому струм мпадає до $I_A/2$ (рис. 3.7.4).

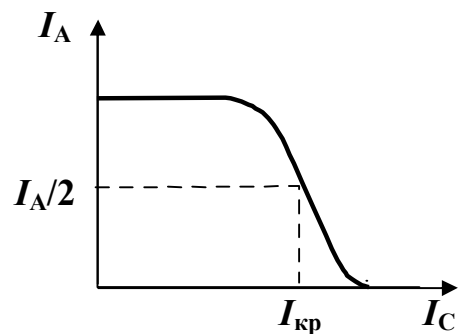


Рис. 6.7.4

Схему лабораторної установки наведено на рисунку 3.7.5. Вона складається з електронної лампи Л (діо-

да), соленоїда С, витки якого охоплюють лампу, реостату П1, потенціометра П2, двох блоків живлення (220 В), вольтметра, амперметра та міліамперметра. Реостату П1 змінює силу струму у соленоїді, яка вимірюється амперметром А. За допомогою потенціометра П2 задається значення анодної напруги, яка вимірюється вольтметром V. Міліамперметр mA вимірює анодний струм.

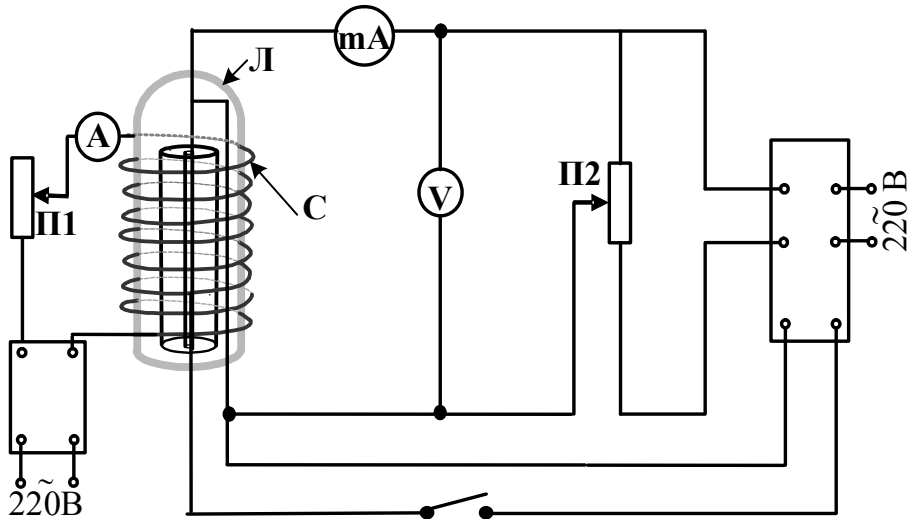


Рис. 3.7.5

Хід роботи

1. Ознайомитись з лабораторною установкою, використовуючи схему (рис. 3.7.5).
2. Встановити анодну напругу U_{A1} (вказує викладач).
3. Виміряти анодний струм I_A при різних значеннях струму в соленоїді I_C .
4. Побудувати графік залежності анодного струму від струму в соленоїді $I_A = f(I_C)$ (рис. 3.7.4).
5. За графіком визначити критичне значення сили струму $I_{кр}$ в соленоїді.
6. За формулою (3.7.8) розрахувати питомий заряд електрона.
7. Встановити анодну напругу U_{A2} та повторити пункти 3-6.
8. Результати занести в таблицю 3.7.1.
9. Знайти середнє значення для величини питомого заряду електрона та порівняти з табличними даними.

Таблиця 3.7.1.

№ пор.	U_A , В	I_A , мА	I_C , А	$I_{кр}$, А	q/m , Кл/кг	$(q/m)_{сер}$, Кл/кг	$(q/m)_{табл}$, Кл/кг
1							
2							

Контрольні запитання

1. Що таке магнітне поле?
2. Що називають силою Лоренца? Запишіть формулу для цієї сили.
3. Сформулюйте правило для визначення напрямку сили Лоренца.
4. Чи виконує сила Лоренца роботу? Чи змінюється швидкість зарядженої частинки, що влітає в постійне магнітне поле?
5. Якою буде траєкторія зарядженої частинки, що влетіла в магнітне поле: *а)* перпендикулярно силовим лініям індукції магнітного поля; *б)* якщо кут відрізняється від прямого?
6. Виведіть формулу для розрахунку питомого заряду частинки, яка влітає в магнітне поле. Чому дорівнює її період обертання?
7. Від чого залежить радіус кривизни траєкторії зарядженої частинки, що влітає в магнітне поле?

Лабораторна робота № 3.8. ВИЗНАЧЕННЯ ККД ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: вивчити явища самоіндукції та взаємоіндукції; визначити залежність ККД трансформатора від струму навантаження.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: явище електромагнітної індукції; явище самоіндукції; індуктивність; явище взаємної індукції, трансформатор.

[1, т.2 §§ 10.1, 10.2, 10.5; 2, §§ 122, 123, 128, 129; 3, §§ 9.8, 9.9; 4, т.2 §§ 60, 61, 66]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 3.6, № 3.9.

Явище виникнення електрорушійної сили індукції в замкненому контурі, розміщеному близько до замкненого контуру, в якому тече змінний струм, називають *явищем взаємної індукції*.

Контурі зі змінними струмами, в яких виникає явище взаємоіндукції через взаємне перетинання магнітних потоків, мають *індукційний зв'язок*. Електрорушійні сили ε_i , що виникають унаслідок взаємоіндукції, пропорційні швидкості змін струмів в контурах, які мають індуктивний зв'язок (за законом Генрі):

$$\varepsilon_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad \text{та} \quad \varepsilon_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt},$$

де $L_{12} = L_{21}$ і мають назву *коефіцієнтів взаємної індуктивності контурів*.

Коефіцієнти взаємоіндукції є мірою магнітного зв'язку між контурами і залежать від геометричної форми, розмірів і взаємного розміщення контурів зі струмом, а також від магнітних властивостей середовища, де розміщені контури.

На практиці для збільшення значення L_{12} обидва контури насаджують на спільне залізне осердя, яке виготовляють із матеріалів магнітною проникністю $\mu \gg 1$, до яких відносяться феромагнетики.

Явище взаємної індукції покладено в основу роботи *трансформатора* – пристрою для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги за сталої частоти струму. *Трансформатор*

складається з двох або більше обмоток, що мають загальне осердя з феромагнітного матеріалу (рис. 3.8.1).

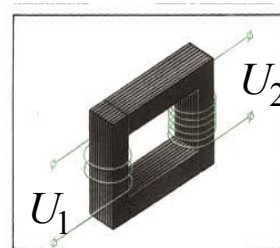


Рис. 3.8.1

Розрізняють два режими роботи трансформатора: холостий хід і робота навантаженого трансформатора. У режимі холостого ходу вторинна обмотка трансформатора розімкнена (трансформатор не навантажений). При цьому струм у первинній обмотці мінімальний і визначається повним опором обмотки при змінному струмі:

$$Z = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}, \quad (3.8.1)$$

де R_1 – активний опір обмотки; $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота змінного струму ($\nu = 50$ Гц); L_1 – індуктивність обмотки; ωL_1 – індуктивний опір первинної обмотки.

Робота трансформатора на навантаження супроводжується зменшенням індуктивного опору первинної обмотки, струм у ній зростає пропорційно до навантаження. Нехтуючи втратами енергії, які у сучасних трансформаторах не перевищують 2 %, на підставі закону збереження енергії можна записати, що потужність струму в обох обмотках трансформатора практично однакова, тобто:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \quad (3.8.2)$$

Трансформатор характеризується коефіцієнтом трансформації:

$$k = N_2 / N_1 = U_2 / U_1. \quad (3.8.3)$$

Коефіцієнт трансформації чисельно дорівнює відношенню кількості витків другої обмотки трансформатора до кількості витків першої обмотки та показує, у скільки разів змінюється вихідна напруга порівняно із напругою на вході трансформатора. Якщо $k > 1$, то трансформатор підвищує напругу і його називають *підвищувальним*, а за $k < 1$ трансформатор є *знижувальним*.

Розрізняють два види втрат потужності в трансформаторі: втрати в обмотках та втрати в осерді. Втрати потужності в обмотках виникають за рахунок їхнього нагрівання при проходженні струму (згідно з законом Джоуля – Ленца). Для зменшення цих втрат обмотки виготовляють з провідників, які мають малий питомий опір, наприклад, з міді.

Втрати в осерді зводяться до трьох факторів: виділення тепла за рахунок наведених струмів (струмів Фуко); втрати енергії, пов'язані з перемагнічуванням осердя; втрати при розсіюванні магнітних силових ліній. Для боротьби зі струмами Фуко осердя виготовляють з тонких пластин, ізольованих одна від одної. Для боротьби з втратами на перемагнічування, осердя виготовляють з феромагнетику з малою коерцитивною силою. Коерцитивна сила H_K – це напруженість такого зовнішнього магнітного поля (рис. 3.8.2), яка необхідна для розмагнічування осердя. Зменшення втрат за рахунок розсіяння силових ліній досягають спеціальною геометричною формою осердя.

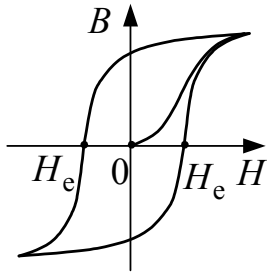


Рис. 3.8.2

гнічування, осердя виготовляють з феромагнетику з малою коерцитивною силою. Коерцитивна сила H_K – це напруженість такого зовнішнього магнітного поля (рис. 3.8.2), яка необхідна для розмагнічування осердя. Зменшення втрат за рахунок розсіяння силових ліній досягають спеціальною геометричною формою осердя.

ККД називається відношення корисної потужності до витраченої:

$$\eta = P_k / P \quad (3.8.4)$$

Якщо втрати потужності виразити через ΔP , формулу (3.8.4) можна записати у вигляді:

$$\eta = (P - \Delta P) / P \quad (3.8.5)$$

Найпростіше врахувати втрати потужності можна так:

$$\Delta P = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + P_0 \quad (3.8.6)$$

де $I_1^2 R_1$, $I_2^2 R_2$ – потужності теплових втрат відповідно в первинній та вторинній обмотці; P_0 – потужність холостого ходу (враховуються всі види втрат, крім втрат в обмотках).

Тому остаточний вираз для розрахунку ККД трансформатора набуває такого вигляду:

$$\eta = \frac{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + P_0}{P} \cdot 100\% \quad (3.8.7)$$

Трансформатори різняться за призначенням, розмірами, типами і видами залежно від потреб конкретних споживачів електричного струму.

Трансформатори є основними елементами систем енергопостачання, електромашин, електрообладнання, електроустановок та їхніх деталей для отримання потрібної для них напруги живлення. Зокрема, можна виділити трансформатори для зварювальних апаратів, апаратів для прогріву бетону, ґрунту і труб, трансформатори для компресорів, транспортерів, бетономішалок, електроприводів будівельних машин, насосних и компре-

сорних установок, гідродинамічні трансформатори для будівельних і транспортних машин, трансформатори для освітлення будівельних майданчиків, ручних електричних машин та інших споживачів енергії.

Хід роботи

1. Зібрати схему, подану на рисунку 3.8.3.
 2. Підключити установку до мережі 220 В і при розімкненій вторинній обмотці за показниками ватметра визначити потужність холостого ходу P_0 .

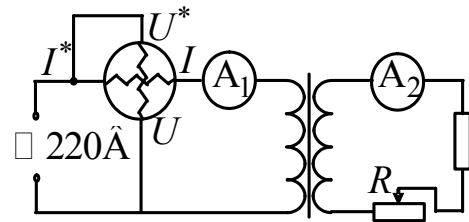


Рис. 3.8.3

3. Замкнути вторинне коло (рис. 3.8.3) і при різних положеннях повзунка реостата R знайти I_1 , I_2 та P .
 4. За формулою (3.8.7) розрахувати ККД трансформатора в усіх випадках.
 5. Одержані результати занести до таблиці 3.8.1.
 6. За одержаними результатами побудувати графік залежності $\eta = f(I_2)$.

Таблиця 3.8.1

№ пор.	I_1 , А	I_2 , А	P , Вт	η , %

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть явища електромагнітної індукції? Сформулюйте закон Фарадея для явища електромагнітної індукції.
2. Що таке магнітний потік? Сформулюйте правило Ленца.
3. Дайте означення явища взаємоіндукції.
4. Що таке коефіцієнт взаємоіндукції і від чого він залежить?
5. Що таке трансформатор? Опишіть його будову.
6. Що називають коефіцієнтом трансформації? Які трансформатори називають підвищувальними? знижувальними?
7. Як обчислити ККД трансформатора?
8. Наведіть приклади втрат потужності у трансформаторі. Поясніть, якими методами зменшують кожен вид втрат.

Лабораторна робота № 3.9. ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ ТА ДРОСЕЛЯ

Мета роботи: вивчити явище самоіндукції, визначити індуктивність котушки та дроселя.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: явище електромагнітної індукції; правило Ленца; явище самоіндукції; індуктивність.

[1, т.2, §§ 10.1, 10.2, 10.4; 2, §§ 122, 123, 126; 3, §§ 9.8, 9.9; 4, т.2, §§ 60, 61, 64]

Якщо у провідному контурі протікає струм I , то у просторі виникає магнітне поле, індукція якого у кожній точці за законом Біо – Савара – Лапласа пропорційна силі струму. В результаті контур пронизує власний магнітний потік Φ (або з контуром зчеплений магнітний потік), величина якого пропорційна силі струму:

$$\Phi = L \cdot I, \quad (3.9.1)$$

де L – індуктивність контуру.

Індуктивність контуру – це коефіцієнт пропорційності, який не залежить від сили струму та індукції магнітного поля, а є однозначною характеристикою провідного контуру, що визначається формою і розмірами контуру, а також магнітними властивостями навколишнього середовища.

Котушка з N витками і довжиною ℓ , заповнена матеріалом з магнітною проникністю μ , має індуктивність:

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2 S}{\ell}, \quad (3.9.2)$$

де S – площа перерізу котушки. Котушку, в яку вставлене осердя з матеріалом, магнітна проникність якого $\mu \gg 1$, називають *дроселем*.

Явище виникнення індукційного струму в провіднику внаслідок зміни магнітного потоку, зумовленої зміною струму в цьому ж провіднику, називають *самоіндукцією*.

Величина електрорушійної сили самоіндукції була визначена американським фізиком Дж. Генрі (при $L = \text{const}$):

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3.9.3)$$

З останнього виразу слідує, що *індуктивність* – це характеристика, що визначає *міру інертних властивостей* провідника стосовно зміни струму, чисельно дорівнює тій ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі за швидкості зміни сили струму в ньому 1 А за 1 с:

$$L = \frac{|\varepsilon_{si}|}{dI/dt}.$$

Якщо до котушки індуктивністю L прикласти змінну напругу частоти ω :

$$U = U_m \cos \omega t,$$

то струм у колі :

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m}{R_L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.9.4)$$

де величину $R_L = \omega L$ називають індуктивним опором. З виразу (3.9.4) випливає, що для постійного струму ($\omega = 0$) $R_L = 0$.

Провідник, з якого виконано котушку, має омичний (активний) опір R . В результаті повний опір Z котушки індуктивності :

$$Z = \sqrt{R^2 + R_L^2}. \quad (3.9.5)$$

Змінний струм з циклічною частотою ω характеризують частотою $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$, тому з формули (3.9.5) випливає, що

$$L = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (3.9.6)$$

Тобто омичний опір R та повний опір Z котушки індуктивності (або дроселя) можна визначити так:

$$R = \frac{U_0}{I_0} \quad \text{та} \quad Z = \frac{U}{I}, \quad (3.9.7)$$

де U_0, U – напруга на котушці відповідно при постійному та змінному струмах; I_0, I – відповідно сила постійного та змінного струмів.

Для знаходження активного опору котушки R використовується постійний струм. Відповідні прилади вмикають у коло за схемою, поданою на рисунку 3.9.1. Джерелом постійного струму є випрямляч.

Для знаходження повного опору котушки без осердя Z та котушки з осердям (дроселя) Z_1 використовується змінний струм. Коло складають за схемою, поданою на рисунку 3.9.2.

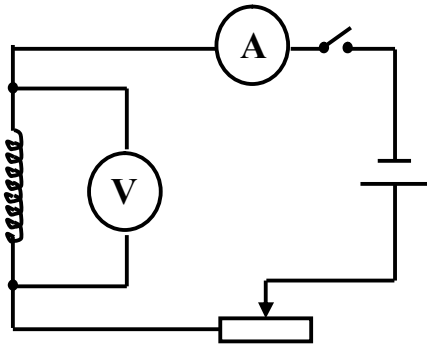


Рис. 3.9.1

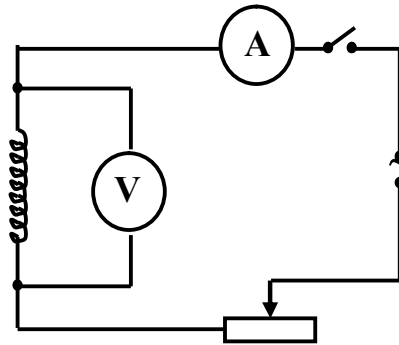


Рис. 3.9.2

Опори R , Z та Z_1 слід визначати не менше ніж три рази при різних силах струму, а потім розрахувати середні значення цих величин.

У разі розмиканні або замиканні електричних кіл сила струму в них різко змінюється, що призводить до виникнення струмів самоіндукції, які називають *екстраструмами самоіндукції*.

Для екстраструму розмикання
$$I = I_0 e^{-R/L \cdot t}.$$

Для екстраструму замикання
$$I = I_0 \left(1 - e^{-R/L \cdot t}\right).$$

Якщо електричне коло містить котушки з великими значеннями індуктивності L , то *екстраструми розмикання* в таких колах можуть значно перевищувати струми в колі від джерела. Часто це стає причиною яскравого спалаху лампочок і плавлення запобіжників внаслідок розмикання електричних кіл споживачів. Великі струми самоіндукції через швидке вимкнення спричиняють пробій повітряного проміжку між контактами вимикачів і появу дугового розряду, що призводить до плавлення контактів. Для гасіння дуги в коло вмикають конденсатори. Явище самоіндукції використовують в пусках ламп денного освітлення для запалювання газового розряду.

Хід роботи

1. Зібрати коло постійного струму, схему якого подано на рисунку 3.9.1.
2. Виміряти напругу U_0 при трьох силах струму I_0 . Результати занести до таблиці 3.9.1.
3. Зібрати коло змінного струму за схемою на рисунку 3.9.2.
4. Виміряти напругу U при трьох силах струму I . Результати вимірів занести таблиці 3.9.1.
5. Вставити осердя та виконати виміри, передбачені п. 4, для дроселя.
6. За формулами (3.9.7) розрахувати активний опір котушки R , повний опір котушки Z , та повний опір дроселя Z_1 .
7. Розрахувати середні значення R , Z та Z_1 .
8. За формулою (3.9.6) знайти індуктивність котушки L_K та дроселя L_D .
9. Розрахувати магнітну проникність осердя μ , користуючись (3.9.2).

Таблиця 3.9.1

№ пор.	I_0, A	U_0, B	$R, \text{Ом}$	I, A	U, B	$Z, \text{Ом}$	I_1, A	U_1, B	$Z_1, \text{Ом}$

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть явища електромагнітної індукції? Сформулюйте закон Фарадея для явища електромагнітної індукції.
2. Що таке магнітний потік?
3. Сформулюйте правило Ленца.
4. У чому полягає суть явища самоіндукції?
5. Запишіть закон Генрі для явища самоіндукції.
6. Дайте визначення індуктивності контуру. Які одиниці вимірювання вона має?
7. Що таке індуктивність котушки і від чого вона залежить?
8. Чим відрізняється котушка від дроселя?
9. Що таке магнітна проникність речовини?
10. Що таке екстраструми самоіндукції? Наведіть приклади шкідливого впливу екстраструмів розмикання. Наведіть приклади їхнього використання.

Модуль 4. КОЛИВАЛЬНІ ТА ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ. ОПТИКА

Лабораторна робота № 4.1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: вивчення основних закономірностей згасаючих коливань, визначення коефіцієнту згасання та логарифмічного декременту згасання коливань фізичного маятника.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: коливальні процеси та системи; фізичний маятник; згасаючі коливання; характеристики згасання.

[1, т.1 §§ 10.1, 10.2, 10.4, 10.5, 10.8; 2, §§ 140–142, 146; 3, §§ 2.17, 2.18; 4, т.1 §§ 49, 50, 53, 54, 58]

Коливанням називають усякий регулярний або майже регулярний процес, в якому будь-яка величина набуває однакових значень через рівні або майже рівні проміжки часу.

Фізичний маятник – це будь-яке тверде тіло, здатне здійснювати під дією сили тяжіння коливання навколо нерухомої горизонтальної осі, яка не проходить через центр мас тіла (рис. 4.1.1).

При відхиленні фізичного маятника на деякий кут φ від положення рівноваги виникає обертальний момент, зумовлений силою тяжіння, який прагне повернути маятник у положення рівноваги $M_{\text{тяж}}$:

$$M_{\text{тяж}} = mgl \cdot \sin \alpha \quad (4.1.1)$$

де m – маса тіла; l – відстань від осі обертання до центра мас маятника.

Якщо маятник відпустити з такого положення, то він почне здійснювати коливальний рух. Коливальному руху маятника перешкоджають опір повітря і тертя в осі маятника. Відомо, що у випадку невеликої швидкості руху сумарний

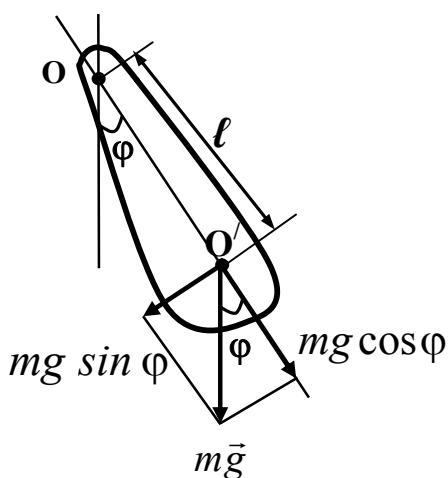


Рис.4.1.1

момент сил опору $M_{\text{оп}}$ буде пропорційний кутовій швидкості руху маятника:

$$M_{\text{оп}} = -r \cdot \omega = -r \frac{d\varphi}{dt}, \quad (4.1.2.)$$

де r – коефіцієнт опору навколишнього середовища; $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ – кутова швидкість. Знак “мінус” свідчить про те, що вектори $\vec{M}_{\text{оп}}$ та $\vec{\omega}$ мають протилежний напрям.

За основним законом динаміки обертального руху

$$\vec{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{M}_i}{J}.$$

Оскільки фізичний маятник здійснює обертальний рух під дією двох моментів сил $M_{\text{тяж}}$ і $M_{\text{оп}}$, то рівняння його руху після підстановок значень моментів сил і перетворень буде мати вигляд:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + r \frac{d\varphi}{dt} + \ell mg \sin \varphi = 0, \quad (4.1.3)$$

де J – момент інерції маятника відносно осі обертання; $\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \beta$ – кутове прискорення маятника.

Враховуючи, що при малих коливаннях (коливаннях з малими кутами відхилення, для яких можна вважати, що $\sin \alpha \approx \alpha$), а також вводячи позначення $\frac{r}{J} = 2\delta$ та $\frac{\ell mg}{J} = \omega_0^2$, диференціальне рівняння вільних згасаючих коливань фізичного маятника можна записати у вигляді:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\delta \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi = 0. \quad (4.1.4)$$

Розв’язком цього рівняння є функція залежності кута обертання маятника від часу:

$$\varphi = A e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t + \alpha). \quad (4.1.5)$$

Графік функції (4.1.5) наведено на рис. 4.1.2.

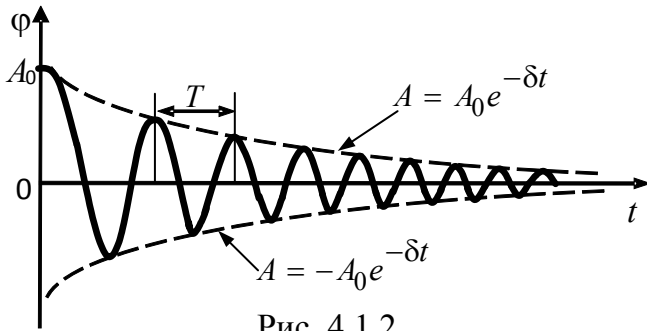


Рис. 4.1.2

Рух маятника можна розглядати як коливання з частотою $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ та амплітудою, яка змінюється з часом за законом $A = A_0 e^{-\delta t}$. Період згасаючих коливань дорівнює:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (4.1.6)$$

Якщо коефіцієнт опору середовища невеликий, тобто можна вважати його рівним нулю ($r=0$), то і коефіцієнт згасання $\delta=0$. Тоді формула періоду коливань можна записати у вигляді:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg\ell}}. \quad (4.1.7)$$

Швидкість згасаючих коливань характеризується коефіцієнтом згасання δ . Для визначення коефіцієнта згасання користуються залежністю амплітуди від часу, яка подається у вигляді логарифмічної функції:

$$\ln A = \ln A_0 - \delta t. \quad (4.1.8)$$

У координатах $(\ln A; t)$ рівняння (4.1.8) є прямою лінією. Величина δ визначає кутівий коефіцієнт нахилу прямої (4.1.8) до осі часу t (рис. 4.1.3):

$$\delta = -\frac{d(\ln A)}{dt} \text{ або } \delta = \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A}\right)}{\Delta t}. \quad (4.1.9)$$

Якщо $\frac{A_0}{A} = e \approx 2,71828\dots$, то

$$\delta = \frac{1}{t_e}.$$

Отже, коефіцієнт згасання δ – це величина, обернена до проміжку часу t_e , упродовж якого амплітуда коливань зменшується в $e = 2,71828\dots$ раз. Співвідношення (4.1.9) можна викорис-

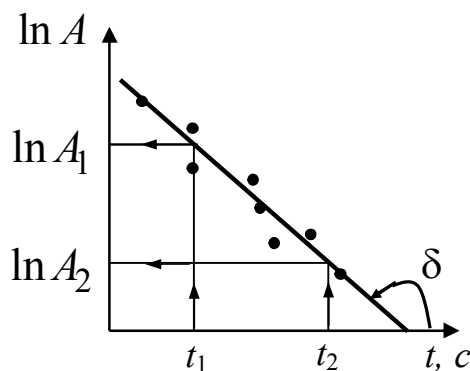


Рис. 4.1.3

товувати для експериментального визначення δ .

Окрім коефіцієнта згасання для характеристики згасання застосовують також *логарифмічний декремент згасання* χ , який визначають логарифмом відношення амплітуд, що відповідають моментам часу, які відрізняються на період:

$$\chi = \ln \frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} = \ln e^{\delta T} = \delta T. \quad (4.1.10)$$

Фізичний маятник виготовлено у вигляді металевого стержня 1 (рис. 4.1.4), до верхнього кінця якого прикріплено дві призми, що спираються своїми ребрами на раму.

Для зміни періоду коливань на стержень надітий масивний вантаж 2, положення якого можна регулювати гвинтами.

Відлік амплітуди коливань у градусах виконують за шкалою 3.

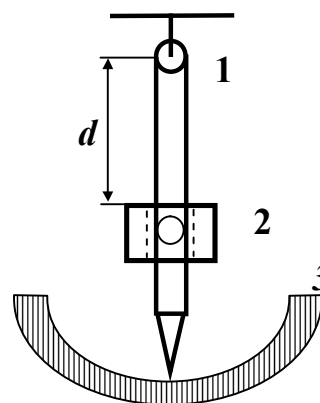


Рис. 4.1.4

Хід роботи

1. Встановити вантаж на стержні у крайнє нижнє положення.
2. Відхилити маятник на кут $8^\circ - 10^\circ$ від положення рівноваги і відпустити. Виміряти час 20 – 30 повних коливань та визначити період коливань маятника за формулою:

$$T_{\text{сер}} = \frac{t}{N}.$$

3. Ще раз відхилити маятник на кут $8^\circ - 10^\circ$ і відпустити його. Через кожні 10 – 15 секунд за шкалою 3 визначити амплітуду коливань A доти, доки вона не зменшиться до $1 - 2^\circ$.
4. Розрахувати значення логарифму натурального від амплітуди ($\ln A$).
5. Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці 4.1.1.
6. За отриманими результатами побудувати графік залежності $\ln A = f(t)$. Для цього нанести на графік точки за значеннями величин з таблиці 4.1.1 і *провести пряму лінію*, графічно усереднюючи експериментальні результати (рис. 4.1.3).
7. На початку і на кінці графіка на осі t вибрати два моменти часу t_1 та t_2 (рис. 4.1.3) й визначити відповідні значення $\ln A_1$ та $\ln A_2$.

8. Визначити коефіцієнт згасання δ за формулою:

$$\delta = \frac{\ln A_1 - \ln A_2}{t_2 - t_1}.$$

9. Визначити логарифмічний декремент згасання χ :

$$\chi = \delta T.$$

10. Пересунути вантаж у положення, яке визначить викладач та виконати пункти 2-9 ще раз.

Таблиця 4.1.1.

№ п/п	$t, \text{с}$	$A, ^\circ$	$\ln(A)$	$\delta, 1/\text{с}$	χ

Контрольні запитання

1. Що таке коливання? Які коливання відносять до малих?
2. Які коливання називають вільними?
3. Які коливання називають незгасаючими? згасаючими? Зобразіть їх графічно.
4. Які коливання називають вимушеними?
5. Які коливання називають гармонійними? Напишіть їх рівняння.
6. Дайте означення амплітуди, фази, початкової фази, періоду, лінійної та циклічної частот коливань.
7. Що таке фізичний маятник? Назвіть інші механічні коливальні системи, дайте їх означення.
8. Виведіть диференціальні рівняння згасаючих коливань фізичного, пружинного та математичного маятників. Запишіть їх розв'язок.
9. Що таке коефіцієнт згасання? логарифмічний декремент згасання? У чому полягає їх фізичний зміст?
10. Від чого залежить період коливань фізичного, пружинного і математичного маятників?

Лабораторна робота № 4.2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ

Мета роботи: вивчити принцип роботи та явище резонансу у електричному коливальному контурі, побудувати резонансні криві, визначити резонансні характеристики контуру.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: вільні згасаючі коливання; вимушені коливання; резонанс; вимушені електромагнітні коливання в електричному коливальному контурі; автоколивальні системи.

[1, т.2, §§ 12.1–12.4; 2, §§ 143, 146, 148; 4, т.2, §§ 89–91]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 4.1, № 3.8.

Електричний коливальний контур складається з послідовно з'єднаних конденсатора ємністю C , котушки індуктивністю L та омичного опору R (опору підвідних провідників). Після підзарядки конденсатора в такому контурі виникають *згасаючі електромагнітні коливання*, тобто відбувається періодична зміна заряду та напруги на конденсаторі і, відповідно, сили струму у контурі. Втрати енергії в такому процесі відбуваються за рахунок виділення тепла на омичному опорі та електромагнітне випромінювання. Для збудження і підтримання незгасаючих коливань до контуру слід весь час підводити енергію від зовнішнього джерела, яка компенсувала б втрати енергії. Для цього можна застосувати тріод – електронну лампу з трьома електродами (катодом, анодом та сіткою).

На рис. 4.2.1 показано схему лампового генератора зі зворотним зв'язком. В анодне коло тріода ввімкнено послідовно коливальний контур і батареєю U_a , у коло сітки – котушку L_a зв'язану індуктивно з котушкою L коливального контуру.

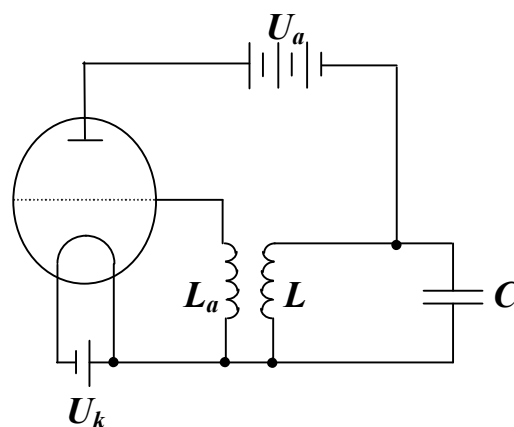


Рис. 4.2.3

Коли на катод подано напругу U_k , то його нитка розжарюється, створюється анодний струм та вмикається батарея U_a . Це призводить до виникнення короткочасного струму у колі, який заряджає конденсатор: нижня обкладка отримує позитивний заряд, верхня – негативний. Далі конденсатор розряджається через котушку індуктивності L і в контурі виникнуть синусоїдальні електричні коливання.

Однак згасаючий синусоїдальний струм, проходячи через котушку L контуру, збуджуватиме в котушці L_a електрорушійну силу (ЕРС) індукції і між сіткою та катодом лампового тріода утворюється змінна напруга. Ця *напруга регулює енергію*, що підводиться від джерела до коливального контуру.

У негативний півперіод (коли на сітці негативний потенціал, на катоді – позитивний) лампу «заперто» і джерело струму не працює. Навпаки, у позитивний півперіод (коли на сітці позитивний потенціал, на катоді – негативний) джерело U_a створює анодний струм, поповнюючи енергію коливального контуру. Завдяки цьому в контурі існуватимуть *незгасаючі коливання*. Одержані таким чином незгасаючі коливання не є строго гармонічними, але їх відміна від гармонічних настільки мала, що нею можна знехтувати.

Така система, яка сама регулює введення енергії в контур, називається *автоколивальною*, а збуджені в ній коливання – *автоколиваннями*. В автоколивальних системах відбуваються коливання з постійною частотою і амплітудою, значення яких не залежать від зовнішнього впливу і визначаються властивостями самої системи.

Крім генераторів на електронних лампах широко використовують напівпровідникові генератори електричних коливань – на транзисторах. За структурою вони аналогічні, але мають істотні переваги: у них немає нагрітих катодів, які споживають потужність і потребують час для розжарення; працюють при нижчих напругах; мають значно менші розміри тощо.

В автоколивальних системах (і не тільки в електромагнітних) за деяких умов може виникати резонанс. *Явище резонансу у коливальному контурі* полягає у різкому зростанні амплітуди вимушених коливань струму у контурі або напруги на обкладинках конденсатора при наближенні частоти ω зовнішньої ЕРС до частоти власних коливань у контурі

ω_0 . Найбільш просто такі коливання можна збудити завдяки індуктивному зв'язку котушки індуктивності контуру L із зовнішньою котушкою L_a , по якій протікає змінний струм. Якщо індукована у контурі ЕРС змінюється за законом $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$, то диференціальне рівняння вимушених коливань буде мати вигляд:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (4.2.1)$$

де L – індуктивність контуру, C – ємність, R – активний (омічний) опір.

Враховуючи, що частота власних (незгасаючих) коливань у контурі $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, а коефіцієнт згасання $\delta = \frac{R}{2L}$, запишемо рівняння (4.2.1) у вигляді:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (4.2.2)$$

Розв'язки цього рівняння для амплітуд напруги U_m на конденсаторі та сили струму I_m у контурі мають вигляд:

$$U_{C_m} = \frac{\varepsilon_0}{\frac{\omega}{\omega_0^2} \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega} - \omega\right)^2 + 4\delta^2}}; \quad (4.2.3) \quad \text{та} \quad I_m = \frac{\varepsilon_0}{L \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega} - \omega\right)^2 + 4\delta^2}}. \quad (4.2.4)$$

Графіки відповідних функцій $U_{C_m} = f(\omega)$ і $I_m = f(\omega)$ зображені на рис. 4.2.2 та 4.2.3.

Як видно з рисунків, амплітуди напруги і сили струму різко зростають при наближенні частоти зовнішньої ЕРС ω до значення частоти власних коливань ω_0 . Слід підкреслити, що *резонансна частота* ω_p (частота, при якій амплітуди напруги та струму максимальні) для сили струму I_m співпадає з частотою власних коливань ω_0 у відсутності згасання, а для напруги U_m резонансна частота залежить від:

$$\omega_\delta = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \quad (4.2.5)$$

тобто спадає у разі збільшення коефіцієнта згасання.

Спільною особливістю обох графіків є те, що зі збільшенням величини згасання ширина резонансної кривої зростає, а її висота спадає. Кількісною характеристикою форми резонансної кривої є *добротність* Q – величина, яка характеризує втрати енергії в контурі і за визначенням дорівнює π/χ , де χ – логарифмічний декремент згасання вільних коливань в контурі. *Добротність показує, у скільки разів амплітуда напруги на конденсаторі при резонансі перевищує амплітуду зовнішньої ЕРС.*

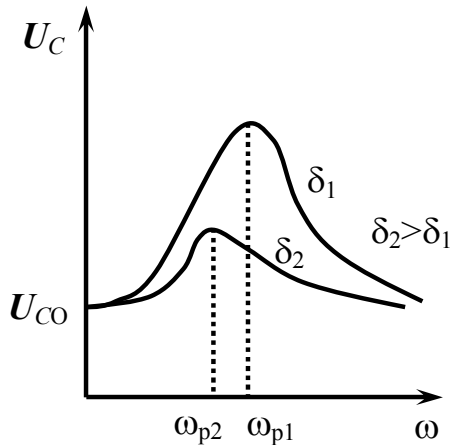


Рис. 4.2.2

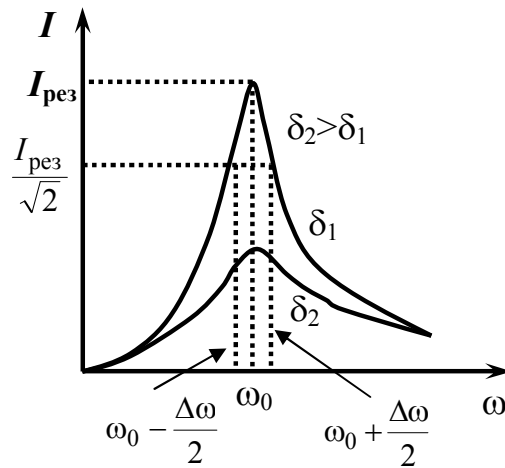


Рис. 4.2.3

Добротність контуру характеризує гостроту резонансних кривих. Це видно з рисунку 4.2.3, де показано ширину $\Delta\omega$ резонансної кривої для сили струму на половині максимальної потужності. Із закону Джоуля – Ленца випливає, що потужність у колі пропорційна квадрату сили струму. Це означає, що коли сила струму у контурі зменшується у $\sqrt{2}$ разів відносно максимального значення, потужність зменшується удвічі. В умовах малого згасання можна показати, що це відбувається, коли частота ω зовнішньої ЕРС відхиляється від ω_0 на величину коефіцієнта згасання β . $\Delta\omega = 2\delta$ – *ширина резонансної кривої або смуга пропускання* коливального контуру, яка зв'язана з добротністю виразом:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}. \quad (4.1.6)$$

Схему установки показано на рис. 4.2.4. У даній роботі використано ламповий генератор, який має індуктивний зв'язок з досліджуваним коливальним контуром і регулюється повзунком P_1 . Частота коливань генератора за допомогою перемикача P_2 регулюється у діапазоні 0,7...1,4 МГц, значення ємності конденсатора коливального контуру пе-

ремикачем P_3 . Якщо встановити на конденсаторі деяке значення ємності C , то обертаючи перемикач частоти генератора P_1 можна добитися резонансу, що буде підтверджено спалахом лампочки L , а покази P_1 – резонансній частоті.

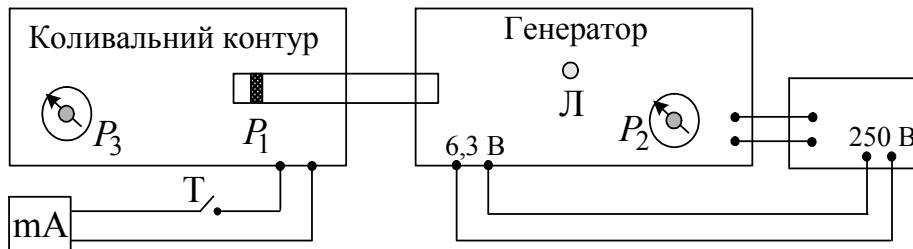


Рис. 4.2.4

Хід роботи

1. Перед вмиканням приладу необхідно пересвідчитись, що індуктивний зв'язок генератора з контуром мінімальний, тобто повзунок P_1 перебуває у крайньому лівому положенні, а тумблер T , який вмикає міліамперметр – у положенні "Увімкнено".
2. Перемикач ємності P_3 коливального контуру встановити в середнє положення, а перемикач частоти P_2 генератора – у крайнє ліве положення. Увімкнути прилад і зачекати 2 хвилини, поки нагріється катод лампи. Свідченням готовності приладу до роботи є те, що гальванометр почне показувати струм.
3. **Вимкнути міліамперметр**, встановити на конденсаторі перемикачем P_3 перше значення ємності C_1 (задається викладачем). Встановити між коливальним контуром та генератором індуктивний зв'язок, тобто перевести повзунок P_1 у крайнє праве положення.
4. Поворотом перемикача частоти P_2 добитись загорання лампи L та записати значення резонансної частоти $\nu_{рез1}$ для ємності C_1 .
5. Перевести повзунок P_1 у крайнє ліве положення (індуктивний зв'язок генератора з контуром мінімальний) та увімкнути міліамперметр. Змінюючи значення частоти генератора ν , записати відповідні їм значення сили струму I . Дані вимірювань занести до таблиці 4.2.1.
6. Повторити п.п. 4-6 для двох наступних значень ємності конденсатора (задаються викладачем). Всі дані вимірювань для кожного значення C занести до таблиці за зразком 4.2.1.
7. Користуючись отриманими даними, побудувати резонансні криві $I=f(\nu)$.

8. Визначити смуги пропускання коливального контуру. Для цього на кожному графіку $I=f(\nu)$ провести пряму, паралельну осі частот на рівні $I_{\text{рез}}/\sqrt{2}$, точки перетину спроектувати на вісь частот і розрахувати ширину резонансних кривих $\Delta\omega=2\pi\Delta\nu$.
9. Обчислити добротність коливального контуру для кожного значення ємності за формулою (4.1.6), де $\omega_0 = 2\pi\nu_{\text{рез}}$.

Таблиця 4.2.1

C, пФ							
$\nu_{\text{рез}}$, МГц							
ν , МГц							
I, мА							
$\Delta\omega$, рад/с							
Q							

Контрольні запитання

1. З чого складається електричний коливальний контур?
2. Пояснити виникнення електромагнітних коливань у електромагнітному коливальному контурі.
3. Пояснити роботу лампового генератора незгасаючих коливань.
4. Яка система називається автоколивальною?
5. Опишіть перетворення енергії в електромагнітному коливальному контурі.
6. В чому полягає явище резонансу?
7. Вивести диференціальне рівняння вимушених коливань у електричному коливальному контурі.
8. Як залежить напруга на конденсаторі коливального контуру і сила струму в ньому від частоти зовнішньої ЕРС?
9. Чому дорівнює резонансна частота для сили струму в контурі і напруги на конденсаторі?
10. Що таке добротність коливального контуру?
11. Як залежить смуга пропускання коливального контуру від величини його опору?
12. Привести блок-схему автоколивальної системи.

Лабораторна робота № 4.3. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ

Мета роботи: вивчити процеси поширення коливань у суцільному середовищі; умови виникнення стоячих хвиль; визначити швидкість звуку в повітрі.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням даної роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: частота і період коливань; поперечні і поздовжні хвилі; швидкість пружних хвиль; стоячі хвилі; коливання струни; швидкість звуку в газах.

[1, т.1 §§ 11.1, 11.2, 11.6, 12.1–12.3; 2, §§153, 154, 157, 158; 4, т.1 §§ 93–97, 99, 101, 102]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 4.1.

Хвилею (хвильовим процесом) називають процес поширення коливань у просторі. Процес поширення у просторі коливань частинок суцільного пружного середовища, яке неперервно розподілене у просторі, називають *механічною (пружною) хвилею*. Деформація, що виникає у деякому місці, спричинює першопочаткове відхилення частинок середовища від положення рівноваги, а наявність між частинками середовища сил пружності зумовлює процес передачі коливального стану від одних частинок до інших. При поширенні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а лише коливаються навколо своїх положень рівноваги. Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передається лише стан коливального руху і його енергія. *Основною властивістю* усіх хвиль є перенесення енергії без перенесення речовини.

Розрізняють поздовжні та поперечні механічні хвилі. У *поздовжніх хвилях* частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, вони виникають внаслідок деформацій стиску і розтягу, тобто у твердих тілах, рідинах і газах. У *поперечних хвилях* частинки середовища коливаються перпендикулярно до напрямку розповсюдження хвилі, утворюються такі хвилі в результаті деформації зсуву, що можливо лише у твердих тілах.

Звуком називають пружні хвилі малої амплітуди, частоти яких лежать у межах від 16 до 20000 Гц. Хвилі з частотою менше 16 Гц називають *інфразвуком*, з частотою більше 20000 Гц – *ультразвуком*.

Хвилі, що переносять у просторі енергію називають біжучими. Рівняння плоскої біжучої пружної хвилі має вигляд:

$$\xi_1 = A \cos(\omega t - kx),$$

де ξ_1 – зміщення, A – амплітуда хвилі, $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число, x – відстань від джерела звуку.

Рівняння хвилі, що відбилася від поршня, має вигляд

$$\xi_2 = A \cos(\omega t + kx).$$

Внаслідок суперпозиції (накладання) в трубі виникне *стояча хвиля*, рівняння якої має вигляд:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos kx \cos \omega t,$$

де $2A \cos kx$ – амплітуда стоячої хвилі, яка залежить від координати x . З даного виразу видно, що в деяких точках труби амплітуда коливань дорівнює нулю. Ці точки називають *вузлами стоячої хвилі*. Точки в яких амплітуда стоячої хвилі досягає максимального значення, називають *пучностями*. З виразу для амплітуди стоячої хвилі можна отримати координати вузлів та пучностей стоячої хвилі:

$$x_{\text{в}} = (2m + 1)\frac{\lambda}{4} \quad \text{та} \quad x_{\text{п}} = m\frac{\lambda}{2}, \quad \text{де } m = 0, 1, 2, \dots$$

Як видно з цих формул, відстань між сусідніми вузлами або пучностями становить (рис. 4.3.1, б):

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}. \quad (4.3.1)$$

Відмінність між стоячою хвилею та біжучою хвилею полягає в тому, що в стоячій хвилі зовсім немає *перенесення енергії*.

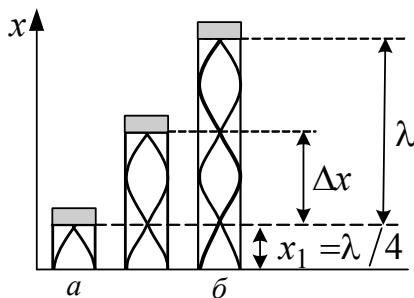


Рис. 4.3.1

Картину стоячої хвилі у повітряному стовпі різної довжини зображено на рисунку 4.3.1. Як видно з рисунка, в усіх випадках, коли утворюється стояча хвиля, біля поршня знаходиться вузол, а біля відкритого кінця – пучність (рис. 4.3.1,а). Слід зауважити, що при накладанні падаючої та відбитої хвиль не завжди утворюється стояча хвиля. Для труби, за-

критої з одного боку, повинна виконуватись умова: відстань між поршнем та джерелом звуку (рис. 4.3.1, *a*) має бути кратною $\lambda/4$.

Для всіх біжучих хвиль справедливе співвідношення:

$$v = \lambda \nu, \quad (4.3.2)$$

де v – швидкість поширення хвилі, λ – довжина хвилі, ν – частота коливань.

Отже, визначення швидкості звуку зводиться до визначення довжини хвилі λ . Як видно з формули (4.3.1) та рис. 4.3.1, довжина хвилі дорівнює подвоєній відстані між сусідніми пучностями хвилі:

$$\lambda = 2 \Delta x. \quad (4.3.3)$$

Швидкість поширення звуку залежить від температури середовища. Для повітря:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (4.3.4)$$

де $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ – показник адіабати, для повітря $\gamma = 1,4$; $\mu = 0,029$ кг/моль –

молярна маса повітря. При температурі $t = 0$ °С згідно формули (4.3.3), швидкість повітря $v = 330$ м/с, а при кімнатній температурі $t = 17$ °С – $v = 340$ м/с.

Лабораторна установка (рис. 4.3.2) складається з циліндричної трубки T , яка закрита з одного боку поршнем Π , з'єднаним з блоком B . Знизу біля відкритого кінця труби знаходиться джерело звуку Γ – мембрана генератора звукових коливань (значення частоти ν вказано на установці). Координати точок пучностей x_1 вимірюються за допомогою лінійки L .

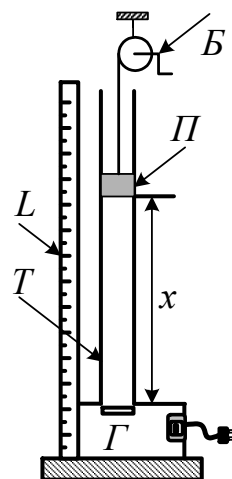


Рис. 4.3.2

Хід роботи

1. Ознайомитись з установкою. Ввімкнути живлення генератора звукових коливань Γ .
2. Обертаючи ручку блока B повільно піднімати поршень, при цьому гучність звуку буде періодично змінюватись.
3. Виміряти декілька положень поршня x_i , при яких гучність досягає максимального значення.

4. Розрахувати відстань $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ між двома сусідніми положеннями поршня, при яких гучність досягає максимального значення.
5. Розрахувати середнє значення $\Delta x_{\text{сер}}$.
6. За формулою (4.3.3) знайти довжину звукової хвилі λ .
7. Користуючись формулою (4.3.2), знайти швидкість звуку в повітрі $v_{\text{експ}}$ при температурі досліду.
8. Порівняти отриману експериментально швидкість v з результатом розрахунку $v_{\text{теор}}$ за формулою (4.3.4).
9. Всі результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці 4.3.1.

Таблиця 4.3.1

№ п/п	x_i , м	Δx_i , м	$\Delta x_{\text{сер}}$, м	λ , м (4.3.3)	$v_{\text{експ}}$, м/с (4.3.2)	T , К	$v_{\text{теор}}$, м/с (4.3.4)

Контрольні запитання

1. Дайте означення хвильового процесу.
2. Які хвилі називають пружними?
3. Дайте означення поздовжніх і поперечних хвиль.
4. Виведіть рівняння плоскої монохроматичної синусоїдальної хвилі, що біжить.
5. Що називають довжиною хвилі? Запишіть формулу зв'язку між довжиною і частотою хвилі.
6. Від яких параметрів залежить швидкість звуку в газах?
7. Що таке стояча хвиля? Запишіть її рівняння.
8. Що таке вузол та пучність стоячої хвилі? Визначте їх взаємне розташування.
9. Що таке звук? інфра- та ультразвук? Наведіть приклади застосування ультразвуку.

Лабораторна робота № 4.4. ВИВЧЕННЯ РОБОТИ РЕЛАКСАЦІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА

Мета роботи: вивчити автоколивання, нелінійні та релаксаційні коливання; дослідити релаксаційний генератор залежність його частоти коливань від ємності конденсатора.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням роботи слід вивчити такий теоретичний матеріал: гармонічний осцилятор; вільні коливання в електричному коливальному контурі; нелінійні коливальні системи; автоколивання та релаксаційні коливання.

[1 §§ 50, 53, 58, 59; 2 §§ 89, 90; 3 §§ 93, 96-99, 101, 102; 4 §§ 153-158]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 3.1, № 4.1, № 4.2.

Релаксаційними називають автоколивання впродовж періоду яких уся нагромаджена в системі енергія розсіюється. Виникають такі коливання у релаксаційних генераторах.

Релаксаційний генератор – одна з найпростіших автоколивальних систем. Схему генератора наведено на рисунку 4.4.1. Основні його елементи – це джерело постійного струму \mathcal{E} , зарядний резистор R , неонові лампа L , конденсатор C .

Принцип роботи релаксаційного генератора ґрунтується на особливостях його основного елемента – неонові лампи. У найпростішому випадку неонові лампи являють собою два металевих електроди, впаєних у скляну колбу. Колбу заповнено неонам, тиск якого значно менший за атмосферний. Нелінійні властивості неонові лампи визначаються властивостями *газового розряду*, який є електричним струмом у газах.

За звичайних умов атоми інертного газу нейтральні, тому поява на електродах лампи різниці потенціалів U не призведе до виникнення електричного струму, оскільки *відсутні вільні носії заряду*. Для виникнення струму необхідно, щоб у газі були створені вільні заряджені час-

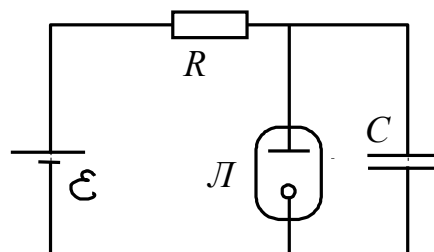


Рис. 4.4.1

тинки. За реальних умов в об'ємі неоновій лампі існує певна кількість вільних іонів та електронів, народжених *зовнішнім іонізатором* – радіоактивними променями різного походження: космічними променями, випромінюванням радіоактивних ядер, розсіяних як у земній корі, так і в матеріалах, з яких виготовлено елементи установки. Наявність таких іонів призводить до виникнення *несамостійного газового розряду*, але величина струму надзвичайно мала і на роботу установки не впливає.

Електричний струм в газі, який виникає без дії зовнішнього іонізатора, називають *самостійним газовим розрядом*. Головним джерелом утворення вільних носіїв заряду (іонів) у цьому випадку є *ударна іонізація атомів газу електронами*, які прискорюються, наприклад, сильним неоднорідним електричним полем.

В релаксаційному генераторі, коли напруга на неоновій лампі стає настільки великою, що народжені радіоактивними променями електрони прискорюються на довжині вільного пробігу та досягають такої енергії, що здатні іонізувати атоми при зіткненні з ними, виникають вторинні електрони та іони. Вторинні електрони, в свою чергу, іонізують нові атоми. Таким чином, виникає лавиноподібний процес, при якому електрони рухаються до анода, а іони – до катода. Іони вибивають з катода електрони (явище вторинної іон-електронної емісії), які стають джерелом нового лавиноподібного процесу. Електрони не тільки іонізують, а й збуджують атоми. *Свічення збуджених атомів* є характерною ознакою самостійного газового розряду.

Таким чином, *необхідна умова* існування самостійного газового розряду – наявність такої напруженості електричного поля, при якій електрони на довжині вільного пробігу λ набувають енергії більшої або рівної енергії іонізації атомів $W_{\text{іон}}$:

$$eE\lambda \geq W_{\text{іон}}. \quad (4.4.1)$$

До виникнення самостійного газового розряду напруженість поля E пов'язана з напругою U на лампі та відстанню між електродами l :

$$E = \frac{U}{l}. \quad (4.4.2)$$

З виразів (4.4.1) та (4.4.2) отримаємо напругу запалювання (спалахування) лампи:

$$U_3 = \frac{W_{\text{іон}} \cdot l}{e \cdot \lambda}. \quad (4.4.3)$$

При самостійному розряді наявність великої кількості іонів призводить до виникнення в області катода електричного поля із значно більшою напруженістю, ніж це випливає із (4.4.2). Внаслідок цього розряд у лампі можливий при більш низьких значеннях напруги на електродах. Напруга U_{Γ} , при якій самостійний розряд вже не може існувати, називається *напругою гасіння*. Вона завжди менша, ніж U_3 (рис. 4.4.2).

Другим важливим елементом релаксаційного генератора є конденсатор або батарея конденсаторів. *Конденсатором* називають систему близько розташованих провідників, розділених діелектриком для накопичення і зберігання електричних зарядів. Конденсатор характеризують електричною ємністю. *Ємність конденсатора* чисельно дорівнює заряду, який необхідно перенести з однієї обкладки на іншу, щоб змінити різницю потенціалів між обкладками на одиницю:

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

Ємність системи паралельно або послідовно з'єднаних конденсаторів визначають за формулами:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i, \quad (4.4.4)$$

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (4.4.5)$$

Розглянемо роботу релаксаційного генератора. При замиканні кола (рис. 4.4.1) конденсатор C почне заряджатись. Тривалість зарядки конденсатора тим більша, чим більші ємність C та опір резистора R . Закон наростання напруги на конденсаторі можна визначити з таких міркувань.

У будь-який момент часу t напруга на конденсаторі:

$$U = \varepsilon - IR, \quad (4.4.6)$$

де струм I зарядки у колі:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CU)}{dt}. \quad (4.4.7)$$

З (4.4.6) та (4.4.7) отримаємо:

$$\frac{dU}{\varepsilon - U} = -\frac{dt}{RC}. \quad (4.4.8)$$

Якщо врахувати, що при $t = 0$ та $U = 0$, то після інтегрування рівняння (4.4.8) отримаємо залежність напруги від часу:

$$U = \varepsilon \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \quad (4.4.9)$$

Графік залежності напруги U на конденсаторі від часу показано на рисунку 4.4.2 (крива OBN). Напруга на конденсаторі асимптотично прямує до ЕРС джерела струму ε , але,

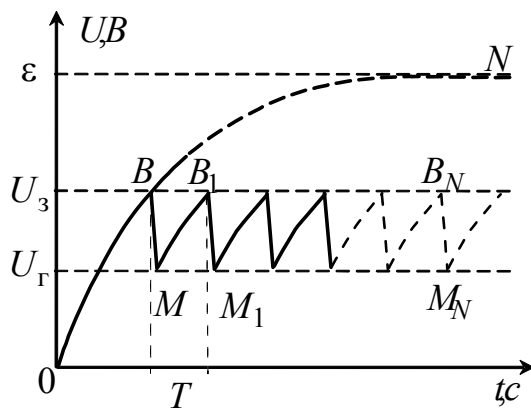


Рис. 4.4.2

коли $U = U_3$ (точка B на рис. 4.4.2), у лампі виникає самостійний розряд і її внутрішній опір різко зменшується. В результаті конденсатор починає швидко розряджатись через лампу. Конденсатор розряджається лише частково, бо коли $U = U_\Gamma$ (точка M), лампа гасне і її опір стає дуже великим. В резуль-

таті конденсатор знову має змогу заряджатись від джерела струму.

Таким чином, виникають періодичні цикли зарядки – розрядки конденсатора (криві $BM, B_1M_1, \dots, B_NM_N$). Оскільки при зарядці напруга на конденсаторі носить релаксаційний характер, ці коливання називаються релаксаційними. *Релаксаційні коливання* – частковий випадок негармонійних автоколивальних процесів.

Якщо проаналізувати схему 4.4.2, то можна зробити висновок, що *періодом релаксаційних коливань* є час між сусідніми однаковими фазами напруги. На досліді його зручно визначати як час між двома послідовними спалахами лампи. З рівняння (4.4.9) для $t = T$ можна отримати:

$$T = R \cdot C \cdot \ln \frac{\varepsilon - U_\Gamma}{\varepsilon - U_3} = k \cdot R \cdot C, \quad (4.4.10)$$

де константу $k = \ln[(\varepsilon - U_\Gamma)/(\varepsilon - U_3)]$ визначають параметри неонові лампи та джерела струму. Її можна визначити експериментально, використовуючи відомі значення R, C_i та вимірюючи для кожного значення C_i відповідний період коливань T_i .

Якщо далі побудувати графік $T = f(R \cdot C)$, то за відомим тангенсом кута нахилу можна визначити k . За допомогою вимірювань при дослідження роботи релаксаційного генератора можна визначити значення ємності C_X за формулою:

$$C_X = \frac{T_x}{k \cdot R}. \quad (4.4.11)$$

Хід роботи

Увага! Доторкатись до схеми можна лише після повної розрядки конденсаторів.

1. Приєднати до схеми генератора по черзі кожний із конденсаторів з відомою ємністю C_i . Ввімкнути джерело струму і визначити час t_i для $N_i = 20 \dots 30$ послідовних спалахів лампи. Обчислити період коливань $T_i = t_i / N_i$ для кожного конденсатора.
2. Повторити операції п. 1 складаючи батарею з 3 конденсаторів різної ємності C_i , приєднуючи їх спочатку паралельно, потім послідовно.
3. За формулами (4.4.4) та (4.4.5) розрахувати ємність батареї конденсаторів $C_{\text{заг}}$.
4. Обчислити добуток опору резистора R на ємність конденсатора або батареї конденсаторів $C_i / C_{\text{заг}}$. За отриманими даними побудувати графік $T = f(R \cdot C)$.
5. Обчислити кутовий коефіцієнт нахилу графіка: $k = \frac{\Delta T}{\Delta(R \cdot C)}$.
6. Результати вимірювань та обчислень занести до таблиці 4.4.1.
7. Скласти батарею з паралельно та послідовно з'єднаних 2-3 конденсаторів (задається викладачем). Визначити час t_x для $N_x = 20 \dots 30$ послідовних спалахів лампи. Обчислити період коливань $T_x = t_x / N_x$ та розрахувати ємність батареї конденсаторів C_x за формулою (4.4.11).

Таблиця 4.4.1.

№ п/п	C_i, Φ	$C_{\text{заг}}, \Phi$ (4.4.4) (4.4.5)	$t_i, \text{с}$	N_i	$T_i, \text{с}$	$R, \text{Ом}$	$(R \cdot C),$ $\text{Ом} \cdot \Phi$	k
1.		-						
2.		-						
3.		-						
4.								
5.								

8. Визначити теоретичну загальну ємність складеної батареї конденсаторів $C_{\text{теор}}$, використавши формули (4.4.4) та (4.4.5).
9. Результати вимірювань та обчислень занести до таблиці 4.4.2.
10. Порівняти отримане експериментальне значення ємності C_x з теоретичним значенням $C_{\text{теор}}$.

Таблиця 4.4.1.

C_i, Φ	$t_x, \text{с}$	N_x	$T_x, \text{с}$	C_x, Φ (4.4.11)	$C_{\text{теор}}, \Phi$ (4.4.4), (4.4.4)

Контрольні запитання

1. Що таке автоколивання? Наведіть приклади автоколивальних систем.
2. Які коливання називають релаксаційними?
3. Зобразіть схему релаксаційного генератора та опишіть процеси, що у ньому відбуваються.
4. Що називають самостійним газовим розрядом. Сформулюйте умови виникнення самостійного газового розряду в газі.
5. Чи є гармонійними релаксаційні коливання? Поясніть чому.
6. Як змінюється з часом зарядний струм у колі?
7. Чи зміниться амплітуда релаксаційних коливань при зміні опору зарядного резистора?
8. Що визначає швидкість зарядки конденсатора?
9. Чому величина U_3 більша від U_T ?
10. Чи можна віднести релаксаційний генератор до автоколивальних систем?
Поясніть чому.

Лабораторна робота № 5.1. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІПРИЗМИ ФРЕНЕЛЯ

Мета роботи: вивчити явище інтерференції світла, визначити довжину світлової хвилі за допомогою біпризми Френеля.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи слід вивчити такий теоретичний матеріал: плоскі та сферичні хвилі; хвильовий фронт; інтерференція світла; когерентність; способи одержання когерентного світла; інтерференційна картинка, умови утворення максимумів та мінімумів; різниця ходу променів. [1 §§ 153, 171-173,175; 2 §§ 119-121; 3 §§ 119,121; 4 §§ 171, 173, 174]

Визначення довжини світлової хвилі в даній роботі базується на явищі інтерференції світла. *Інтерференція* – це явище перерозподілу інтенсивності світлового потоку в просторі при накладанні когерентних хвиль, внаслідок чого виникають стійкі максимуми та мінімуми освітленості. Для здійснення інтерференції світла необхідно отримати когерентні світлові пучки. *Когерентність* – це узгоджене протікання в часі декількох хвильових процесів, при якому частоти коливань однакові, а різниця початкових фаз джерел світла залишається незмінною.

Природні джерела оптичного випромінювання складаються з великої кількості атомів, які випромінюють хвилі фактично незалежно один від одного. Крім того, атоми випромінюють достатньо короткі світлові імпульси тривалістю порядку $\tau \sim 10$ нс з випадковими початковими фазами. Таке випромінювання атомів у вигляді окремих світлових імпульсів називають хвильовим цугом. Середня тривалість одного цуга – час когерентності $\tau_{\text{ког}}$, а відстань, яку проходить світло у вакуумі за час когерентності $l_{\text{ког}} = c \cdot \tau_{\text{ког}}$. Когерентність існує лише у межах одного цуга, а тому прилад зафіксує інтерференцію, коли оптична різниця ходу Δ між променями менша довжини когерентності.

Існує також поняття просторової когерентності, тобто *обмеження на спостереження інтерференції*, яке виникає через поперечні розміри джерела. Внаслідок обмежень, пов'язаних із часовою і просторовою когерентністю, для спостереження інтерференції слід розбити хвильовий

фронт на дві частини і звести їх потім у місці спостереження. У цьому разі в даній точці накладаються два променя від одного і того ж атома. Ці промені когерентні, тому при різниці ходу між ними

$$\Delta_{\max} = \pm m\lambda,$$

де ($m = 0, 1, 2, \dots$), виникає максимум освітленості (інтерференційний максимум), а при умові $\Delta_{\min} = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}$ – мінімум освітленості (інтерференційний мінімум).

Прикладом того, яким чином розбивається хвильовий фронт, а когерентні промені сходяться в даній точці, є біпризма Френеля. Вона являє собою дві однакові призми з малим заломлюючим кутом, з'єднані основами (рис. 5.1.1).

Біпризму Френеля освітлюють за допомогою вузької щілини, краї якої паралельні ребру біпризми. З рисунку 5.1.1 випливає, що внаслідок заломлення у біпризмі за нею поширюються дві циліндричні світлові хвилі, що неначе виходять з уявних зображень щілини S_1 та S_2 . Оскільки ці пучки утворюються з одного фронту, вони є когерентними, а тому там, де вони перекриваються (заштрихована область), буде спостерігатись інтерференція.

Для розрахунку параметрів інтерференційної картини (рис. 5.1.2) розглянемо промені S_1O_1 та S_2O_1 , що попадають у точку O_1 екрана від кожного з джерел S_1 та S_2 .

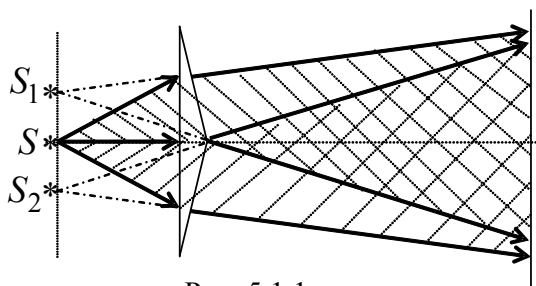


Рис. 5.1.1

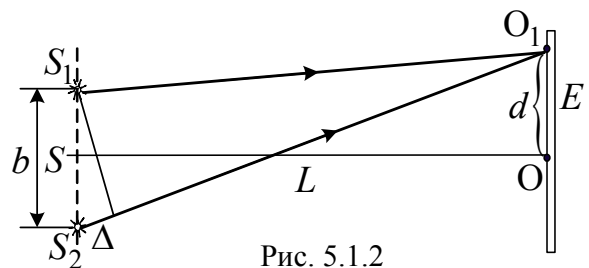


Рис. 5.1.2

Якщо врахувати, що $S_1O_1 + S_2O_1 \approx 2 \cdot SO$, то з рисунку 5.1.2 випливає, що оптична різниця ходу $\Delta = |S_2O_1 - S_1O_1| \cdot n$ дорівнює:

$$\Delta = \frac{OO_1 \cdot S_1S_2}{SO} \cdot n, \quad (5.1.1)$$

де n – показник заломлення середовища.

Введемо позначення: $S_1S_2 = b$, $SO = L$ а $OO_1 = d$ (рис. 5.1.2). Якщо різниця ходу становить ціле число довжин хвиль λ , тоді в точці O_1 на екрані буде спостерігатись інтерференційний максимум. Його координати для випадку спостереження в повітрі ($n = 1$):

$$d_m = \pm m \cdot \frac{L}{d} \cdot \lambda, \quad (5.1.2)$$

де m – порядок інтерференційного максимуму, причому $m = 0, 1, 2, \dots$. Інтерференційному мінімуму відповідає умова

$$d_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{L}{d} \lambda. \quad (5.1.3)$$

Шириною інтерференційної смуги називають відстань між сусідніми інтерференційними мінімумами:

$$\Delta d = \frac{L}{b} \lambda. \quad (5.1.4)$$

Таким чином, якщо відомі порядок інтерференційної смуги m , відстань d_m від неї до центра інтерференційної картини, та відстань від щілини до екрана L , то при відомій відстані між уявними джерелами відповідна довжина хвилі падаючого світла буде:

$$\lambda = \frac{d_m \cdot b}{m \cdot L}. \quad (5.1.5)$$

Величину d_m можна виміряти за допомогою мікрометричної шкали окуляра.

Для визначення відстані b між уявними джерелами S_1 та S_2 пропонується використати лазер як джерело світла з відомою довжиною хвилі червоного кольору $\lambda = 630$ нм. Для цього лазерний промінь необхідно пропустити крізь біпризму Френеля. В результаті на екрані буде спостерігатись не одна світлова пляма, а дві (рис. 5.1.3).

З рисунку 5.1.3 внаслідок подібності трикутників BOO_1 та S_1O_1S випливає, що:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{OB}{OO_1} = \frac{b}{2 \cdot SO_1}. \quad (5.1.6)$$

За відомими з досліду значеннями OB та OO_1 можна визначити $\operatorname{tg} \alpha$, за значенням $\operatorname{tg} \alpha$ – відстань між уявними джерелами b . Величина

b характеризує біпризму, тому вона одна й та сама і для випромінювання лазера, і для випромінювання лампи.

Для визначення довжини хвилі світла λ у видимому діапазоні в даній роботі використовують оптичну лаву (рис. 5.1.4), на якій розміщені по черзі: джерело світла D (лампочка), щілина C , біпризма Френеля BF , окулярний мікрометр OK . Екраном, на якому отримується зображення інтерференційної картини є сітчатка ока спостерігача (рис. 5.1.4).

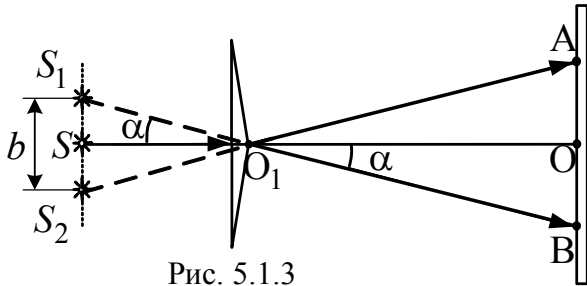


Рис. 5.1.3

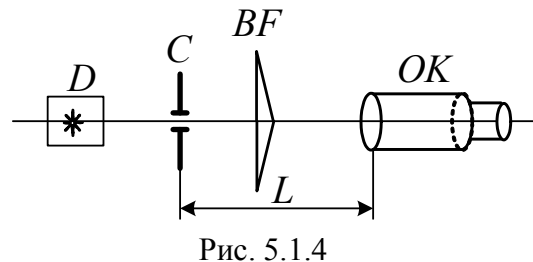


Рис. 5.1.4

Хід роботи

1 частина (визначення b)

1. Ввімкнути лазер. Поставити на шляху променя біпризму Френеля на відстані 17-18 см від вихідного вікна лазера так, щоб її ребро проходило через центр пучка. Тоді він роздвоїться, і на екрані буде спостерігатись дві світлові плями.
2. Виміряти відстань АВ між зображеннями, що дає біпризма Френеля на екрані та відстань OO_1 від зображення до біпризми (рис. 5.1.3).
3. Розрахувати відстань b між уявними джерелами за формулою (5.1.6).
4. Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці 5.1.1.

Таблиця 5.1.1

AB, м	OB=AB/2, м	SO ₁ , м	tgα	b, м

2 частина (визначення λ)

1. Встановити біпризму Френеля на оптичну лаву (рис. 5.1.4) так, щоб її ребро було вертикальним і паралельним щілині. За біпризмою на відстані 20..30 см від неї встановити окулярний мікрометр OK .
2. Повертати біпризму BF за та проти годинникової стрілки для досягнення чіткості інтерференційної картини. Для отримання найкращого співвідношення яскравості та чіткості картини змінювати ширину щілини C .

3. Виміряти відстань від щілини до об'єктива мікрометра L (рис. 5.1.4).
4. Визначити ціну поділки мікрометричної шкали в окулярі.
5. Визначити за допомогою шкали окулярного мікрометра OK відстань d_m зліва та справа від центральної незабарвленої смуги до першої ($m_1 = 1$) та другої ($m_2 = 2$) зеленої компоненти смуги. Знайти середнє значення для $\langle d_m \rangle$ для кожного максимуму.
6. Повторити п. 5 для червоної смуги.
7. За формулою (5.1.5) розрахувати довжину хвилі зеленого та червоного кольору для кожного максимуму та знайти їхнє середнє значення.
8. Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці 5.1.2.

Таблиця 5.1.2

$L, \text{ м}$	m	$d_{\text{зел}}, \text{ м}$		$d_{\text{чер}}, \text{ м}$		$\langle d_{\text{зел}} \rangle, \text{ м}$	$\langle d_{\text{чер}} \rangle, \text{ м}$	$\langle \lambda_{\text{зел}} \rangle, \text{ м}$	$\langle \lambda_{\text{чер}} \rangle, \text{ м}$
	1								
	2								

Контрольні запитання

1. Яке оптичне явище називають інтерференцією?
2. Що таке хвильовий фронт?
3. Які джерела називають когерентними?
4. Що таке довжина когерентності? Яку величину називають радіусом когерентності?
5. Що таке оптична довжина шляху та оптична різниця ходу?
6. Яким чином та за яких умов виникають інтерференційні максимуми та мінімуми?
7. Побудувати хід променів у біпризмі Френеля.
8. Яким чином виникають кольори тонких плівок?
9. Чи зміниться ширина інтерференційних смуг при наближенні окулярного мікрометра до біпризми?
10. Які методи отримання інтерференції Ви знаєте?
11. Наведіть приклади інтерференційних картин у природі.

Лабораторна робота № 5.2. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ РЕШІТКИ

Мета роботи: вивчити явище дифракції; визначити за допомогою дифракційної решітки довжину світлової хвилі; визначити товщину людської волосини по дифракційній картині, яка утворюється за допомогою лазерного випромінювання.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи слід вивчити такий матеріал: дифракція хвиль; дифракція в паралельних променях; дифракційна решітка та її характеристики.

[1, т.3 §§ 4.1–4.5; 2, §§ 176–181; 3, §§ 12.4–12.6; 4, т.2 §§ 125–130]

Перед виконанням ознайомитись з вказівками до роботи № 5.1.

Дифракцією називають явища, пов'язані з огинанням хвилями перешкод, які зустрічаються на їхньому шляху, або, в більш широкому розумінні – явища, пов'язані з будь-яким відхиленням від законів геометричної оптики при розповсюдженні світла. Для пояснення явища дифракції *Гюйгенс* сформулював *принцип*, згідно з яким кожна точка простору, до якої доходить хвильовий фронт стає центром вторинних когерентних хвиль, а огинаюча цих хвиль дає положення хвильового фронту в наступний момент часу.

Френель доповнив принцип Гюйгенса ідеєю інтерференції цих

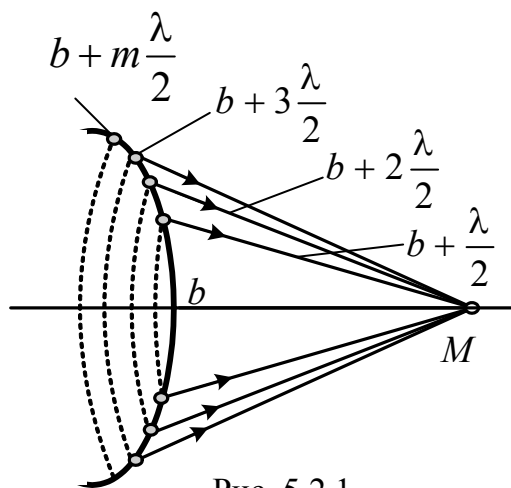


Рис. 5.2.1

вторинних хвиль. Він запропонував розбити сферичний хвильовий фронт на зони таким чином, щоб відстань від країв зон (когерентних джерел хвиль) до точки спостереження *M* (рис. 5.2.1) відрізнялась на $\lambda/2$. Тоді в залежності від числа зон m в точці *M* може спостерігатись підсилення або послаблення інтенсивності хвиль при їхньому накладанні.

Якщо ширина перешкоди (наприклад, щілина) буде b , відстань від неї до точки спостереження – l , а довжина хвилі – λ , то параметр $b^2/(l \cdot \lambda)$ визначає число зон Френеля m , які відкриває дана перешкода. Отже, дифракцію можна спостерігати лише тоді, коли $m \ll 1$ (дифракція Фраунго-

фера) або при $m \sim 1$ (дифракція Френеля). Якщо $m \gg 1$, то реалізуються закони геометричної оптики.

Найбільше практичне значення має дифракція, яку спостерігають в паралельних променях (дифракція Фраунгофера) при проходженні світла через одномірну дифракційну решітку (рис. 5.2.2).

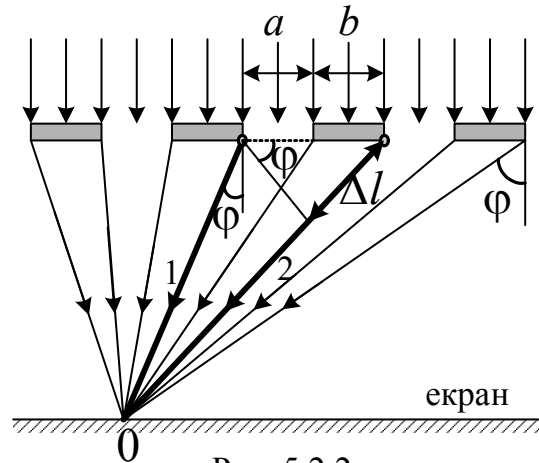


Рис. 5.2.2

Дифракційна решітка – це система паралельних щілин рівної ширини, які лежать в одній площині і розділені рівними по ширині непрозорими проміжками. Якщо a – ширина непрозорої частини, а b – ширина прозорої щілини, то сума $d = b + a$ має назву сталої (періоду) дифракційної решітки.

Якщо кількість прозорих щілин решітки на одиниці довжини l буде N (число штрихів), то стала дифракційної решітки знаходиться за спів-

відношенням:

$$d = \frac{l}{N}. \quad (5.2.1)$$

Нехай, на дифракційну решітку падає плоска світлова хвиля (рис. 5.2.1). Згідно принципу Гюйгенса – Френеля кожна точка цього фронту є джерелом вторинних сферичних когерентних хвиль. Внаслідок цього усі точки кожної щілини випромінюють сферичні хвилі. Візьмемо, наприклад, точки, що лежать біля країв усіх щілин і розглянемо промені, які випромінюються під кутом φ до напрямку поширення плоскої хвилі (кути дифракції φ будемо вважати малими). Освітленість у точці 0 на екрані буде результатом інтерференції усіх променів. З рисунку 5.2.1 видно, що між променями 1 та 2 виникає різниця ходу:

$$\Delta l = (a + b) \cdot \sin \varphi = d \cdot \sin \varphi.$$

Якщо на даній різниці ходу вкладається ціле число довжин хвиль, то виникає інтерференційний максимум. Таким чином, умовою головних дифракційних максимумів є:

$$d \cdot \sin \varphi = m\lambda, \quad (5.2.2)$$

де d – стала решітки; φ – кут дифракції; m – порядок дифракційного максимуму; λ – довжина світлової хвилі.

Частина 1

Якщо кути дифракції малі (рис. 5.2.3), то $\sin \varphi \approx \text{tg} \varphi$, тобто:

$$\text{tg} \varphi \approx \frac{l_m}{L}. \quad (5.2.3)$$

З виразів (5.2.2) та (5.2.3) випливає, що довжина хвилі:

$$\lambda = \frac{d \cdot l_m}{m \cdot L}, \quad (5.2.4)$$

де l_m – відстань від центрального максимуму до дифракційного максимуму m -го порядку; L – відстань від решітки до екрана.

В даній лабораторній роботі джерелом світла є оптичний квантовий генератор ОКГ (лазер). Схему лабораторної установки зображено на рисунку 5.2.3. Випромінювання лазера (ОКГ) проходить крізь дифракційну решітку $ДР$ і створює на екрані E картину дифракції.

Хід роботи

1. Отримати у лаборанта набір дифракційних решіток та згідно з ін-

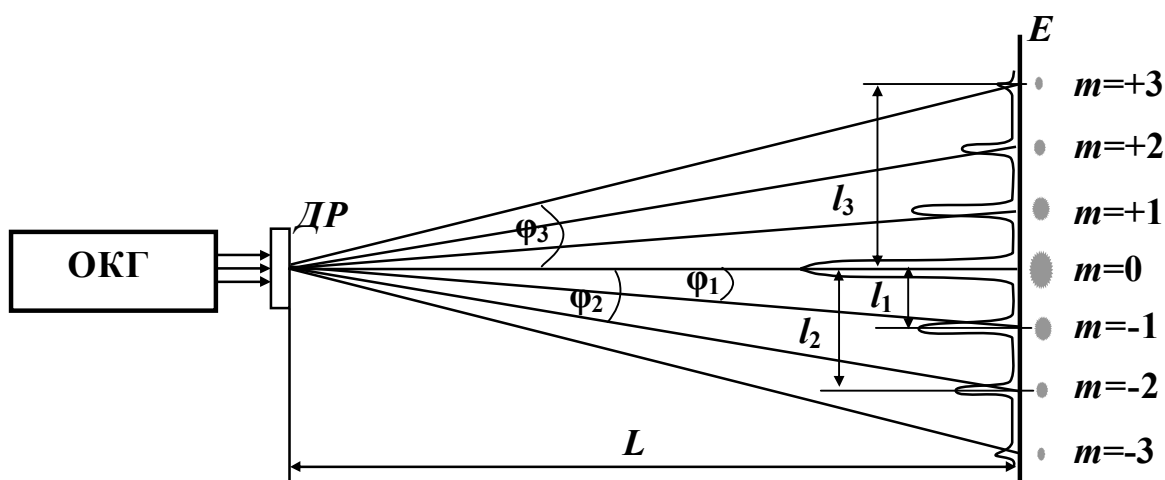


Рис.5.2.3

струкцією ввімкнути лазер.

2. Визначити кількість штрихів N на одиницю довжини для кожної дифракційної решітки та розрахувати сталу d дифракційної решітки за формулою (5.2.1).
3. Встановити на шляху лазерного променя дифракційну решітку з відомою кількістю штрихів N .

4. Спостерігаючи на екрані картину дифракції, виміряти відстані l_1, l_2, l_3 від центрального максимуму ($m = 0$) до максимумів першого, другого та третього порядків ($m = 1, 2, 3$).
5. Виконати операції пунктів 2 – 3 для кожної дифракційної решітки.
6. Визначити відстань від решітки до екрана L .
7. Обчислити довжину світлової хвилі за формулою (5.2.4) для кожного вимірювання l_m .
8. Обчислити середнє значення довжини хвилі $\lambda_{\text{середнє}}$.
9. Дані занести до таблиці 5.2.1.

Таблиця 5.1.1

Тип решітки		Відстань до максимумів			$L, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$\lambda_{\text{середнє}}, \text{ мкм}$
N	$d, \text{ м}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$			

Частина 2

В основу другої частини лабораторної роботи покладене явище дифракції, яке виникає при внесенні в паралельний пучок лазерних променів тонкої перешкоди (наприклад волосу людини) товщиною b .

Хід променів у цьому випадку показаний на рисунку 5.2.3.

Випромінювання лазера проходить крізь волос людини B і створює на екрані E картину дифракції.

Формула (5.2.2) для випадку дифракції на одній перешкодці шириною b (товщина волосу) матиме вигляд:

$$b \sin \varphi = m\lambda. \quad (5.2.5).$$

З виразів (5.2.2) та (5.2.3) випливає, що

$$b \cdot \frac{l_m}{L} = m\lambda, \quad (5.2.6).$$

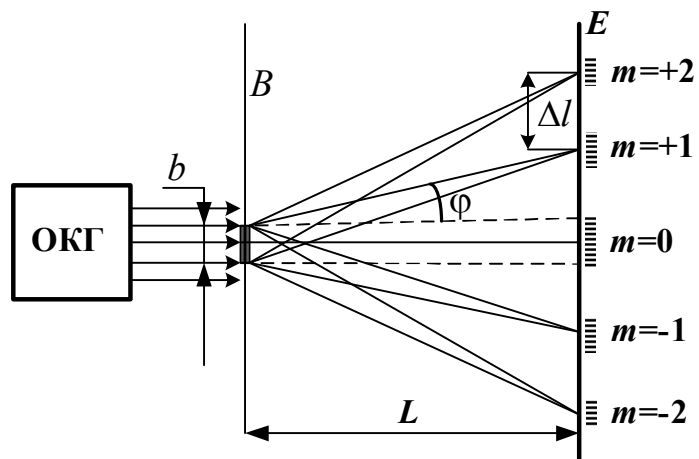


Рис.5.2.3

де l_m – відстань від центрального максимуму до дифракційного максимуму m – го порядку.

Записавши вираз (5.2.6) для двох сусідніх максимумів, та, віднявши одне рівняння від іншого, отримуємо формулу для обчислення товщини волосу:

$$b = \frac{\lambda \cdot L}{\Delta l} \quad (5.2.7)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання лазера, значення якої беруть із результатів обчислень, проведених у першій частині роботи; L – відстань від волосу до екрану; Δl – відстань між двома сусідніми максимумами або мінімумами дифракційної картини $\Delta l = l_{m+1} - l_m$.

Хід роботи

1. Волосину закріпити перпендикулярно до пучку променів лазера.
2. Три рази виміряти на екрані величину Δl між сусідніми максимумами різних порядків m . Для кожного виміру Δl_m обчислити значення b за формулою (5.2.7) і знайти середнє значення $b_{\text{сер}}$ в мікрометрах.
3. Дані занести до таблиці 5.2.2.

Таблиця 5.2.2

Відстань між максимумами			$L, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$b_{\text{сер}}, \text{ мкм}$
$\Delta l_1, \text{ м}$	$\Delta l_2, \text{ м}$	$\Delta l_3, \text{ м}$			

Контрольні запитання

1. Що таке дифракція? Сформулюйте принцип Гюйгенса – Френеля.
2. Що таке когерентність, почасова та просторова когерентності?
3. Які хвилі називають монохроматичними?
4. Чим відрізняється дифракція Фраунгофера від дифракції Френеля.
5. Що таке дифракційна решітка? Характеристики дифракційної решітки.
6. Що таке геометрична і оптична різниця ходу променів? Побудуйте хід променів при дифракції Фраунгофера і покажіть різницю ходу променів.
7. Запишіть умови дифракційних максимумів та мінімумів. Поясніть виникнення дифракційного спектру в білому світлі.

Лабораторна робота № 5.3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА

Мета роботи: вивчити явище поляризації світла і методи одержання поляризованих променів, перевірити закон Малюса, встановити ступінь поляризованості лазерного випромінювання.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: поляризація світла; поляризація світла при відбиванні та заломленні на межі двох діелектриків; подвійне променезаломлення у кристалах; закон Малюса; поляризаційні прилади.

[1, т.3, §§ 5.1, 5.2, 5.4–5.6; 2, §§ 190–194; 3, §§ 12.7; 4, т.2, §§ 134–136]

Дія світла на середовище переважним чином зумовлена *вектором напруженості електричного поля* електромагнітної хвилі, тому у оптиці цей вектор називають *світловим*. Якщо світловий вектор має переважний напрямок коливань, то світло називають поляризованим на відміну від неполяризованого, або природного світла, для якого будь-який напрямок коливань світлового вектора зустрічається з однаковою ймовірністю.

При поширенні світлового променя перпендикулярно до площини сторінки, основні випадки можливих орієнтацій світлового вектора схематично показано на рис. 5.3.1. На рис.5.3.1,*а* показано природне світло, на рис. 5.3.1,*б* зображено частково поляризоване світло (світловий вектор переважно коливається у вертикальній площині), а рис.5.3.1,*в* відповідає лінійно-поляризованому світлу (світловий вектор коливається тільки у одній, жорстко зафіксованій у просторі площині),

Оптичний прилад, при проходженні через який неполяризоване світло стає поляризованим, називається *поляризатором*. Площина поляризатора – це площина, у якій коливається світловий вектор пучка на виході з поляризатора. Поляризатор також використовують для аналізу стану поляризації

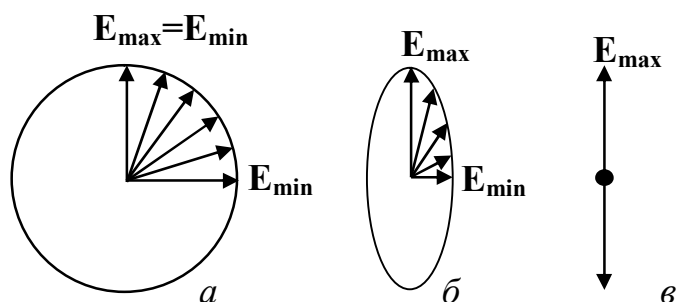


Рис. 5.3.1

світла. У цьому випадку його називають аналізатором.

Якщо площини поляризатора і аналізатора утворюють кут α , то при падінні на аналізатор світла інтенсивністю I_0 з нього вийде світловий пучок інтенсивністю (закон Малюса):

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (5.3.1)$$

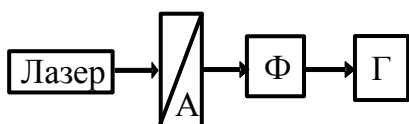
Нехай у загальному випадку на аналізатор падає частково (еліптично) поляризоване світло. Тоді при обертанні аналізатор за законом Малюса інтенсивність світла на виході буде змінюватись від I_{\max} (площина поляризації світла паралельна до площини аналізатора) до I_{\min} (площина аналізатора перпендикулярна до площини поляризації світла). Стан поляризації світла характеризують ступінню поляризації:

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%. \quad (5.3.2)$$

Для лінійно-поляризованого світла $k=1$, для природного світла $k=0$, а у випадку частково поляризованого світла $0 < k < 1$.

Найбільш поширеними є поляризатори, принцип дії яких базується на явищі анізотропії та оптичного дихроїзму. Як відомо, у анізотропних кристалах можуть поширюватись лише лінійно-поляризовані у взаємно-перпендикулярних площинах звичайний і незвичайний промені. У оптично-дихроїчних кристалах коефіцієнт поглинання одного з променів настільки великий, що цей промінь практично повністю поглинається на шляху порядку десяти мікрон і з кристала виходить фактично лінійно-поляризоване світло. *Поляроїд* – це два скла, між якими розташований тонкий шар орієнтованих у одному напрямі оптично-дихроїчних мікрокристалів.

Закон Малюса вивчають на установці, схему якої подано на рисунку 5.3.2. Джерело лінійно-поляризованого світла – лазер, одним з елементів якого є встановлений під кутом Брюстера поляризатор.



Лазерний промінь проходить крізь аналізатор (поляроїд) А і потрапляє на фотоприймач Ф. Під дією світла у фотоприймачі генерується фото ЕРС, а тому з'єднаний з ним гальванометр Г буде фіксувати струм, пропорційний інтенсивності падаючого світла.

Хід роботи

1. Згідно з інструкцією увімкнути лазер.
2. Встановити аналізатор у початкове положення (0°) і занести до табл. 5.3.1 відповідне значення сили струму I .
3. Повертаючи кожного разу аналізатор на кут 15° , визначати силу струму у діапазоні кутів $0...360^\circ$. Усі дані занести до табл. 5.3.1.
4. Вимкнути лазер.
5. За отриманими даними побудувати графік залежності $I = f(\alpha)$.
6. Користуючись графіком, визначити I_{\max} і I_{\min} .
7. Визначити ступінь поляризації за формулою (5.3.2).
8. Користуючись калькулятором, обчислити функцію $I = I_{\max} \cos^2 \alpha$ у діапазоні кутів $0...360^\circ$ і нанести відповідні точки на експериментальний графік.

Таблиця 5.3.1

α°	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$I, \mu\text{A}$													

Продовження таблиці 5.3.1

α°	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360
$I, \mu\text{A}$												

Контрольні запитання

1. Що таке світло?
2. Що таке поляризація світла?
3. Дайте означення неполяризованого, плоскополяризованого, частково поляризованого та поляризованого по колу світла.
4. Назвіть способи отримання плоскополяризованого світла. Які поляризаційні пристрої зроблені на їх основі?
5. Запишіть закон Брюстера. Що таке кут Брюстера?
6. Що таке поляризатор та аналізатор?
7. Що таке ступінь поляризації частково поляризованого світла?
8. Запишіть закон Малюса та поясніть його.
9. Наведіть приклади застосування явища поляризації.

Модуль 6. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ТА ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ

Лабораторна робота № 5.6. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРОНІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Мета роботи: вивчити основні закономірності зовнішнього фотоелектричного ефекту; визначити роботу виходу та максимальну швидкість фотоелектронів.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи треба вивчити такий теоретичний матеріал: зовнішній фотоелектричний ефект та його закони; рівняння Ейнштейна; фотоелементи та їхнє застосування.

[1, т.3, §§ 9.1–9.3; 2, §§ 202–204; 3, §§ 13.5; 4, т.3, §§ 9]

Процес взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини, називається *фотоелектричним ефектом* (фотоелектричним ефектом). Розрізняють зовнішній та внутрішній фотоелектричний ефект. *Зовнішній фотоелектричний ефект* – це процес, при якому електрон під дією випромінювання виходить за межі поверхні речовини, а внутрішній – призводить тільки до збільшення числа вільних електронів в середині речовини.

Вперше на це явище звернув увагу Рентген, дослідив та встановив відповідні закони – Столетов, а теоретичне обґрунтування зовнішнього фотоелектричного ефекту зробив А. Ейнштейн на основі квантової теорії світла (гіпотези Планка), згідно з якою світло випромінюється і поглинається речовиною окремими порціями – квантами (або фотонами). Енергія фотона, який відповідає світловій хвилі з частотою ν (довжиною хвилі λ), визначається за формулою: $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, де h – стала Планка; c – швидкість світла у вакуумі; λ – довжина хвилі світла.

При падінні пучка фотонів на поверхню металу виникає взаємодія фотона з електроном, в результаті якої фотон віддає електрону всю свою енергію. Якщо ця енергія перевищує роботу виходу електрона з металу ($A_{\text{вих}}$), то електрон виходить за межі матеріалу та має певну кінетичну енергію. Кінетична енергія буде максимальною у тому випадку, коли

електрон, при виході з металу, не витрачає енергію на зіткнення з кристалічною решіткою та іншими електронами.

Тоді, відповідно до закону збереження енергії, формула Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту буде:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}, \quad (5.6.1)$$

тобто енергія фотона при взаємодії з електроном повністю витрачається на виривання електрона з поверхні речовини та надання йому кінетичної енергії.

Рівняння (5.6.1) називається рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту і пояснює всі основні його закони (закони Столетова):

- *перший*: сила фотоструму насичення не залежить від частоти падаючого на речовину світла, а визначається тільки його інтенсивністю;
- *другий*: максимальна швидкість фотоелектронів залежить від частоти падаючого світла і не залежить від його інтенсивності;
- *третій*: існує червона межа фотоефекту, тобто така максимальна довжина хвилі (або мінімальна частота), при якій ще можливий фотоефект.

Відповідний експериментальний матеріал можна отримати на установці, яка використовується в даній роботі (рис. 5.6.2), за яким можливо побудувати типові вольт-амперні характеристики (ВАХ) фотоефекту (рис. 5.6.1), тобто залежність фотоструму від напруги між катодом та анодом при сталій освітленості катода E_1 та E_2 ($E_1 > E_2$). З графіка $I=f(U)$ видно, що при деякій напрузі $U_H > 0$ фотострум досягає максимального значення і далі залишається незмінним. Цей струм, що називають *струмом насичення* $I_{\text{нас}}$, відповідає стану, при якому всі фотоелектрони, що вириваються світлом за одиницю часу з катода, досягають анода, що і підтверджує перший закон Столетова.

З ВАХ (рис. 5.6.1) видно, що при відсутності напруги між катодом та анодом сила фотоструму відмінна від нуля. Це пояснюється тим, що деякі електрони, які вириваються з катода під дією світла, мають кінетичну енергію, достатню для того, щоб досягти анода без дії зовнішнього електричного поля. Ці електрони і створюють фотострум при нульовій напрузі (рис. 5.6.1). Для того, щоб зовсім припи-

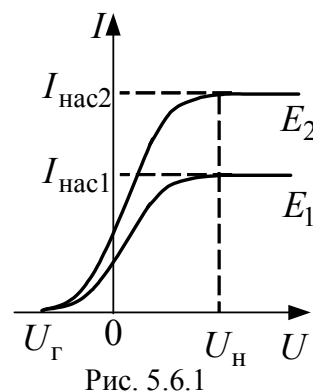


Рис. 5.6.1

нити цей струм, між катодом та анодом необхідно створити поле з напругою U_{Γ} , що повністю гальмує електрони. Тоді, як відомо, робота електричного поля при гальмуванні електронів буде дорівнювати зміні їхньої кінетичної енергії:

$$eU_{\Gamma} = \frac{m v_{\max}^2}{2}, \quad (5.6.2)$$

де e – заряд електрона; v_{\max} – максимальне значення швидкості фотоелектронів; m – маса електрона; U_{Γ} – гальмівна напруга.

Після підстановки значення максимальної кінетичної енергії фотоелектронів із умови (5.6.2) у формулу (5.6.1), маємо вираз для роботи виходу електрона з металу:

$$A_{\text{вих}} = h\nu - eU_{\Gamma}. \quad (5.6.3)$$

За третім законом Столетова тоді червона межа фотоефекту:

$$\lambda_{\text{чер}} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}. \quad (5.6.4)$$

Експериментальну установку зібрано на основі вакуумного сур'мяно-цезієвого фотоелемента (рис. 5.6.2). Це скляний балон Б, на внутрішню поверхню якого нанесено світлочутливий шар – катод К. Анод – невеликий диск А, що знаходиться в центрі скляного балона. Схему установки зображено на рисунку 5.6.2, де

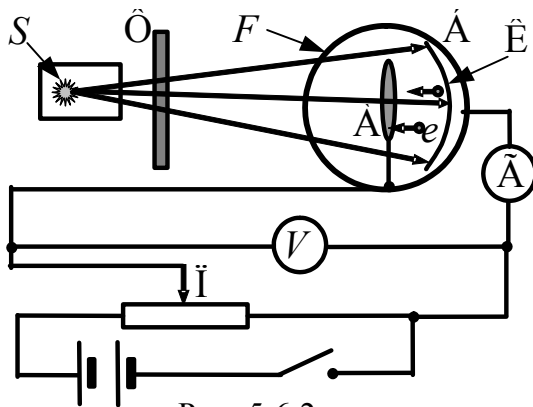


Рис. 5.6.2

S – джерело світла; Φ – змінний світлофільтр; F – фотоелемент; Π – потенціометр; Γ – гальванометр; V – вольтметр.

Хід роботи

1. Включити установку та за допомогою потенціометра Π встановити між катодом та анодом напругу, що дорівнює нулю.
2. Включити освітлювальну лампу, розташувавши перед нею синій світлофільтр. При цьому гальванометр Γ повинен фіксувати значення фотоструму, відмінне від нуля.
3. За допомогою потенціометра встановити негативну напругу між катодом та анодом U_{Γ} , при якій фотострум у колі буде відсутній ($I=0$).

За допомогою вольтметра виміряти значення гальмівної напруги U_{Γ} та занести до таблиці 5.6.1.

4. Пункти 1-3 повторити для оранжевого світлофільтру.
5. Розрахувати максимальну швидкість фотоелектронів U_{\max} для кожного з випадків (окремих світлофільтрів) за формулою (5.6.2).
6. Значення частоти світла ν (вказані на лабораторній установці) та довжини хвилі λ для кожного світлофільтру занести до таблиці 5.6.1.
7. Розрахувати роботу виходу електронів $A_{\text{вих}}$ за формулою (5.6.3).
8. Розрахувати середнє значення роботи виходу $A_{\text{вих.сер}}$ та обчислити червону межу даного світлочутливого шару фотоелемента $\lambda_{\text{чер}}$ за формулою (5.6.4).
9. Визначити середнє значення роботи виходу $A_{\text{вих}}$ у електрон-вольтах. Врахувати, що $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
10. Результати вимірів та розрахунків занести до таблиці 5.6.1.

Таблиця 5.6.1

Колір світлофільтру	ν , Гц	λ , мкм	$U_{\Gamma \text{сер}}$, В	U_{\max} , м/с	$A_{\text{вих}}$, Дж	$A_{\text{вих.сер}}$, еВ	$\lambda_{\text{чер}}$, м
Синій							
Оранжевий							

Контрольні запитання

1. Що таке фотоелектричний ефект? В чому різниця між внутрішнім та зовнішнім фотоелектричним ефектом?
2. Приведіть схему експериментальної установки для дослідження зовнішнього фотоелектричного ефекту.
3. Покажіть типову вольт-амперну характеристику. Що називають фотострумом насичення і затримуючою різницею потенціалів?
4. Сформулюйте закони Столетова для зовнішнього фотоелектричного ефекту.
5. Що називають червоною межею фотоелектричного ефекту?
6. Запишіть і поясніть рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту. Що таке квант світла (фотон)?
7. Що таке робота виходу електрона з металу?
8. Як пояснити закони фотоелектричного ефекту на основі рівняння Ейнштейна?
9. Фотоелементи та їх застосування.

Лабораторна робота № 6.1. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА

Мета роботи: вивчити елементи зонної теорії твердих тіл; визначити ширину забороненої зони напівпровідника.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням лабораторної роботи слід вивчити такий теоретичний матеріал: розщеплення енергетичних рівнів та виникнення енергетичних зон у кристалах; принцип Паулі; розподіл електронів по енергетичних станах; поділ твердих тіл на провідники, напівпровідники та діелектрики з точки зору зонної теорії.

[1, т.2 §§3.2, 3.5, 3.6; т.3 §§ 14.2; 2, §§ 240–243; 4, т.3 §§ 51, 53, 58, 59]

Для розгляду поведінки електрона в твердому тілі можна застосувати рівняння Шредінгера та знайти допустимі стани та значення його енергії. Такий підхід призводить до створення *зонної теорії твердого тіла*, в основі якої лежить адіабатичне наближення. Оскільки маси та швидкості ядер та електронів суттєво розрізняються, то можна вважати, що ядра в вузлах кристалічної решітки не рухомі, а рух електронів розглядається в постійному періодичному полі ядер. Застосовується також наближення самоузгодженого поля. Взаємодія даного електрона з усіма іншими електронами замінюється дією на нього *стаціонарного періодичного електричного поля*, яке створюється усередненим в просторі зарядом усіх інших електронів і всіх ядер. Таким чином, в зонній теорії багатоелектронна задача зводиться до задачі про рух одного електрона в зовнішньому періодичному полі – *усередненому і самоузгодженому полі всіх ядер і електронів*.

Розглянемо уявно процес утворення твердого тіла з ізольованих атомів. Поки атоми ізольовані, тобто знаходяться один від одного на макроскопічних відстанях, то вони мають співпадаючі схеми енергетичних рівнів (рис. 6.1.1). При "стиску" нашої моделі до кристалічної решітки, тобто коли відстані між атомами будуть порівняні з міжатомними відстанями в твердих тілах, то взаємодія між атомами призводить до того, що

енергетичні рівні атомів зміщуються, розщеплюються та розширюються в зони, утворюючи так званий зонний енергетичний спектр.

Із рис. 6.1.1, на якому показано розщеплення рівнів як функції відстані між атомами, видно, що суттєво розщеплюються лише рівні зовнішніх, валентних електронів, які найбільш слабо зв'язані з ядром і мають найбільшу енергію, а також більш високі рівні, які в основному стані атома взагалі не зайняті електронами. Рівні внутрішніх електронів або зовсім не розщеплюються, або роз-

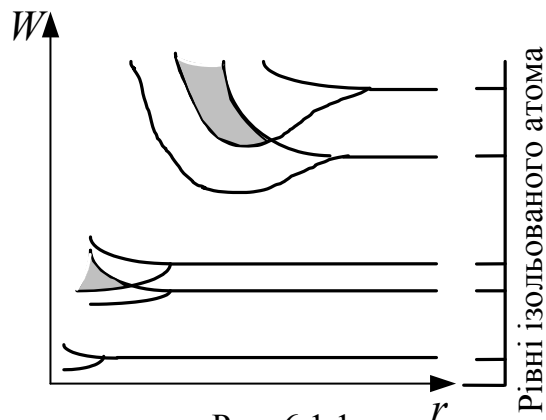


Рис. 6.1.1

щеплюються. ~~Утворення~~ ~~зони~~ ~~енергетичного~~ ~~спектру~~ в кристалі є квантово-механічним ефектом і впливає із співвідношення невизначеностей Гейзенберга та принципу Паулі. В кристалі валентні електрони атомів можуть переходити від атома до атома крізь потенціальні бар'єри, що розділяють атоми, тобто переміщуватися без зміни повної енергії (тунельний ефект). Це призводить до того, що середній час життя валентного електрона в даному атомі порівняно з ізолюваним атомом суттєво зменшується і складає приблизно 10^{-15} с (для ізолюваного атома воно приблизно 10^{-8} с). Час життя електрона в будь-якому стані пов'язаний з невизначеністю його енергії (ширина рівня) співвідношенням невизначеностей $\Delta W \cdot \tau \geq \hbar$. Отже, якщо природна ширина спектральної лінії складає приблизно 10^{-7} еВ, то в кристалах вона сягає 1...10 еВ, тобто енергетичні рівні валентних електронів розширюються в зону дозволених значень енергії.

Енергія зовнішніх електронів може приймати значення в межах зафарбованих на рис. 6.1.1, областей, які називаються дозволеними енергетичними зонами. Кожна дозволена зона "вміщує" в собі стільки близько розташованих дискретних рівнів, скільки атомів містить кристал. Відстань між сусідніми рівнями в зоні складає приблизно 10^{-22} еВ. Оскільки це дуже маленьке значення, то зони можна вважати практично неперервними, але факт кінцевого числа рівнів у зоні відіграє важливу роль при розподілі електронів по енергетичним станам.

Дозволені енергетичні зони розділені зонами заборонених значень енергії, які називаються забороненими енергетичними зонами. В заборонених зонах електрони знаходяться не можуть. Ширина зон (дозволених і заборонених) не залежить від розмірів кристалу. Дозволені зони тим ширші, чим слабкіший зв'язок електрона з ядром.

Зонна теорія твердих тіл дозволяє з єдиної точки зору пояснити існування металів, діелектриків і напівпровідників, пояснюючи відмінності в їх електричних властивостях. По-перше, неоднаковим заповненням електронами дозволених зон і, по-друге, шириною заборонених зон.

Ступінь заповнення електронами енергетичних рівнів в зоні визначається заповненням відповідного атомного рівня. Якщо, наприклад, якійсь рівень атома повністю заповнений електронами в відповідності з принципом Паулі, то утворена з нього зона також повністю заповнена. В загальному випадку можна говорити про валентну зону, яка повністю заповнена електронами та утворена з енергетичних рівнів внутрішніх електронів вільних атомів, і про зону провідності (вільна зона), яка або частково заповнена електронами, або вільна і утворена з енергетичних рівнів зовнішніх "колективізованих" електронів ізолюваних атомів. Зона, яка заповнена електронами частково або вільна (при $T=0\text{ K}$), називається зоною провідності. Верхня зона, яка повністю заповнена електронами (при $T=0\text{ K}$), називається валентною зоною.

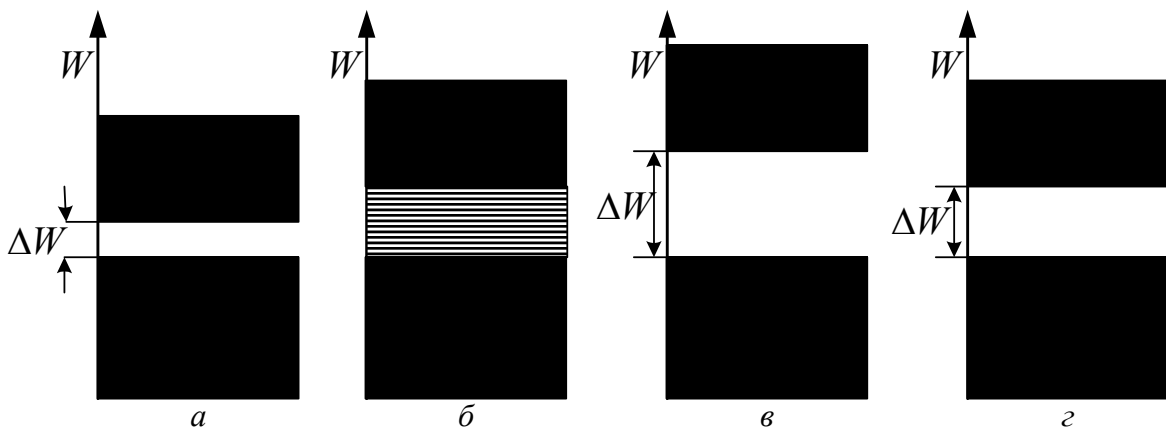


Рис. 6.1.2

В залежності від степені заповнення зон електронами та ширини забороненої зони можливі чотири випадки, що зображені на рис. 6.1.2. На рис. 6.1.2,а верхня зона, яка містить електрони, заповнена лише частково, тобто в ній є вакантні рівні. В даному випадку електрон, отримав-

ши скільки завгодно малу енергію (наприклад, за рахунок теплового збудження або електричного поля), зможе перейти на більш високий енергетичний рівень тієї ж зони, тобто стати вільним і брати участь в процесі провідності. Таким чином, якщо в твердому тілі є зона, яка частково заповнена електронами, то таке тіло завжди буде провідником електричного струму. Саме цю властивість мають метали.

Тверде тіло буде провідником електричного струму також в тому випадку, якщо валентна зона перекривається вільною зоною, що призводить до частково заповненої зони (рис. 6.1.2, б). В даному випадку утворюється так звана "гібридна" зона, яка заповнюється валентними електронами лише частково. Це має місце для лужноземельних елементів (Be, Mg, Ca, Zn, ...). Отже, тверде тіло буде провідником, якщо зона провідності заповнена електронами частково.

Крім розглянутого вище перекриття зон можливий також перерозподіл електронів між зонами, які утворилися з рівнів різних атомів, в результаті чого замість двох частково заповнених зон в кристалі буде одна повністю заповнена (валентна) зона та одна вільна зона (зона провідності). Тверді тіла, у яких енергетичний спектр електронних станів складається з валентної зони та вільної зони провідності, будуть діелектриками або напівпровідниками в залежності від ширини забороненої зони ΔW .

Якщо ширина забороненої зони кристала ΔW складає кілька електрон-вольт, то енергії теплового руху не вистачає для переходу електронів з валентної зони в зону провідності і кристал буде діелектриком, залишаючись ним при всіх реальних температурах (рис. 6.1.2, в). Якщо ширина забороненої зони ΔW не велика (порядку 1 eV), то перехід електрона з валентної зони в зону провідності може бути здійснений порівняно легко або шляхом теплового збудження, або за рахунок зовнішнього джерела, яке здатне надати електронам енергію не меншу ніж ширина забороненої зони і кристал буде напівпровідником (рис. 6.1.2, г).

Різниця між металами та діелектриками з точки зору зонної теорії полягає в тому, що при $T = 0 \text{ K}$ в зоні провідності металів є електрони, а в зоні провідності діелектриків вони відсутні. Різниця між діелектриками та напівпровідниками визначається шириною забороненої зони: для діелектриків вона кілька електрон-вольт, для напівпровідників – порядку 1 eV. При температурах близьких до 0 K, напівпровідники поведуть себе як діелектрики. З підвищенням температури в напівпровідниках зростає

кількість електронів, які в наслідок теплового збудження переходять в зону провідності, отже електрична провідність напівпровідників в цьому випадку зростає.

В природі напівпровідники існують у вигляді елементів IV, V та VI груп періодичної системи елементів, наприклад Si, Ge, As, Se, Te, а також хімічних сполук, наприклад оксиди, сульфіди, селеніди, сплави елементів різних груп. Розрізняють власні та домішкові напівпровідники. Прикладом власних напівпровідників можуть бути хімічно чисті речовини Ge, Se, а також багато хімічних сполук: InSb, GaAs, CdS тощо. При 0 К власні напівпровідники поведуть себе як діелектрики. При підвищенні температури електрони з верхніх рівнів валентної зони можуть бути перекинуті на нижні рівні зони провідності. При накладанні на кристал електричного поля вони переміщуються проти поля і створюють електричний струм.

У фізиці твердого тіла доводиться, що питома електрична провідність γ бездомішкового напівпровідника залежить від температури за експоненціальним законом:

$$\gamma = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right).$$

Враховуючи обернену залежність між питомим опором і питомою провідністю $\gamma = 1/\rho$, та лінійну залежність між опором і питомим опором, можна визначити опір напівпровідника за формулою:

$$R = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right) \quad (6.1.1)$$

де ΔW – ширина забороненої зони; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

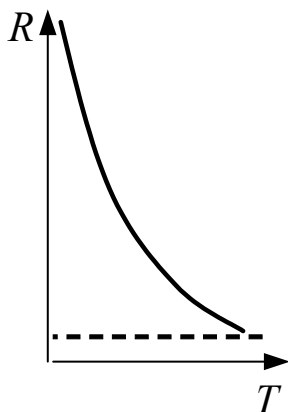


Рис. 6.1.3

Коефіцієнт A також залежить від температури, але порівняно з експонентою, ця залежність дуже слабка, тому у досить вузькому інтервалі температур його можна вважати сталим. Температурна залежність, що описується формулою (6.1.1) показана на рис. 6.1.3.

Запишемо формулу (6.1.1) для двох різних значень температури:

$$R_1 = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT_1}\right), \quad R_2 = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT_2}\right).$$

Поділивши перше рівняння на друге, одержимо:

$$\frac{R_1}{R_2} = \exp\left[\frac{\Delta W}{2k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right].$$

Логарифмуючи цей вираз і розв'язуючи одержане рівняння відносно ΔW , одержимо формулу для визначення ширини забороненої зони:

$$\Delta W = 2k \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}. \quad (6.1.2)$$

На рисунку 6.1.4 показано схему експериментальної установки.

На схемі прийнято такі позначення: 1 – термометр; 2 – масляна баня; 3 – терморезистор; 4 – нагрівник; 5 – омметр.

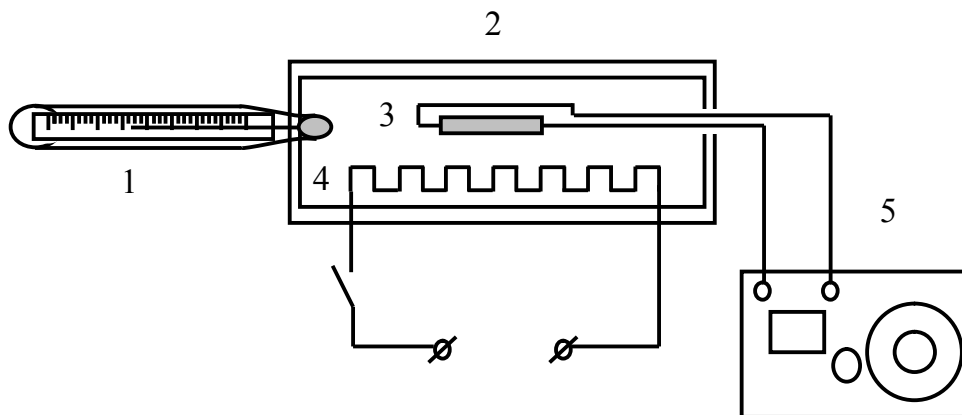


Рис. 6.1.4

Хід роботи

1. За допомогою омметра визначити опір терморезистора при кімнатній температурі.
2. Увімкнути нагрівник і через кожні 5...10 °С за допомогою омметра вимірювати опір. Температура не повинна перевищувати 80 °С.
3. Результати вимірювань занести до таблиці 6.1.1.
4. Побудувати графік залежності $\ln R$ від $\frac{1}{T}$.

5. Для розрахунку ΔW вибрати на прямолінійній ділянці графіка значення величин $\ln R_1$, $\ln R_2$ і відповідні їм значення $\frac{1}{T_1}$ та $\frac{1}{T_2}$.
6. За формулою (6.1.2) обчислити ширину забороненої зони.
7. Виразити значення ширини забороненої зони в електрон-вольтах, враховуючи, що $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Таблиця 6.1.1

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$\frac{1}{T}, \text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\ln R$

Контрольні запитання

1. Поясніть причину розщеплення енергетичних рівнів та виникнення енергетичних зон у кристалах з точки зору зонної теорії твердого тіла.
2. Сформулюйте принцип Паулі.
3. Чим з точки зору зонної теорії твердого тіла відрізняються провідники, напівпровідники та діелектрики?
4. Що називається валентною зоною? Що називається зоною провідності?
5. Поясніть, що таке заборонена зона?
6. Що таке рівень Фермі?
7. Згідно з яким принципом заповнюються зони в кристалі?
8. Елементи якої групи таблиці Менделєєва відносяться, переважно, до напівпровідників?
9. Яка залежність опору напівпровідників від температури? Поясніть причину такої залежності.
10. Чи можна діелектрик зробити провідником? Яким чином?

Лабораторна робота № 6.2. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Мета роботи: вивчити властивості p - n переходу та його випрямляючу дію; виміряти вольт-амперну характеристику напівпровідникового діода.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: власна та домішкова провідність напівпровідників; електронний та дірковий напівпровідники; контактна різниця потенціалів; контакт електронного та діркового напівпровідників (p - n перехід).

[1, т.2 §§ 3.6; 2, §§ 243, 249, 250; 4, т.3 §§ 59, 64]

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до роботи № 6.1.

Основним елементом напівпровідникових випрямлячів є напівпровідникові (кристалічні) діоди, які мають ряд переваг в порівнянні з вакуумними діодами. Необхідно відмітити малі габарити, велику механічну міцність, довговічність та інші позитивні якості напівпровідникових діодів.

В основі роботи напівпровідникових діодів лежить випрямляюча дія p - n переходу (електронно-діркового переходу). P - n перехід – це тонкий шар на межі між двома областями напівпровідника, які відрізняються типом провідності. Відомо, що в напівпровідниках можливі два різних процеси електропровідності – електронний і дірковий.

Для утворення домішкового напівпровідника з електронним типом провідності (напівпровідника n -типу) в кристал германію або кремнію (4-х валентної речовини) додають атоми домішок з більшою валентністю, наприклад, 5-ти валентного миш'яку. Для утворення ковалентних зв'язків з атомами основної речовини миш'яку достатньо 4-х електронів. П'ятий електрон, не зв'язаний з атомами кристалічної решітки, при наданні йому незначної енергії ΔW_1 (рис. 6.2.1,*a*) стає вільним – електронном провідності. Атом домішки (миш'як) перетворюється на додатній іон, який не може переміщуватись в кристалі. Домішки, які постачають електрони провідності, називають *донорами*.

Домішки викривлюють електричне поле решітки, що призводить до появи локальних енергетичних рівнів, розташованих в забороненій зоні енергетичних зон кристала (рис. 6.2.1,*a*). Рівень Фермі в напівпровіднику *n*-типу лежить між донорним рівнем та дном зони провідності (рис. 6.2.1,*a*).

Для утворення домішкового напівпровідника з дірковою провідністю (напівпровідника *p*-типу) в кристал германію або кремнію додають атоми домішок з меншою валентністю, наприклад, бор, який має три валентні електрони. Трьох валентних електронів атома бору не вистачає для утворення подвійного ковалентного зв'язку з чотирма сусідніми ато-

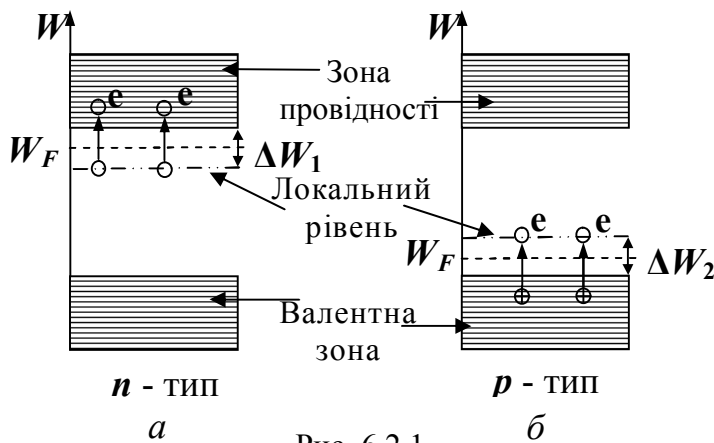


Рис. 6.2.1

мами основної речовини. Тому атом бору захоплює один з валентних електронів германію (або кремнію) і перетворюється у негативно заряджений іон. В місці захопленого електрона залишається дірка – квазічастинка, яка має додатній заряд, який за величиною дорівнює

заряду електрона. При наданні дірці незначної кількості енергії ΔW_2 (рис. 6.2.1,*б*) вона стає вільним носієм заряду.

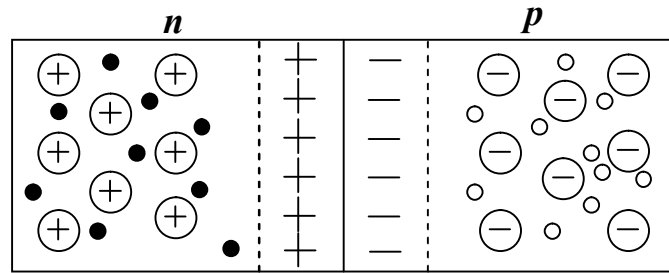
Домішкові атоми, які можуть захоплювати електрони з валентної зони називаються *акцепторами*. Акцепторні рівні енергії розташовані трохи вище верхнього краю валентної зони основного кристала (рис. 6.2.1,*б*). Рівень Фермі в напівпровідниках *p*-типу лежить між верхнім рівнем валентної зони та акцепторним рівнем (рис. 6.2.1,*б*).

Отже, якщо концентрація вільних електронів у напівпровіднику більша за концентрацію дірок, то такий напівпровідник має електронну провідність та називається напівпровідником *n*-типу. Якщо перевищує концентрація дірок, то напівпровідник має діркову провідність і носить назву напівпровідник *p*-типу.

Розглянемо процеси на межі двох напівпровідників з різним типом провідності (рис. 6.2.2). Оскільки концентрація вільних електронів в *n*-області більша, ніж в *p*-області, то електрони дифундують через кон-

такт в бік p -області. У зворотному напрямку дифундують дірки. Потрапляючи в область з протилежною провідністю електрони рекомбінують з дірками і поблизу контакту спостерігається зменшення концентрації вільних електронів і дірок. Оскільки атомні залишки в n -області заряджені позитивно, а в p -області – негативно, то в n -області біля межі накопичується позитивний заряд, а в p -області – негативний. Утворюється так званий p - n перехід. Це

призводить до виникнення між напівпровідниками p - і n -типу контактної різниці потенціалів (потенціального бар'єру), яка перешкоджає подальшому переміщенню через межу основних носіїв струму – електронів з n -області і дірок з p -області.



● - електрон; ○ - дірка;
⊕ - донорний іон; ⊖ - акцепторний іон.

Рис.6.2.2.

В той же час електричне поле, що утворюється на межі, стимулює рух через p - n перехід неосновних носіїв струму. У відсутності зовнішнього електричного поля повний струм через p - n перехід дорівнює нулю завдяки динамічній рівновазі, що встановлюється на межі, коли середня кількість зарядів, які рухаються проти поля врівноважується зарядами, що проходять межу в протилежному напрямку.

Дослідним шляхом було встановлено, що в деяких випадках контакт двох напівпровідників має властивість проводити електричний струм переважно в одному напрямку.

Підключимо розглянуту систему напівпровідників до електричного поля так, щоб зовнішня різниця потенціалів зменшувала контактну (прямий напрямок

рис. 6.2.3,а). В цьому випадку зменшується висота потенціального бар'єру для основних носіїв струму. Зовнішнє електри-

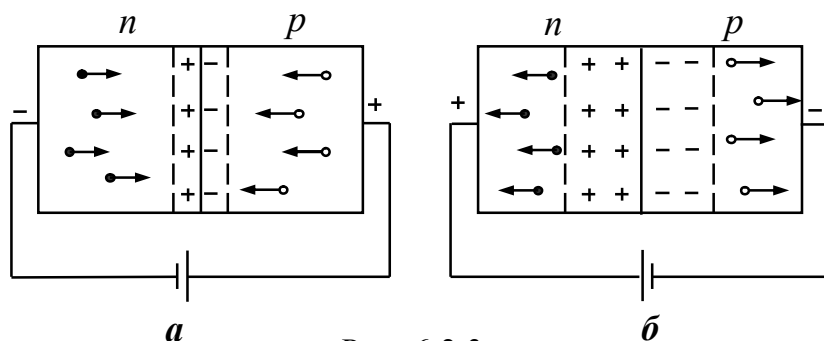


Рис. 6.2.3

чне поле “притискує” основні носії струму до границі, через що ширина p - n переходу зменшується. Відповідно зменшується опір p - n переходу – тим більше, чим більша зовнішня напруга. Через p - n перехід іде струм, обумовлений рухом основних носіїв струму, сила якого зі збільшенням напруги зростає за експоненціальним законом.

Зміна полярності зовнішньої батареї (обернений напрямок рис. 6.2.3,б) призводить до збільшення висоти потенціального бар’єру для основних носіїв струму. Зовнішнє електричне поле “відтягує” основні носії струму від границі, внаслідок чого ширина p - n переходу і його опір збільшуються. Основні носії не можуть подолати потенціальний бар’єр. В той же час потік неосновних носіїв струму не змінюється (для них бар’єру не існує). Через p - n перехід проходить невеликий струм I_H (струм насичення), сила якого майже не залежить від напруги.

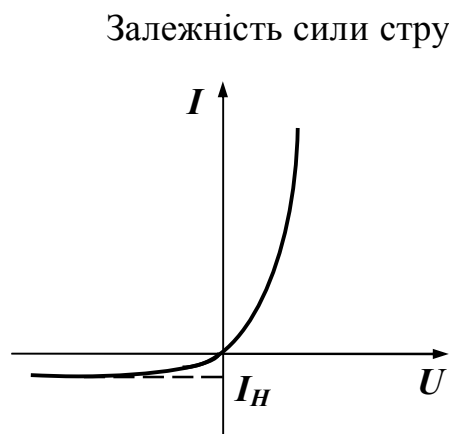


Рис.6.2.4

Залежність сили струму через p - n перехід від прикладеної напруги як в прямому, так і в оберненому напрямках носить назву вольт-амперної характеристики напівпровідникового випрямляча ВАХ – $I = f(U)$ та зображена на рис. 6.2.4.

Таким чином, p - n перехід має властивість односторонньої провідності, тому може бути використаний для випрямлення змінного струму.

Щоб вивчити односторонню провідність p - n переходу, в цій роботі використовують напівпровідниковий діод. У зв’язку з тим, що прямий струм набагато більше від оберненого, для їх вимірювання використовують прилади різної чутливості. Обернений струм вимірюють мікроамперметром, а прямий – міліамперметром. На панелі лабораторної роботи є перемикач, який дає змогу включати діод у прямому та оберненому напрямках.

Хід роботи

1. Ознайомитись із електричною схемою установки.
2. Виміряти прямий струм при різних значеннях (5...6 вимірів) прикладеної напруги (зняти ВАХ – $I = f(U)$ у режимі прямого струму).

3. Перемикачем змінити напрям струму через діод. Зняти ВАХ у режимі оберненого струму.
4. Побудувати ВАХ даного діода для вказаних режимів.
5. Визначити внутрішній опір напівпровідникового діода у прямому та оберненому режимах його роботи:

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

де зміна напруги ΔU та сили струму ΔI визначаються на лінійній ділянці ВАХ.

6. Результати занести до таблиці 6.2.1.

Таблиця 6.2.1

№ пор.	Режим прямого струму			Режим оберненого струму		
	$U, \text{В}$	$I \cdot 10^{-3}, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	$U, \text{В}$	$I \cdot 10^{-6}, \text{А}$	$R, \text{Ом}$

Контрольні запитання

1. Що таке домішкова провідність?
2. Що таке напівпровідник n -типу? Які носії струму є основними в напівпровіднику n -типу?
3. Накресліть зонну діаграму напівпровідника n -типу. Де розташований рівень Фермі у домішковому напівпровіднику n -типу?
4. Що таке напівпровідник p -типу? Які носії струму є основними в напівпровіднику p -типу?
5. Накресліть зонну діаграму напівпровідника p -типу. Де розташований рівень Фермі у домішковому напівпровіднику p -типу?
6. Що таке n - p перехід і як технічно його отримують?
7. Як виникає контактне електричне поле та потенціальний бар'єр для носіїв струму в n - p переході?
8. Чому заперний прошарок n - p переходу має великий опір?
9. Накресліть ВАХ для n - p переходу, поясніть вигляд її окремих ділянок.
10. Які переваги мають кристалічні діоди перед ламповими?

Лабораторна робота № 6.3. ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА

Мета роботи: вивчити явище виникнення фото-ЕРС в фотоелементах з запірним прошарком; визначити світлову характеристику вентильного фотоелемента та його інтегральну чутливість.

[1, т.3 §§ 9.2, 14.2; 2, §§ 244; 4, т. §§ 65]

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: власна та домішкова провідність напівпровідників; напівпровідники p - та n - типу; контакт електронного та діркового напівпровідників (p - n перехід); контакти M - та M - p ; контактна різниця потенціалів; фотоелектричні явища у напівпровідниках та їх практичне застосування.

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до роботи № 6.1, № 6.2.

Вентильні фотоелементи на основі кремнію, германію, сірчаного срібла тощо широко використовуються в науці і техніці для безпосереднього перетворення енергії світла в енергію електричного струму, а також для реєстрації і вимірювання світлових потоків. Кремнієві і деякі інші вентильні фотоелементи використовують для виготовлення “сонячних” батарей, наприклад, для живлення радіоапаратури штучних супутників Землі. Їхній ККД досягає 10 – 11 %. У даній роботі визначається світлова характеристика фотоелемента ФЕСС-У-10.

Вентильний фотоелемент являє собою металеву пластинку 1, на поверхню якої дифузійним методом нанесений кристалічний напівпровідник n -типу 2 (рис. 6.3.1), вкритий напівпрозорим захисним шаром 3 з того ж металу. Між шаром металу 1 та напівпровідником n -типу 2 утворюється контакт M - n (метал-напівпровідник) із запірним прошарком. Такий же запірний прошарок виникає і на контакті напівпровідника n -типу 2 з металевим покриттям 3. При цьому контактні різниці потенціалів однакові і включені у коло назустріч. Еквівалентна схема вентильного фотоелемента показана на рис. 6.3.2. Виникнення ЕРС на фотоелементі обумовлене явищем внутрішнього фото ефекту в запірному прошарку K_2 при попаданні на нього світла через прозоре металеве покриття 3.

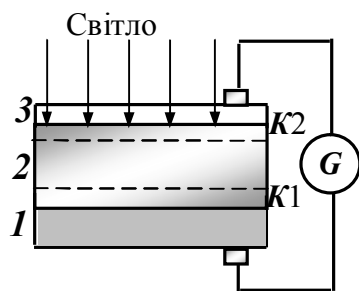


Рис. 6.3.1

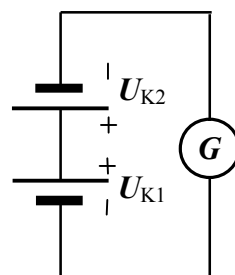


Рис. 6.3.2

За відсутності опромінювання контактні різниці потенціалів U_{K1} та U_{K2} однакові за величиною. Так як у колі рис. 6.3.2. вони включені назустріч, різниця потенціалів:

$$\varepsilon = U_{K1} - U_{K2} \quad (6.3.1)$$

дорівнює нулю і струм через гальванометр відсутній.

При наявності світлового потоку в запірному прошарку $K2$ з'являються додаткові носії заряду (фотоелектрони та фотодірки), які знижують контактну різницю потенціалів U_{K2} так, що фотоЕРС за (6.3.1) стає відмінною від нуля. Це зниження відбувається на контакті $K2$, енергетична зонна структура якого зображена на рисунку 6.3.3.

Запірний прошарок Δx (рис. 6.3.3) для контакту метал-напівпровідник n -типу утворюється тоді, коли робота виходу електрона з металу A_M більша за роботу виходу з напівпровідника n -типу A_n . При цьому виникає рівноважна зовнішня контактна різниця потенціалів U_{K2} :

$$U_{K2} = \frac{A_M - A_n}{e}$$

Тобто, метал має надлишковий негативний заряд, а напівпровідник n -типу – позитивний, та виникає контактне електричне поле, вектор напруженості E_K якого показаний на рисунку 6.3.3.

Квант світла (зображений

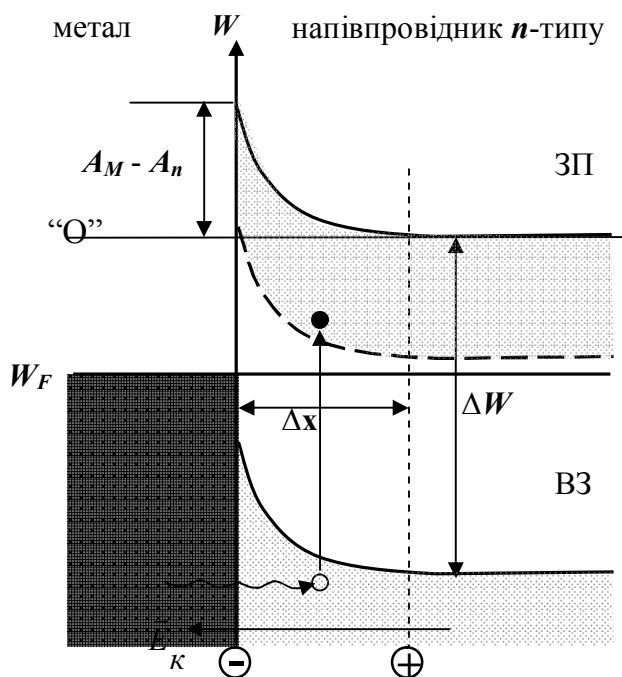


Рис. 6.3.3

хвилястою лінією зі стрілкою на рис. 6.3.3) попадає в запірний прошарок через напівпрозорий метал і викликає внутрішній фотоефект, тобто переводить електрон із валентної зони (ВЗ) у зону провідності (ЗП). Внаслідок цього виникають два додаткових носії заряду – дірка у ВЗ та електрон у ЗП. Під дією електричного поля електрон переміщується в область напівпровідника, а дірка, відповідно, у область металу. Це викликає компенсацію надлишкових зарядів, що виникли при утворенні контакту метал-напівпровідник, а з ним і контактної різниці потенціалів U_{K2} .

Неперервний потік таких квантів створює постійне зниження цієї контактної різниці потенціалів так, що фотоЕРС (6.3.1) буде відмінна від нуля, а отже й відмінний від нуля струм у колі.

Світловою характеристикою фотоелемента називається залежність фотоструму I від променевого потоку, що падає на нього $I = f(\Phi)$. Однією з характеристик фотоелемента є інтегральна чутливість q . Вона чисельно рівна приросту фотоструму при зростанні на одиницю променевого потоку:

$$q_i = \frac{dI}{d\Phi}. \quad (6.3.2)$$

Схему установки зображено на рис. 6.3.4. При вимірюванні світлового потоку Φ , що падає на поверхню фотоелемента 2, необхідно змінювати відстань r від фотоелемента до джерела світла 1.

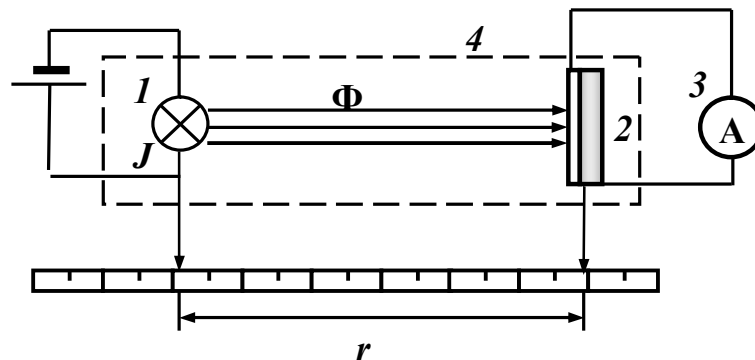


Рис. 6.3.4

Враховуючи, що сила світла лампи j залишається сталою, потік випромінювання Φ , що падає на поверхню фотоелемента площею S , розраховується за відомим співвідношенням:

$$\Phi = j \frac{S \cos \alpha}{r^2}, \quad (6.3.3)$$

де α – кут, який утворює нормаль до поверхні фотоелемента з напрямком світлового потоку; r – відстань від фотоелемента до джерела світла.

Хід роботи

1. Ознайомитись з лабораторною установкою.
2. Встановити фотоелемент так, щоб кут $\alpha = 0$. Ввімкнути джерело світла. Змінюючи відстань r від джерела світла до фотоелемента (5 – 7 значень), записати показники мікроамперметра I .
3. Повторити операції п.2 для кута $\alpha = 60^0$.
4. Значення сили світла джерела j та площі фотоелемента S (вказані на установці) занести до таблиці 6.3.1.
5. За формулою (6.3.3) визначити світловий потік Φ для кожного значення r . Результати вимірювань занести до таблиці 6.3.1.
6. Побудувати світлову характеристику фотоелемента $I = f(\Phi)$.
7. На лінійній ділянці цієї характеристики та за допомогою формули (6.3.2) визначити інтегральну чутливість q_i фотоелемента.

Таблиця 6.3.1

№ пор.	r , м	I , А	j , Кд	S , м ²	Φ , лм

Контрольні запитання

1. Що таке власна та домішкова провідність напівпровідників?
2. Що таке внутрішній фотоефект?
3. Що таке «червона межа» для внутрішнього фотоефекту?
4. Покажіть схематично будову вентильного фотоелемента та поясніть принцип його роботи.
5. Як у вентильному фотоелементі відбувається пряме перетворення світлової енергії в електричну?
6. Що таке спектральна чутливість фотоелемента?
7. Наведіть приклади використання фотоелементів.
8. Які причини обумовлюють низький ККД фотоелементів?

Лабораторна робота № 7.1. ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ

Мета роботи: ознайомлення з різними видами радіоактивного випромінювання та способами їх реєстрації, визначення активності радіоактивного джерела за допомогою лічильника Гейгера – Мюллера.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: будова атомного ядра; масове число та заряд ядра; види радіоактивного випромінювання; закон радіоактивного розпаду; правила зміщень; методи спостереження та реєстрації радіоактивних випромінювань.

[1, т.3 §§ 15.9–15.13; 2, §§ 251, 254–259; 3, §§ 17.8–17.12; 4, т.3 §§ 14, 66–68, 70]

Атомне ядро – це центральна частина атому, в якій зосереджено позитивний заряд та майже вся його маса. Воно складається з нуклонів (позитивно заряджених протонів ${}_1^1p$ і нейтральних нейтронів ${}_0^1n$), які утримуються разом ядерними силами. Кількість протонів у ядрі називається зарядовим числом Z , яке дорівнює порядковому номеру елемента у таблиці Менделєєва. Кількість нейтронів у ядрі називається ізотонічним числом N . Сума чисел $Z+N$ показує загальну кількість нуклонів ядра A і приблизно середню масу атома. Ядро позначають як ${}_Z^AX$. Ядра з однаковим числом Z та різними N називають *ізотопами*, з однаковим числом N та різними Z – *ізотонами*, з однаковим A , проте різними Z та N – *ізобарами*.

Відомо, що нестабільні ядра, а також всі ядра у збудженому стані перетворюються спонтанно, що призводить до зміни складу ядра і його внутрішньої енергії. Такі спонтанні процеси ядерних перетворень називаються *радіоактивністю*.

Закон, за яким відбувається радіоактивний розпад ядер пов'язує початкову кількість ядер (N_0), які розпадаються із кількістю ядер, що не розпалися (N) за певний проміжок часу (t):

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7.1.1)$$

де λ – стала розпаду, яку можна виразити через період напіврозпаду ($T_{1/2}$ – час, за який розпадеться половина початкових ядер):

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}.$$

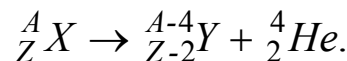
Проте такий закон справедливий лише для випадку, коли дочірні ядра є стабільними. В іншому випадку буде спостерігатися подальший розпад утворених ядер, для яких стала розпаду інша. Така послідовність розпаду описується системами диференціальних рівнянь:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1.$$

Якщо $T_{1/2}$ материнського ядра $\gg T_{1/2}$ дочірнього ізотопу, то $\lambda_1 N_1 \approx \lambda_2 N_2$.

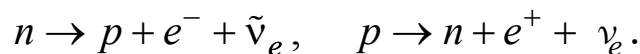
До основних типів радіоактивних перетворень відносять α -, β^+ -, β^- - розпади, γ - випромінювання, e - (K -) поглинання, спонтанний поділ, протонна радіоактивність тощо. Розглянемо деякі основні типи радіоактивних перетворень.

1. *Випромінювання α -частинки.* Розпад ядра відбувається з вильотом ядра атома ${}^4_2\text{He}$. Правило зміщення Содді, яке дозволяє визначити місце ізотопу – продукту розпаду у періодичній системі елементів, для альфа-розпаду можна записати наступним чином:



Для того щоб відбувся альфа-розпад, необхідно, щоб енергія зв'язку дочірнього ядра та α -частинки окремо були більшим за енергію зв'язку материнського ядра, а це означає, що в даному процесі виділяється енергія. α -частинка має заряд, тому, щоб вона покинула ядро, їй треба подолати кулонівський бар'єр. Внаслідок цього α -розпад відбувається за час $10^{10} \div 10^{-7}$ с.

2. *Випромінювання β -частинки.* Ядро випромінює електрон/позитрон. Процес відбувається лише всередині ядра, коли один з нейтронів (протонів) розпадається з утворенням протону та електрону (нейтрону та позитрону).



де $\tilde{\nu}_e$, ν_e – електронне антинейтрино та нейтрино, які випромінюються під час процесу β -розпаду.

Існування даних частинок було передбачено теоретично для обґрунтування спектру енергій β -частинок. Нейтрино/антинейтрино має нульові заряд та масу спокою і спіні $\hbar/2$.

Вільний нейтрон може розпадатися ($T_{1/2} \approx 11-15$ хв.) поза межами ядра, а в ядрі може залишатися стабільним. Навпаки, протон вважається стабільною частинкою ($T_{1/2} \approx 10^{29}$ років) поза межами ядра і може розпадатися у нейтрон всередині.

3. γ -випромінювання – це електромагнітні хвилі з високою проникністю, які не відхиляються ні в електричному, ні в магнітному полях. Воно не виникає самостійно, а супроводжує α -, β - розпади, виникає в ядерних реакціях, в процесах гальмування заряджених частинок, при їхньому розпаді тощо. γ -спектр має лінійчасту структуру. Даний вид радіоактивного випромінювання не описується правилом зміщення тому, що A та Z ядра залишаються незмінними в цих процесах.

Основними механізмами взаємодії γ -випромінювання з речовиною, що призводять до послаблення його інтенсивності, є фотоефект, комптон-ефект і народження електронно-позитронних пар (див. лаб. раб. №7.2).

Важливою характеристикою радіоактивного джерела є його активність (A), яка показує скільки розпадається ядер (dN) відповідного ізотопу за одиницю часу:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N. \quad (7.1.2)$$

Одиниці виміру радіоактивності [1Ки]=[$3,7 \cdot 10^{10}$ Бк]=[$3,7 \cdot 10^{10}$ розпадів/с].

Перетворення ядра завжди супроводжується випромінюванням γ -квантів, тому активність препарату можна оцінити за кількістю γ -квантів, які випромінює джерело за одиницю часу і які реєструє лічильник.

Щоб визначити кількість ядер (N) у масі даної речовини (m), можна скористатися означенням моля речовини:

$$\lambda = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{\mu}, \quad (7.1.3)$$

де N_A – стала Авогадро, μ – молярна маса речовини.

Використовуючи (7.1.2) та (7.1.3) знаходимо масу радіоактивного препарату:

$$m = \frac{A \cdot \mu}{N_A \cdot \lambda}. \quad (7.1.4)$$

У даній лабораторній роботі для визначення активності радіоактивного препарату знаходять кількість γ -квантів, зареєстрованих за допомогою лічильника в одиницю часу (I , імп/с). Враховуючи, що випромінювання поширюється в усі напрямки рівномірно на лічильник, площа перерізу якого S , на відстані R від джерела припадає $S/4\pi R^2$ частини повного випромінювання (рис. 7.1.2).

Крім того, лічильник реєструє тільки частину η випромінювання, яке на нього падає (η – називається "ефективністю лічильника"). Тому швидкість рахування лічильником γ -квантів:

$$I = A\eta \frac{S}{4\pi R^2}, \quad (7.1.5)$$

де R – відстань від джерела до лічильника.

Співвідношення (7.1.5) визначає інтенсивність випромінювання у точці на відстані R від джерела і називається законом обернених квадратів.

Із співвідношення (7.1.5) видно, що графіком залежності I від R^2 буде пряма лінія, тангенс кута нахилу якої до осі R^2 дорівнюватиме:

$$\operatorname{tg}\alpha = A\eta \frac{S}{4\pi} \quad (7.1.6)$$

Необхідно врахувати, що у визначену з дослідів швидкість відліку включено ще значення інтенсивності I_Φ , яке обумовлене існуванням природного фону. Тому значення I у формулі (7.1.5) необхідно розраховувати як різницю значень I_x та I_Φ , тобто $I = I_x - I_\Phi$.

Для реєстрації випромінювання використовують різні детектори заряджених частинок, які можна поділити на лічильники та трекові детектори, іонізаційні, іскрові та пропорційні камери. У цій роботі використовується лічильник Гейгера – Мюллера. Цей лічильник є газорозрядним, принцип дії якого заснований на явищі існування самостійного га-

зового розряду, що буде існувати без зовнішньої іонізації газу, якщо його примусово не загасити.

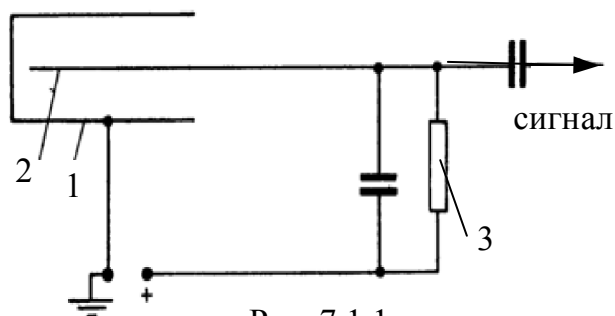


Рис. 7.1.1

Лічильник є тонкостінною, зазвичай скляною герметичною камерою циліндричної форми. Із зовнішнього боку камера вкрита тонким шаром металу, який виконує роль катоду 1 (рис. 7.1.1). Анод – це тонка

(діаметром близько 0,05 мм) металева нитка 2, протягнута вздовж осі циліндру. Така асиметрія геометрії електродів призводить до того, що електричне поле має високу напруженість лише в малій області навколо анодної нитки і малу в іншому просторі всередині лічильника.

Трубка всередині заповнюється розрідженим газом, найчастіше аргоном чи неоном. Коли γ -кванти радіоактивного ізотопу, попадають на стінки лічильника, вони вибивають електрони, які попадають всередину і рухаються у газовому просторі. Зустрівши атоми газу, електрони іонізують їх (утворюють вільний електрон і додатній іон). Електричне поле між катодом і анодом прискорює електрони до енергій, за яких починається ударна іонізація. Виникає лавина іонів, і струм через лічильник різко зростає.

При цьому на опорі 3 (рис. 7.1.1) виникає імпульс напруги, який передається до реєструючого приладу. Щоб лічильник зміг зареєструвати наступну частинку, яка до нього попадає, лавинний розряд треба загасити. Це відбувається автоматично, адже в момент появи імпульсу струму на опорі виникає велике падіння напруги, тому напруга між анодом і катодом різко зменшується настільки, що розряд зникає і лічильник знову може приймати імпульс.

Схему лабораторної установки зображено на (рис. 7.1.2), де 1 – радіоактивне джерело на рухомій платформі; 2 – лічильник Гейгера – Мюллера; 3 – лінійка; 4 – високовольтний випрямляч; 5 – секундомір; 6 – лічильник імпульсів; 7 – шторка.

Хід роботи

Насамперед студент повинен ознайомитись із положеннями техніки безпеки, далі виконувати роботу у такій послідовності:

1. Увімкнути живлення пристрою та прогріти його протягом 5...7 хвилин.
2. За допомогою регулятора напруги, що знаходиться на лічильнику імпульсів 4, встановити робочу напругу на лічильнику Гейгера – Мюллера.
3. Виміряти швидкість відліку при двох відстанях препарату до лічильника та перевірити закон обернених квадратів за формулою (7.1.5).
Для цього:
 - а) встановити шторку перед препаратом. Увімкнути лічильник, визначити кількість імпульсів за 3 хвилини та обчислити швидкість відліку I_{Φ} , що відповідає природному фону;
 - б) встановити препарат на відстані $R = 40$ см від лічильника та відкрити шторку і визначити кількість відліків за 3 хвилини. Повторити ці дії на відстанях $R = 30, 25, 15, 10$ см;
 - в) дані занести до таблиці 7.1.1;
 - г) знайти середню швидкість відліку I для кожного значення R та відняти від нього значення I_{Φ} ;
 - д) побудувати графік залежності швидкості відліку I від R^2 .
4. Обчислити активність препарату та його масу, для чого:
 - а) на побудованому графіку вибрати дві довільні точки і обчислити значення тангенса кута нахилу прямої:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\frac{I_2 - I_1}{1} - \frac{I_2 - I_1}{1}}{R_2^2 - R_1^2}; \quad (7.1.7)$$

- б) підставивши значення $\operatorname{tg}\alpha$ у формулу (7.1.6), обчислити активність препарату:

$$A = \frac{4\pi \cdot \operatorname{tg}\alpha}{\eta \cdot S}; \quad (7.1.8)$$

- в) за формулою (7.1.4) знайти масу радіоактивного препарату.

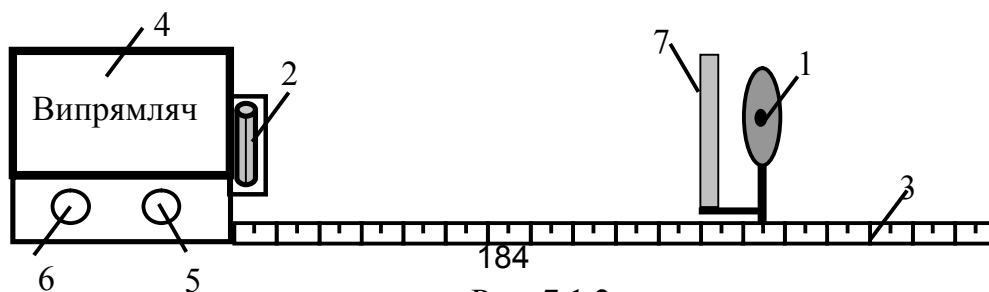


Рис. 7.1.2

Для розрахунків прийняти значення періоду напіврозпаду ядра $^{238}\text{U}=4,47 \cdot 10^9$ років (1 рік $\approx 3,16 \cdot 10^7$ сек.), а «ефективність лічильника» $\eta=0,6$.

Таблиця 7.1.1

$R, \text{ м}$	$I_x, \text{ імп/с}$	$I_\phi, \text{ імп/с}$	$I_x - I_\phi, \text{ імп/с}$	$R^{-2}, \text{ м}^{-2}$
0,40				
0,30				
0,25				
0,20				
0,15				
0,10				

Контрольні запитання

1. Дайте визначення радіоактивності.
2. Назвіть основні види радіоактивних перетворень та охарактеризуйте їх.
3. На прикладі ядра ^7_3Li охарактеризуйте склад ядра будь-якого елемента.
4. Що називається ізотопами? Назвіть ізотопи атому водню.
5. Напишіть реакцію α - розпаду ізотопу $^{238}_{92}\text{U}$.
6. Які основні методи реєстрації іонізуючих випромінювань ви знаєте?
7. Опишіть будову лічильника Гейгера – Мюллера та пояснить його принцип дії.
8. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду.
9. Що таке період напіврозпаду? Як він пов'язаний із сталю розпаду?
10. Що таке активність радіоактивного препарату?
11. Виведіть формулу для обчислення маси препарату та його активності.
12. Що таке поглинальна та експозиційна доза опромінення? Назвіть їхні одиниці вимірювання.

Лабораторна робота № 7.2. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Мета роботи: вивчити основні види взаємодії радіоактивного випромінювання з речовиною та визначити коефіцієнт поглинання γ - випромінювання різними матеріалами.

Вказівки до виконання роботи

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал: радіоактивне випромінювання та його види; закономірності α , β , γ - розпаду та їх властивості; поглинута, експозиційна та біологічна дози опромінення, їх одиниці; потужність дози опромінення.

[1, §§ 255 – 259, 2, §§ 188, 254–258, 260; 4, § 70].

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до роботи № 7.1.

Радіоактивністю називається процес спонтанного перетворення одних атомних ядер в інші, який супроводжується випромінюванням різних частинок. Найбільшу проникну здатність має γ -випромінювання, яке супроводжує α і β - розпади при перетворенні ядра. При проходженні пучка γ -квантів крізь речовину інтенсивність γ - випромінювання зменшується в основному за рахунок трьох процесів – *фотоефект*, *народження пар* та *комтонівське розсіяння*, кожен з яких набуває переваги за певних енергій γ - випромінювання.

Фотоефект – це процес при якому γ -кванти поглинаються речовиною, а їх енергія витрачається на народження вільних електронів, які або покидають поверхню матеріалу (зовнішній фотоефект) або залишаються вільними носіями заряду всередині (внутрішній фотоефект). Цей процес є переважним серед трьох зазначених взаємодій за низьких енергій γ -квантів (фотоелектричне поглинання в алюмінії найбільш суттєве для $E_\gamma < 50$ кеВ і у свинці при $E_\gamma < 0.5$ МеВ).

Із ростом енергії γ -квантів набуває переваги процес *комтонівського розсіяння* – розсіяння γ -квантів на вільних або слабо зв'язаних електронах (енергія зв'язку електронів у ядрі набагато менша за енергію γ -квантів). Внаслідок комтон-ефекту енергія розсіяного фотону зменшується, а електрон, на якому відбулося розсіяння, набуває кінетичну

енергію. Даний процес є переважним при енергіях γ -квантів $60 \text{ кеВ} < E_\gamma < 15 \text{ МеВ}$ в алюмінії і $0.7 \text{ МеВ} < E_\gamma < 5 \text{ МеВ}$ у свинці.

Утворення пар домінує над цими двома процесами при великих енергіях γ -квантів. Процес полягає у тому, що в кулонівському полі ядра або зарядженої частинки (яка отримує частку енергії фотона що вступає у взаємодію) виникає електрон-позитрона пара. Поріг даної реакції у полі важкого ядра $\approx 2m_e c^2 \approx 1,022 \text{ МеВ}$, а у полі електрона $\approx 4m_e c^2$.

Зміна інтенсивності γ - випромінювання, при проходженні крізь речовину, описується законом Бугера:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \quad (7.2.1)$$

де I_x – інтенсивність γ - випромінювання після проходження шару речовини товщиною x ; I_0 – початкова інтенсивність γ - випромінювання; μ – повний лінійний коефіцієнт поглинання, який характеризує зменшення інтенсивності випромінювання при проходженні крізь речовину. Одиниці вимірювання лінійного коефіцієнта поглинання $[\mu] = 1 \text{ м}^{-1}$.

Повний лінійний коефіцієнт (лінійний коефіцієнт) поглинання визначає долю моноенергетичних γ -квантів, які вибувають із паралельного пучка на одиниці шляху випромінювання у речовині. Він залежить від густини, порядкового номеру речовини та від енергії γ -квантів, а, отже складається із трьох складових $\mu = \tau + \varepsilon + \chi$, де τ – лінійний коефіцієнт поглинання у випадку фотоефекту, ε – лінійний коефіцієнт поглинання для комптон-ефекту, χ – лінійний коефіцієнт поглинання для процесу утворення пар.

Основними характеристиками дії γ - випромінювання, а також інших видів іонізуючого випромінювання на речовину, є поглинута, експозиційна та біологічна дози випромінювання, потужність дози опромінення.

Поглинута доза показує яка кількість енергії випромінювання поглинається одиницею маси тіла, яке опромінюється. За одиницю виміру поглинутої дози у системі СІ прийнято грей (Гр). 1 Гр – це доза, за якої речовині масою 1 кг передається енергія іонізуючого випромінювання 1 Дж (1 Гр = 100 рад).

Для повітря кількість випромінювання, яке викликає іонізацію було названо *експозиційною дозою*. Вона виражає сумарний заряд всіх іонів одного знаку в елементарному об'ємі повітря по відношенню до маси

даного об'єму. Позасистемна розповсюджена одиниця вимірювання експозиційної дози – рентген (Р), а в системі СІ – Кл/кг.

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

Важливим є вимірювання поглинутої дози біологічною тканиною. Для оцінки ступеню біологічної небезпеки, який залежить від типу іонізуючого випромінювання, було введено поняття *еквівалентної дози*. Одиниці вимірювання еквівалентної дози випромінювання – бер. 1 бер – це доза опромінення, аналогічна за своєю біологічною дією дозі опромінення рентгенівськими променями в 1 рентген.

Для забезпечення прогнозування радіоактивних впливів введено поняття *потужності дози опромінення*, яке використовується як для експозиційної, так і для поглинутої, еквівалентної доз опромінення. В кожному випадку, відповідна потужність визначає дозу, яку отримує речовина за одиницю часу.

Використовуючи формулу (7.2.1) можна отримати вираз для визначення лінійного коефіцієнту поглинання γ - випромінювання:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I_x}, \quad (7.2.2)$$

Із одержаної формули видно, що лінійний коефіцієнт поглинання γ - випромінювання різними матеріалами визначається шляхом вимірювання інтенсивності випромінювання I_x , що проходить крізь різні товщини x шару речовини, розміщеної між джерелом γ - випромінювання та лічильником, а також початкової інтенсивності γ - випромінювання I_0 .

Для одержання точніших значень інтенсивності γ - випромінювання рекомендовано від одержаних даних I_x та I_0 відняти I_ϕ – інтенсивність випромінювання природного фону, тобто випромінювання, яке фіксує лічильник при закритому свинцевому блоці джерела радіоактивного випромінювання.

Таким чином, робоча формула набуває вигляду:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0 - I_\phi}{I_x - I_\phi}. \quad (7.2.3)$$

Якщо відома густина ρ досліджуваного матеріалу, можна визначити масовий коефіцієнт поглинання, який вимірюється в $[\mu_{\text{м}}] = 1 \text{ м}^2/\text{кг}$:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}. \quad (7.2.4)$$

Схему приладу для вимірювання коефіцієнта поглинання показано на рисунку 7.2.1. Він складається з свинцевого блоку 1, в якому розміщено радіоактивний препарат, що випромінює майже паралельні γ -промені; добір змінних поглиначів 2, коефіцієнт поглинання яких визначається в даній лабораторній роботі; лічильник Гейгера – Мюллера 3 (опис див. в лаб. раб. №7.1); лічильний пристрій 4.

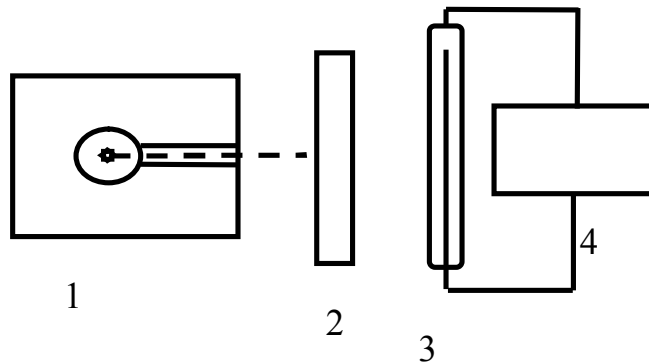


Рис.7.2.1.

Хід роботи

1. Увімкнути лічильний пристрій.
2. Протягом трьох хвилин вимірювати кількість імпульсів N_ϕ , зумовлених природним фоном. Радіоактивний препарат при цьому має бути закритий свинцевим екраном. Обчислити величину I_ϕ ($I_\phi = N_\phi/180$).
3. Відкрити радіоактивне джерело, протягом трьох хвилин вимірювати кількість імпульсів N_0 . Обчислити величину I_0 ($I_0 = N_0/180$).
4. Виміряти товщину поглиначів x і виразити її у метрах.
5. Досліджуваний зразок (метал, дерево, цегла або бетон) розташувати між джерелом радіоактивного випромінювання та лічильником і визначити інтенсивність I_x ($I_x = N_x/180$).
6. Всі результати занести до таблиці 7.2.1.
7. Використовуючи середні значення I_x , I_0 та I_ϕ розрахувати μ за формулою (7.2.3) та μ_m за формулою (7.2.4).

Таблиця 7.2.1

N_{ϕ} , імп.	I_{ϕ} , імп./с.	N_0 , імп.	I_0 , імп./с.	Товщина матеріалу, м	N_x , імп.	I_x , імп./с.	μ , 1/м	μ_m , м ² /кг

Контрольні запитання

1. Розкажіть про склад ядра атома.
2. Що називається енергією зв'язку та дефектом маси ядра?
3. Що називається радіоактивністю ?
4. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду.
5. Назвіть основні види іонізуючих випромінювань та охарактеризуйте їх.
6. Запишіть правила зміщень для α і β - розпадів.
7. Які механізми взаємодії γ -випромінювання з речовиною відомі? При яких умовах можливий кожен з цих механізмів взаємодії?
8. Що називається поглинутою, експозиційною, біологічною дозами випромінювання, потужністю дози опромінення?
9. Який фізичний зміст лінійного та масового коефіцієнтів поглинання?
10. Отримати формулу, що дозволяє визначити зв'язок між лінійним коефіцієнтом поглинання і товщиною матеріалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Загальний курс фізики:** Навч. посібник для студ. вищих техн. і пед. закладів освіти. В 3 т. /За ред. І.М.Кучерука. – К.: Техніка, 1999.
2. **Трофимова Т.И.** Курс фізики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1990.
3. **Чолпан П.П.** Фізика: Підручник. – К.: Вища шк., 2003.
4. **Савельев И.В.** Курс фізики: Учеб.: В 3-х т. – М.: Наука, 1977.
5. **Ландсберг Г.С.** Оптика. – М.: Наука, 1976. – 926 с.
6. **Азнаурян І.О.** Фізика та фізичні методи дослідження: Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2008. – 250 с.
7. **Фізика в будівництві:** Навчальний посібник / В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян, Н.Б. Бурдейна, В.Б. Долгошей, С.М. Пономаренко. – К.: КНУБА, 2011. – 252 с.
8. **Фізика. Лабораторний практикум:** Навчальний посібник. – 2-ге вид., випр. і доп. /В.І. Клапченко, В.І. Тарасевич, І.О. Азнаурян та ін. /За ред. В.І.Клапченка. – К.: КНУБА, 2006. - 228 с.

Додаток І

Деякі співвідношення між фізичними величинами

Назва одиниці виміру	Значення в СІ
Температура градусів за шкалою Цельсія ($t^{\circ}\text{C}$)	$T=t^{\circ}\text{C} + 273,15 \text{ K}$
Об'єм (1 літр)	10^{-3} м^3
Один мм. ртутного стовпа (1мм. рт. ст.)	$133,322 \text{ Н/м}^2$
Оптична сила 1 дптр (діоптрія)	1 м^{-1}
Один електрон-вольт (1eВ)	$1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Атомна одиниця маси, (а.о.м.)	$1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Один градус кута на площині (1°)	$\pi/180 \text{ радіан}$

Основні фізичні сталі

Назва фізичної сталої	Позначення	Числове значення
Гравітаційна стала	γ	$6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Число Авогадро	N_A	$6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	R	$8,315 \cdot \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Молярний об'єм ідеального газу	V_m	$22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
Електрична стала	ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,566 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Стала Больцмана	k	$1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Число Фарадея	F	$9,649 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Стала закону Стефана–Больцмана	σ	$5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$
Стала закону зміщення Віна	b	$2,897 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала Планка	h	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Питомий заряд електрона	e/m_e	$1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Заряд електрона	e	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Швидкість світла у вакуумі	c	$2,997 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Борівський радіус	a_0	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Маса спокою електрона	m_e	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м.}$
Маса спокою протона	m_p	$1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00727 \text{ а.о.м.}$
Маса спокою нейтрона	m_n	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м.}$
Стала Рідберга (для атома водню)	R	$1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Комптонівська довжина хвилі електрона	λ_c	$2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	μ_B	$9,274 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$

Енергія іонізації атома водню	W_i	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж
-------------------------------	-------	--------------------------

Навчальне видання

*Клапченко Василь Іванович; Азнаурян Ірина Олександрівна;
 Бурдейна Наталія Борисівна; Григораши Юрій Іванович;
 Долгошей Володимир Борисович; Дугінов Віталій Євгенович;
 Колесник Олена Юріївна; Краснянський Григорій Юхимович;
 Кучерова Галина Василівна; Панова Олена Вавилівна;
 Пономаренко Сергій Миколайович; Потапенко Георгій Данилович;
 Тарасевич Віталій Іванович; Хлиштун Федір Єремійович;
 Худенко Олександра Олександрівна; Бесараб Олег Миколайович*

Ф І З И К А

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ Базовий цикл

Навчальний посібник

Комп'ютерний набір та правка *І.О. Азнаурян*

Комп'ютерна верстка *О.В. Кириченко*

Підписано до друку Формат 60x84 $\frac{1}{16}$.
 Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк на різнографі.

Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк. 14,25.
 13,25.

Ум. фарбовідб. Тираж 200 прим. Вид. № 19/І-05 Зам. №
 115.

КНУБА, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680

E-mail: red-isdat@knuba.edu.ua

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі
 Київського національного університету будівництва і архітектури

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи
 ДК № 808 від 13.02.2002 р.

