

О. С. Черненко

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
З ФІЗИКИ В УМОВАХ
ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ**

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА

О. С. Черненко

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
до лабораторних робіт
з курсу загальної фізики
(для студентів нефізичних спеціальностей)

ОДЕСА
ОНУ
2022

УДК 53
Ч-49

Рецензенти:

Ю. А. Ніщук, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри експериментальної фізики Одеського національного університету імені І. І. Мечникова;

О. В. Мандель, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри біофізики, інформатики і медичної апаратури Одеського національного медичного університету.

*Рекомендовано до друку науково-методичною радою
ОНУ імені І. І. Мечникова.
Протокол № 4 від 25 серпня 2022 р.*

Черненко О. С.

Ч-49 Лабораторний практикум з фізики в умовах дистанційного навчання : метод. посіб. до лабораторних робіт з курсу загальної фізики / О. С. Черненко. – Одеса : Одес. нац. ун-т. ім. І. І. Мечникова, 2022. – 104 с.

ISBN 978-617-689-521-4

Видання направлене на розширення можливостей повноцінного проведення лабораторного практикуму з фізики в умовах дистанційного навчання, коли студенти не мають змоги бути безпосередньо в фізичних лабораторіях. Використання посилань на відео та фотоматеріали, що є варіативними (6 варіантів), дозволить на власні очі бачити проведення фізичного досліду, зміну показань приладів та проводити власні вимірювання та їх обробку.

Посібник призначений для лабораторних робіт з курсів «Фізика з основами астрономії» та «Фізика» для студентів геолого-географічного та біологічного факультетів.

УДК 53

ISBN 978-617-689-521-4

© Черненко О. С., 2022

© Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ І ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	6
1.1. Похибки результатів вимірювань	6
1.2. Похибки прямих вимірювань	7
1.3. Похибки непрямих вимірювань	12
1.4. Правила обчислення похибок	13
1.5. Похибки засобів вимірювання	14
1.6. Графічне представлення результатів вимірювань	15
Лабораторна робота № 1.1. Вимірювання лінійних розмірів тіл і визначення їх об'ємів	16
Розділ 2. МЕХАНІКА ТА МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА	
Лабораторна робота № 2.1. Визначення модуля Юнга пружних матеріалів	22
Лабораторна робота № 2.2. Дослідна перевірка рівняння Бернуллі	27
Лабораторна робота № 2.3. Визначення швидкості седиментації по методу Стокса	30
Лабораторна робота № 2.4. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою фізичного маятника (метод Бесселя)	34
Лабораторна робота № 2.5. Визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом резонансу	38
Лабораторна робота № 2.6. Експериментальне визначення відношення питомих теплоємностей C_p/C_v для повітря за методом Клемана-Дезорма	43
Лабораторна робота № 2.7. Визначення поверхневого натягу рідини методом відриву крапель	49
Лабораторна робота № 2.8. Визначення абсолютної та відносної вологості повітря психрометром Августа	53
Розділ 3. ЕЛЕКТРИКА ТА ОПТИКА	
Лабораторна робота № 3.1. Визначення опору провідників постійного струму за допомогою мостової схеми	58
Лабораторна робота № 3.2. Вивчення температурних залежностей електропровідності металів та напівпровідників	66
Лабораторна робота № 3.3. Перевірка закону Ома для ланцюга змінного струму	73
Лабораторна робота № 3.4. Визначення ємності конденсатора за допомогою мостової схеми Сотті	79
Лабораторна робота № 3.5. Визначення періоду дифракційної ґратки	82
Лабораторна робота № 3.6. Спектральний аналіз	87

<i>Лабораторна робота № 3.7.</i> Визначення лінійних розмірів малих тіл за допомогою лазера	95
<i>Лабораторна робота № 3.8.</i> Визначення радіуса кривизни лінзи за допомогою кілець Ньютона	99
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	102

ВСТУП

Основним результатом освіти, що визначає її якість, являється не скільки сума набутих студентом знань, скільки вміння навчатися, самостійно розв'язувати проблеми, розвивати мислення.

Дистанційна форма навчання дає сьогодні можливість створення систем масового безперервного самонавчання, загального обміну інформацією. До основних плюсів дистанційної освіти можна віднести:

1) **навчання в індивідуальному темпі** – швидкість вивчення встановлюється самим учнем залежно від його особистих обставин та потреб;

2) **доступність** – незалежність від географічного та тимчасового положення навчальної та освітньої установи дозволяє не обмежувати себе в освітніх потребах.

В дистанційному навчанні, разом з традиційними методами навчання, більше місце повинно відводитися самостійній роботі студентів. В першу чергу це відноситься до студентів заочного відділення.

Тим більше, що в умовах карантину заняття off-line можуть не проводитися. Найбільш проблематичним в цих умовах є проведення лабораторних занять.

В даному посібнику представлені ряд лабораторних робіт з фізики, яких можна виконати як в лабораторії, так і в дистанційній формі.

Для простоти викладення нумерація формул в межах однієї лабораторної роботи є своя власна.

Для дистанційної форми пропонується шість варіантів з посиланнями на відео-, фотоматеріали.

Розділ 1. МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ І ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Результати будь-якого експериментального досліджень фізико-хімічних явищ (фізичного експерименту) необхідно уміти проаналізувати. Це значить, що в лабораторії необхідно навчитися не тільки вимірювати різні фізико-хімічні величини, але і перевіряти і знаходити зв'язок між ними, зіставляти результати експерименту з висновками теорії.

Під **вимірюванням** розуміють порівняння вимірюваної величини з іншою величиною, прийнятою за одиницю вимірювання.

Вимірювання підрозділяють на прямі і непрямі.

При **прямих** вимірюваннях визначувану величину порівнюють з одиницею вимірювання безпосередньо або за допомогою вимірювального приладу, проградуйованого у відповідних одиницях.

При **непрямих** вимірюваннях шукана величина обчислюється з результатів прямих вимірювань інших величин, які пов'язані з вимірюваною величиною певною функціональною залежністю.

При вимірюванні фізичної величини звичайно доводиться виконувати послідовні операції:

1. вибір методу вимірювання;
2. вибір, перевірка і установка приладів;
3. спостереження свідчень приладів і відлік;
4. обчислення шуканої величини з результатів вимірювань, аналіз та обчислення похибок.

1.1. Похибки результатів вимірювань

Істинне значення фізичної величини абсолютно точно визначити неможливо. Кожне вимірювання дає значення визначуваної величини x з деякою похибкою Δx . Це значить, що **істинне значення** $x_{\text{ист}}$ лежить в інтервалі

$$x_{\text{вим}} - \Delta x \leq x_{\text{ист}} \leq x_{\text{вим}} + \Delta x$$

де $x_{\text{вим}}$ – значення величини x , набуто при вимірюванні; Δx характеризує точність вимірювання величини x . Величину Δx називають **абсолютною похибкою**, з якою визначається x .

Всі похибки підрозділяють на систематичні, випадкові та грубі (промахи). Причини виникнення похибок найрізноманітніші. Зрозуміти можливі причини похибок і звести їх до мінімуму – це і означає грамотно поставити експеримент. Ясно, що це непроста задача.

Систематичною називають таку похибку, яка залишається сталою або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини.

Такі похибки виникають в результаті конструктивних особливостей вимірювальних приладів, неточності методу дослідження, яких-небудь упущень експериментатора, а також при застосуванні для обчислень неточних формул, заокруглених констант. Вимірювальним приладом називають такий пристрій, за

допомогою якого здійснюється порівняння вимірюваної величини з одиницею вимірювання.

У будь-якому приладі закладена та або інша систематична похибка, яку неможливо усунути, але порядок якої можна врахувати.

Систематичні похибки або збільшують, або зменшують результати вимірювання, тобто ці похибки характеризуються постійністю знаку.

Випадкові похибки – помилки, появу яких не може бути попереджено. Тому вони можуть зробити певний вплив на окреме вимірювання, але при багаторазових вимірюваннях вони підкоряються статистичним законам і їх вплив на результати вимірювань можна врахувати або значно зменшити.

Промахи і грубі похибки – надмірно великі помилки, які явно спотворюють результат вимірювання. Цей клас похибок викликаний найчастіше неправильними діями спостерігача. Вимірювання, що містять промахи і грубі похибки, слід відкидати.

1.2 Похибки прямих вимірювань

Нехай в результаті повторюваних вимірювань фізичної величини маємо послідовні значення

$$x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n.$$

Подамо результати n вимірювань як відхилення виміряного від істинного значення фізичної величини x_{icm} (далі просто x) у вигляді

$$\Delta x_1 = x_1 - x; \Delta x_2 = x_2 - x; \dots, \Delta x_j = x_j - x; \dots, \Delta x_n = x_n - x.$$

Підсумовуючи члени та розділивши їх на кількість вимірювань, дістанемо

$$x = \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$$

де $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – **середнє арифметичне значення** вимірюваної величини.

При великій кількості вимірювань випадкові відхилення Δx_i , однакові за модулями, але з різними знаками, зустрічаються однаково часто. Тому

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \right) = 0.$$

Тоді $x = \bar{x}$. Отже при $n \rightarrow \infty$ істинне значення фізичної величини дорівнює середньому арифметичному (звичайно, при цьому немає систематичних похибок).

У реальній метрологічній практиці число вимірювань n є скінченною величиною. Через це завдання теорії обробки результатів вимірювань зводиться до оцінки ступеня наближення вимірюваного значення до істинного.

Повне описання появи випадкових подій здійснюється за допомогою функції розподілу. Аналогічно використовується і функція розподілу випадкових похибок. Досвід обробки результатів вимірювань показує, що розподіл похибок описується різними законами. Проте, досить часто для опису розподілу випадкових похибок використовується нормальний закон розподілу (закон Гауса)

$$p(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}\right),$$

де $p(\Delta x)$ – густина імовірності випадкової величини x , тобто імовірність, віднесена до величини відповідного інтервалу Δx ; Δx – відхилення від істинного значення; σ^2 – дисперсія генеральної сукупності. Генеральною сукупністю називається множина можливих значень вимірювань x_i або можливих значень похибок Δx_i .

Закон Гауса знаходить широке застосування в теорії похибок. Це зумовлено такими причинами:

- 1) для великої кількості вимірювань різні за модулем похибки зустрічаються однаково часто;
- 2) малі за модулем похибки зустрічаються частіше, ніж великі, тобто імовірність появи похибки тим менша, чим більше її абсолютне значення;
- 3) похибки вимірювань становлять неперервний ряд значень.

На рис. 1.1 наведено форму кривої Гауса для трьох значень σ . Початок координат розміщено в точці з нульовою похибкою. Для нормального закону розподілу є характерною його симетрія (при великій кількості вимірювань появи випадкових похибок, які рівні за розміром, але різні за знаком, – рівноймовірні) і монотонність зменшення густини імовірності (поява великих випадкових похибок малоймовірна). Права і ліва частини кривої Гауса асимптотично наближаються до осі абсцис.

Чим менше σ , тим вища крива розподілу і навпаки. Із збільшенням σ зростає розкид відліків, тобто точність вимірювання зменшується. Величина σ є основним параметром, який визначає вид кривої розподілу похибок вимірювання. Кожному з відліків відповідає точка по осі Δx .

Зміст функції Гауса такий. Площа фігури, обмеженої кривою Гауса, віссю x та прямими, паралельними вісі ординат, з координатами точок $\bar{x} + \Delta x_1$ і $\bar{x} + \Delta x_2$ (заштрихована площа на рис. 1.1), чисельно дорівнює густині ймовірності, з якою довільний вимір попадає в інтервал $[\Delta x_1, \Delta x_2]$. Вся площа під кри-

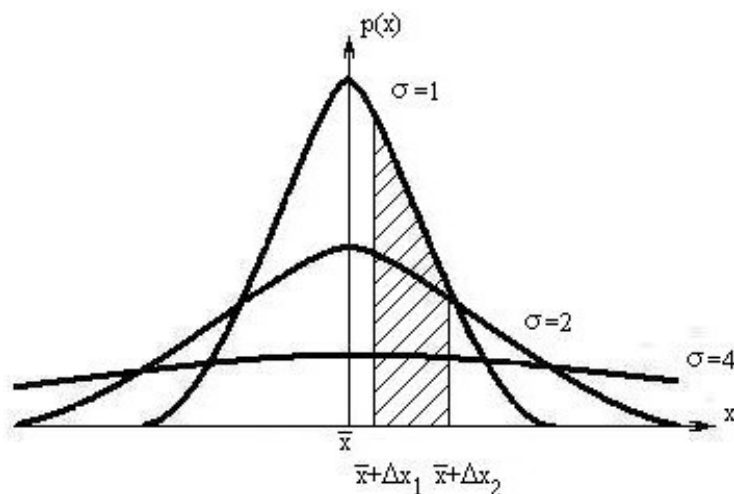


Рис. 1.1. Розподіл Гауса при різних значеннях дисперсії

вою Гауса дорівнює одиниці.

Найбільш поширеною оцінкою величини випадкової похибки є **середня квадратична** (або стандартна) **похибка** (S_n).

Згідно з означенням

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

Якщо число вимірювань дуже велике, то випадкова величина S_n прагне до деякої сталої величини σ , яку називають статистичною границею S_n :

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$$

Ця границя, власне, і є середньою квадратичною похибкою.

Для оцінки точності результату вимірювання значення фізичної величини використовують такі характеристики: довірчий інтервал та граничну (надійну) похибку середнього арифметичного.

Довірчий інтервал – це інтервал $(x_i - \Delta x_i, x_i + \Delta x_i)$, який містить істинне значення x_{ict} вимірюваної фізичної величини x із заданою імовірністю α , яка називається надійною імовірністю (або **коефіцієнтом надійності**).

Надійністю результату серії вимірювань α називають вірогідність того, що істинне значення x вимірюваної величини потрапляє в даний довірчий інтервал; виражається α або в частках одиниці, або у відсотках.

Чим більше довірчий інтервал, тим з більшою надійністю шукана величина x потрапляє в цей інтервал. Природно, що величина α залежить від числа n проведених вимірювань, а також від похибки, що задається Δx .

Так при $n > 30$, вибираючи Δx рівним σ , для інтервалу $\bar{x} \pm \sigma$ ми набудемо значення $\alpha \approx 0.68$. Ймовірність того, що будь-яке значення вимірюваної величини буде лежати в інтервалах $\bar{x} \pm 2\sigma$, $\bar{x} \pm 3\sigma$ дорівнює, відповідно, 95 % і 99 %. Значення $\alpha = 0,99$ рекомендується брати для випадків, коли вимірювання не можна повторити. Таким чином, величина σ характеризує ступінь впливу випадкових похибок на результати вимірювання: чим менше σ , тим точніше проведене вимірювання.

Обробка результатів серії вимірювань зводиться до можливо точнішого знаходження $\bar{x}$ і σ . Величину 3σ звичайно приймають за граничну абсолютну похибку окремого вимірювання (іноді замість 3σ беруть абсолютну похибку вимірювального приладу). Якщо при вимірюванні абсолютна похибка більша за 3σ , то це вимірювання слід віднести до грубих похибок або промаху.

Оскільки неможливо виконати дуже велике число вимірювань, то виникає питання: як змінюється надійність при зміні числа вимірювань? Залежність ця складна і не виражається в елементарних функціях. Існують спеціальні **таблиці коефіцієнтів Стюдента**, по яких можна визначити, в скільки разів потрібно збільшити стандартний довірчий інтервал, щоб при певному числі вимірювань n одержати задану надійність α (табл. 1.1).

Оцінка стандартного відхилення $\bar{x}$ проводиться за формулою:

Таблиця коефіцієнтів Стюдента

Число вимірю- вань n	Надійність α							
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
2	1.00	1.38	1.96	3.08	6.31	12.71	31.82	63.70
3	0.82	1.06	1.34	1.89	2.92	4.30	6.96	9.92
4	0.77	0.98	1.25	1.64	2.35	3.18	4.54	5.84
5	0.74	0.94	1.9	1.53	2.13	2.78	3.75	4.60
6	0.73	0.92	1.16	1.48	2.01	2.57	3.65	4.03
7	0.72	0.90	1.13	1.44	1.94	2.45	3.11	3.71
8	0.71	0.90	1.12	1.42	1.90	2.36	2.97	3.50
9	0.71	0.90	1.11	1.40	1.86	2.31	2.90	3.36
10	0.70	0.88	1.10	1.38	1.84	2.26	2.76	3.25
15	0.69	0.87	1.08	1.35	1.76	2.14	2.60	2.98
20	0.69	0.86	1.07	1.33	1.73	2.09	2.53	2.86
∞	0.67	0.84	1.04	1.28	1.65	1.96	2.33	2.58

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

Тоді Δx – гранична похибка, яка дорівнює половині надійного інтервалу, розраховується за формулою

$$\Delta x = t_{\alpha}^n S_{\bar{x}},$$

де t_{α}^n – нормований **коефіцієнт Стюдента**, який залежить від надійної імовірності та кількості вимірювань.

Результати вимірювань записуються у вигляді

$$x = \bar{x} \pm \Delta x = \bar{x} \pm t_{\alpha}^n S_{\bar{x}}.$$

Декілька зауважень про розподіл Стюдента. Як уже відмічалось, розподіл Стюдента справедливий для малого числа вимірювань $n \geq 2$, що характерно як для техніки, так і для наукових досліджень. Із зростанням числа вимірювань розподіл Стюдента прагне до нормального розподілу (фактично при $n > 20$).

Характерним для розподілу Стюдента є його незалежність від параметрів $\bar{x}$ та σ нормальної генеральної сукупності, а також можливість оцінки при невеликому числі вимірювань $n < 20$ похибки $\Delta x = \bar{x} - x_i$ за заданою надійною ймовірністю α або знаходження надійності вимірювання за заданим значенням Δx .

Розподіл Стюдента дає також змогу встановити, що при досить великому n середнє арифметичне значення $\bar{x}$ з імовірністю, як завгодно близькою до вірогідності, доволі мало відрізняється від істинного значення x .

Порядок обробки результатів вимірювань наступний:

- виконують n вимірювань і записують їх результати в таблицю;
- обчислюють $\bar{x}$;
- обчислюють S_x і знаходять по таблиці коефіцієнт Стюдента t_α^n залежно від заданої надійності α і числа вимірювань n .

Результат записують у вигляді

$$x = \bar{x} \pm t_\alpha^n S_x.$$

Це означає, що істинне значення вимірюваної величини x_{icm} знаходиться в інтервалі $[\bar{x} - t_\alpha^n S_x; \bar{x} + t_\alpha^n S_x]$ з надійністю α .

Мірою точності результатів вимірювань є **відносна похибка** (в %):

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100 \, \%.$$

Зворотну їй величину $\psi = \frac{1}{\varepsilon_x}$ називають точністю вимірювань.

Використовуючи таблицю коефіцієнтів Стюдента, часто вирішують і зворотну задачу: по відомій абсолютній похибці вимірювального приладу і заданій величині надійності визначають необхідне число вимірювань в серії.

Приклад. Нехай проведено 6 вимірювань товщини пластинки штангенциркулем. Результати вимірювань наведено в табл. 1.2. Провести обробку результатів вимірювання при $\alpha = 0,95$.

Обробку результатів виконуємо у такій послідовності:

- а) вважаємо, що систематичних похибок немає;
- б) обчислюємо середнє арифметичне $\bar{d} = 30,0$ мм;
- в) обчислюємо значення $\Delta d_i, \Delta d_i^2$ і записуємо їх у таблицю;

Таблиця 1.2

Результати вимірювання

Номер спостереження	Результати спостереження, d_j , мм	Відхилення від середнього арифметичного, Δd_i , мм	Квадрат відхилення від середнього арифметичного Δd_i^2 , мм ²
1	30.1	+0.1	0.01
2	30.0	—	—
3	30.1	+0.1	0.01
4	29.8	−0.2	0.04
5	29.9	−0.1	0.01
6	30.1	+0.1	0.01

г) обчислюємо оцінку середнього квадратичного відхилення результату спостереження:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2} = \sqrt{\frac{1}{5} \cdot 0.08 \text{ мм}^2} \approx 0.1 \text{ мм}.$$

Максимальна можлива похибка S_{dmax} . Її ми беремо такою, що дорівнює $3S_d$ (за правилом трьох сигма вважають, що значення 3σ є межею випадкового відхилення спостереження або просто максимальним відхиленням; йому відповідає імовірність $\alpha = 0.997$ (практично дорівнює одиниці); зважаючи на це, одним з критеріїв промаху є значення відхилення окремого спостереження, більше 3σ). Отже, результати всіх шести спостережень слід вважати надійними, оскільки вони задовольняють правило трьох сигма, і промахів немає;

д) обчислюємо оцінку середнього квадратичного відхилення результату вимірювання за формулою

$$S_{\bar{d}} = \frac{S_d}{\sqrt{n}}, \quad S_{\bar{d}} = \frac{0.1 \text{ мм}}{\sqrt{6}} \approx 0.04 \text{ мм};$$

е) обчислюємо надійні межі випадкової похибки результату вимірювання при $\alpha = 0,95$.

При $n = 6$ і $\alpha = 0,95$ коефіцієнт Стюдента $t_{\alpha}^n = 2,57$. Тоді $\Delta d = 2,57 \cdot 0,04 \approx 0,1$ мм.

Результат вимірювань записуємо у вигляді $d = 30,0 \pm 0,1$ мм.

Відносна похибка:

$$\varepsilon_d = \pm \frac{\Delta d}{d} \cdot 100\% = \pm 3,3\%.$$

Якщо ж зроблено тільки одне вимірювання, то точність вимірювання фізичних величин в цьому разі (якщо воно виконано ретельно) характеризується точністю вимірювального приладу.

1.3. Похибки непрямих вимірювань

Як бути, якщо x визначається не прямим вимірюванням, а непрямим, тобто за наслідками вимірювань інших величин y і z ? Хай x є деякою функцією y і z , тобто

$$x = f(y, z).$$

Тоді якнайкраще значення при оцінці x рівне

$$\bar{x} = f(\bar{y}, \bar{z}),$$

де $\bar{y}$ і $\bar{z}$ – середні арифметичні значення. Як же знайти Δx , якщо відомі Δy і Δz ? Оскільки самі величини y і z знаходяться шляхом прямих вимірювань, то їх похибки Δy і Δz можна оцінити по формулах для прямих вимірювань.

Простою оцінкою для Δx є різниця

$$\Delta x = f(\bar{y} + \Delta y, \bar{z} + \Delta z) - f(\bar{y}, \bar{z}) \approx \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z,$$

тобто помилка непрямого вимірювання знаходиться через помилки прямих вимірювань за правилом диференціювання. Часто цієї оцінки виявляється досить.

Точнішим є наступний вираз:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta z^2},$$

де $\frac{\partial f}{\partial z}$ і $\frac{\partial f}{\partial z}$ – частинні похідні по y і z , взяті при значеннях $y = \bar{y}$, $z = \bar{z}$.

Часто зручно виражати точність, з якою знайдено x , через відносну похибку ε_x . За визначенням

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}},$$

де $\bar{x}$ – розраховують через $\bar{y}$ і $\bar{z}$.

Розглянемо практично важливий випадок, коли шукана величина є степеневою функцією від інших параметрів. Наприклад, **об'єм циліндра** визначається через його діаметр і висоту:

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4},$$

$$\text{Тоді } \frac{\partial V}{\partial d} = \frac{\pi d h}{2} \text{ та } \frac{\partial V}{\partial h} = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Відносна похибка визначення об'єму рівна

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{\bar{V}} = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_h^2},$$

де $\bar{V}$ – середній об'єм циліндру, розрахований при середніх значеннях діаметру $\bar{d}$ та висоти $\bar{h}$.

Звідси випливає важливий висновок: при вимірюваннях необхідно найточніше визначити значення величини, що входить в розрахункову формулу з найбільшим по модулю показником степеня.

1.4. Правила обчислення похибок

Похибку звичайно виражають однією значущою цифрою і лише при особливо відповідальних вимірюваннях – двома. Похибки вимірювання вказують, які цифри є сумнівними в числовому значенні зміряної величини. Оскільки точність визначення фізичної величини визначається вимірюванням, а не обчисленням, те округлення числового значення результату вимірювання проводиться до цифри того ж порядку, що і значення похибки.

При округленні результатів вимірювань необхідно пам'ятати наступні правила наближених обчислень.

1. Зайві цифри у цілих чисел замінюються нулями, а у десяткових дробів відкидаються. Наприклад,

$$Y = 123\,357 \pm 678 \text{ (до округлення);}$$

$$Y = 123\,400 \pm 700 \text{ (після округлення),}$$

2. Якщо замінювана нулем або відкидана цифра старшого розряду менше 5, то цифри, що залишаються, не змінюються, а якщо вказана цифра більше 5, то остання цифра, що залишається, збільшується на одиницю. Наприклад,

$$Y = 237,46 \pm 0,13 \text{ (до округлення);}$$

$$Y = 237,5 \pm 0,1 \text{ (після округлення).}$$

3. Якщо замінювана нулем або відкидана цифра рівна 5 (з подальшими нулями), то округлення проводиться так: остання цифра в заокругленому числі залишається без зміни, якщо вона парна, і збільшується на одиницю, якщо вона непарна. Наприклад,

$$Y = 237,465 \pm 0,127 \text{ (до округлення);}$$

$$Y = 237,46 \pm 0,13 \text{ (після округлення),}$$

$$Y = 237,5 \pm 0,1 \text{ (після округлення).}$$

При представленні остаточних результатів фізичних вимірювань часто застосовують запис числових значень у вигляді десяткового дробу, помноженого на необхідну степінь числа десять. Наприклад, числа 3106; 0,0285; 0,120 записуються так: $3 \cdot 106 \cdot 10^3$; $2,85 \cdot 10^{-2}$; $1,2 \cdot 10^{-1}$. Швидкість світла 300 000 км/с звичайно записують як $3 \cdot 10^5$ км/с.

Маючи результати вимірювань можна визначити вірні, сумнівні і невірні цифри. Якщо похибка містить в собі десятки, то число десятків буде сумнівним. Наприклад, в серії вимірювань одержано: $h_1 = 5365$ м, $h_2 = 5390$ м, $h_3 = 5420$ м, $\bar{h} = 5392$ м. У остаточному результаті $h = (5392 \pm 30)$ м похибка містить в собі десятки метрів. Цифри, що стоять зліва від сумнівної, – вірні; що стоять праворуч від сумнівної – невірні (вони повинні бути відкинуті як в початкових даних, так і в остаточному результаті). У розглянутому прикладі остаточний результат слід записати так: $h = (5390 \pm 30)$ м.

До значущих відносять всі вірні і сумнівні цифри; до незначущих – нулі на початку десяткових дробів, менших 1; нулі в кінці числа, що замінили цифри, відкинуті після округлення; невірні цифри, якщо вони з якихось причин не відкинуті.

1.5. Похибки засобів вимірювання

Для характеристики більшості вимірювальних приладів часто використовують поняття приведеної похибки E_n (класу точності). Приведена похибка – це відношення абсолютної похибки Δx до граничного значення x_{np} вимірюваної величини (тобто до найбільшого її значення, яке може бути виміряне за шкалою приладу). Приведена похибка, будучи по суті відносною похибкою, виражається у відсотках:

$$\Delta E_n = \left| \frac{\Delta x}{x_{np}} \right| \cdot 100\% .$$

По приведеній похибці прилади розділяють на сім класів: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4.

Прилади класу точності 0,1; 0,2; 0,5 застосовують для точних лабораторних вимірювань і називають прецизійними.

У техніці застосовують прилади класів 1; 1,5; 2,5 і 4 (технічні).

Клас точності приладу вказують на шкалі приладу. Якщо на шкалі такого позначення немає, то даний прилад позакласний, тобто його приведена похибка більше 4 %.

Завод, що випускає прилад, гарантує відносну похибку вимірювання даним приладом, рівну класу точності (зведеної похибки) приладу при вимірюванні величини, що дає показчик на всю шкалу. Визначивши за шкалою приладу клас точності і граничне значення, легко розрахувати його абсолютну похибку, яку приймають однаковою на всій шкалі приладу. Знаки $\langle\langle + \rangle\rangle$ і $\langle\langle - \rangle\rangle$ означають, що похибка може бути допущена як у бік збільшення, так і у бік зменшення від дійсного значення вимірюваної величини.

При використуванні приладу для конкретних вимірювань рідко буває так, щоб вимірювана величина займала всю шкалу. Як правило, вимірювана величина менше. Це збільшує відносну похибку вимірювання.

Для оптимального використування приладів їх підбирають так, щоб значення вимірюваної величини потрапляло в кінець шкали приладу, це зменшить відносну похибку вимірювання і наблизить її до класу точності приладу.

У тих випадках, коли на приладі клас точності не вказаний, абсолютна похибка приймається рівній половині ціни якнайменшого розподілу.

Так, при вимірюванні лінійкою, якнайменший розподіл якої 1 мм, припускається помилки до 0,5 мм. Для приладів, оснащених ноніусом, за приладову похибку приймають похибку, визначувану ноніусом (для штангенциркуля – 0,1 мм або 0,05 мм; для мікрометра – 0,01 мм).

Точність приладу неможливо перевершити ніяким методом вимірювання на ньому. Для точніших вимірювань застосовують прилад вищого класу.

Вибираючи прилад для вимірювання якої-небудь фізичної величини, керуються перш за все метою вимірювання.

Для вимірювання товщини дроту не можна користуватися міліметровою лінійкою, потрібен штангенциркуль, мікрометр або інший точніший прилад (наприклад, мікроскоп). А ось для вимірювання площі лабораторного столу досить метрової лінійки з сантиметровими розподілами.

1.6. Графічне представлення результатів вимірювань

Графічний метод зручно застосовувати тоді, коли досліди проводяться для вивчення залежності між двома величинами. Перевага графіків – це, перш за все, наочність, тобто достатньо ясне представлення особливостей залежності, що вивчається: убуття, зростання, наявність максимумів, мінімумів, точок перегину, періодичність і т. д. Графічний метод дає можливість інтерполяції і екстраполяції результатів досліду. Але необхідно пам'ятати, що екстраполяцією слід користуватися, якщо крива графіка знаходить плавний хід і немає підстав чекати різких її змін за межами графіка. Використовування графіків полегшує обробку результатів вимірювань, а також дозволяє знайти помилки вимірювань, зокрема промахи, і виключити їх вплив на результат обробки.

Для побудови графіка (рис. 1.2) складають таблицю результатів. Потім на міліметрівці або в графічному редакторі креслять взаємно перпендикулярні осі. По осі ординат прийнято відкладати залежну змінну величину, тобто функцію, а по осі абсцис – значення незалежних змінних величин, тобто аргументи. Особливу увагу слід звернути на вибір **масштабу**. Масштаб вибирають так, щоб повністю використувати всю площу креслення і щоб графік проходив ближче

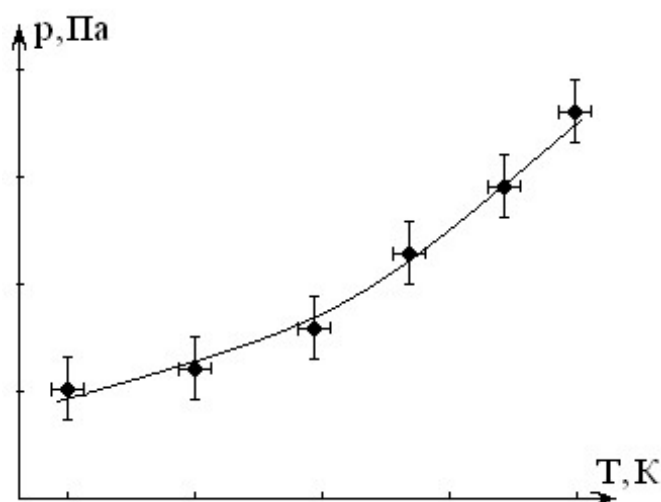


Рис. 1.2. Приклад графічного представлення результатів вимірювання

до бісектриси кута між осями. Зовсім необов'язково, щоб нульові значення аргументу і функції співпадали з початком координат. На осях слід відкладати той діапазон значень, який фігурує в досліді. Масштаб по осях слід вибирати таким, щоб легко було читати значення, що цікавлять, наприклад, якщо відстань між двома сусідніми лініями рівна одній, двом, чотирьом, п'яти, десяти одиницям. Якщо ж ця відстань рівна трьом, шести, семи, дев'яти одиницям, то для визначення координати крапок на графіку витрачається багато зусиль. Крім того, масштаб слід вибирати, враховуючи похибку тих вимірюваних величин, які наносять на графік. Найменший розподіл на графіку повинен бути не менше абсолютної похибки даної величини. На осях необхідно вказати числові значення фізичних величин, що відкладаються, і їх одиниць. При цьому множники, що визначають порядок величин, можуть включатися в їх одиниці, наприклад, ($I, A \cdot 10^{-3}$).

Іноді користуються іншими позначеннями, наприклад, $d \cdot 10^3 (м)$. Такий запис означає, що значення, що цікавить, необхідно розділити на 10^3 і результат буде виражений в метрах. Дослідну криву на графіку слід проводити, не просто сполучаючи крапки, а вибираючи переважний напрям серед крапок (рис. 2). Крива повинна проходити так, щоб приблизно однакове число крапок знаходилося над кривою і під нею, тобто по можливості ближче до більшості експериментальних крапок. Абсолютні помилки наносять у вигляді вертикальних і горизонтальних відрізків.

Якщо вимірювана величина змінюється дуже сильно, на декілька порядків, то зручно застосувати логарифмічну шкалу, тобто відкладати на осях логарифми вимірюваної величини, або напівлогарифмічну, коли логарифми відкладають тільки по одній з осей. При цьому необхідно пам'ятати, що логарифмічний масштаб можна застосовувати без втрати точності, якщо відносна похибка постійна по всій залежності.

Лабораторна робота № 1.1

Вимірювання лінійних розмірів тіл і визначення їх об'ємів

Мета роботи: ознайомитися з методикою обробки результатів прямих і непрямих вимірювань на прикладі визначення об'ємів циліндра і кулі.

Обладнання: штангенциркуль, мікрометр, тіла «сферичної» та «циліндричної» форми різного розміру

Для вимірювання лінійних величин застосовують найрізноманітніші способи, вибір яких визначається заданою точністю та умовами експерименту.

Для безпосередніх вимірювань довжини широко використовуються такі міри, як масштабна лінійка, металеві вимірювальні лінійки, рулетки без стабілізуючої основи. Точність вимірювання довжини цими мірами невисока. Ціна поділки, наприклад, масштабної лінійки не перевищує половини ціни поділки і дорівнює 0.5 мм.

Для більш точних вимірювань користуються приладами з ноніусом, який побудовано за принципом методу збігів. Ноніуси (у такому вигляді, як вони застосовуються тепер) винайшов у 1631 р. у Франції директор Монетного двору Ц. Верньє. Тому їх правильно було б назвати верньєрами, як в геодезії. У фізиці та техніці їх прийнято називати ноніусами за ім'ям португальця П. Нуніша (Nunes, латинізоване ім'я Nonius), який у 1542 р. винайшов подібне, але менш зручне пристосування, що нині не застосовується.

Метод лінійного ноніуса. Ноніусом називається невелика додаткова шкала до звичайного масштабу, яка дає змогу підвищити точність вимірювання в 10-20 разів. Ноніус переміщується по основній шкалі. Розглянемо лінійний ноніус штангенциркуля. Ноніус для вимірювання з точністю до 0,1 мм являє собою шкалу довжиною 9 мм, поділену на десять рівних частин (рис. 1.3а). Тому одна поділка ноніуса дорівнює 0,9 мм, тобто менша від поділки основної шкали масштабної лінійки. Коли нульова мітка (штрих) шкали ноніуса буде між певними мітками основної шкали штангенциркуля, то це означатиме, що до цілого числа міліметрів треба додати певне число x десятих часток міліметра. Будова ноніуса ґрунтується на тому, що людське око легко розрізняє, чи є два штрихи продовженням один одного, чи вони дещо зсунуті.

Для визначення числа x знаходимо мітку шкали ноніуса, яка збігається з якоюсь міткою основної шкали (на рис. 1.3б це друга відмітка ноніуса). Нехай такою міткою буде n -на по порядку мітка шкали ноніуса. Оскільки вимірювана

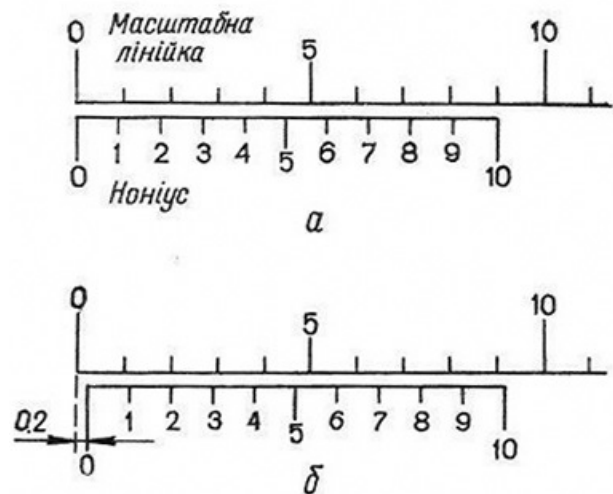


Рис. 1.3. Метод лінійного ноніусу

дробова частина міліметра дорівнює різниці між цілим числом міліметрів за основною шкалою штангенциркуля (n мм) і відстанню по шкалі ноніуса від нульової до мітки, що збігається ($0,9$ мм), можна записати $0,1x = n - 0,9n$, тобто $x = n$.

Отже, порядковий номер збіжної мітки ноніуса безпосередньо дає число десятих часток міліметра.

Шкала ноніуса для вимірювання з точністю до $0,05$ мм має 20 однакових поділок на довжині 19 мм, а шкала ноніуса для вимірювання з точністю до $0,02$ мм має 50 однакових поділок на довжині 49 мм. Мітка цих ноніусів, яка збігається зі штрихом основної шкали, дорівнює за довжиною поділкам ноніуса. Якщо $\Delta\alpha_n$ і $\Delta\alpha_m$ відповідні відносно ціни поділок ноніуса і основної шкали, то

$$n \Delta\alpha_n = (n - 1) \Delta\alpha_m,$$

звідки різниця цих поділок (тобто точність ноніуса)

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_n = \frac{\Delta\alpha_m}{n}.$$

Точністю ноніуса називають величину $\Delta\alpha_m/n$, яка дорівнює відношенню ціни найменшої поділки основної шкали до числа поділок ноніуса. Під точністю відліку за ноніусом розуміють ціну його поділки.

Довжина відрізка, вимірюваного за допомогою ноніуса, дорівнює числу цілих поділок основного масштабу (шкали) плюс точність ноніуса, помножена на номер поділки ноніуса, співпадаючої з деякою поділкою основної шкали.

Штангенциркуль (рис. 1.4) – це прилад для вимірювання лінійних розмірів з точністю від $0,1$ до $0,02$. Штангенциркуль складається із сталюї лінійки (штанги) 5 з міліметровими поділками, відносно якої переміщується рамка з ноніусом 4, і двох пар губок (ніжок) – нерухомих 1 і рухомих 2. Між губками затискають вимірювану деталь. Щоб точно визначити розмір деталі, рухому губку штангенциркуля переміщують у момент дотику її до деталі за допомогою мікрометричного пристрою, щоб запобігти надмірному натисканню губок на

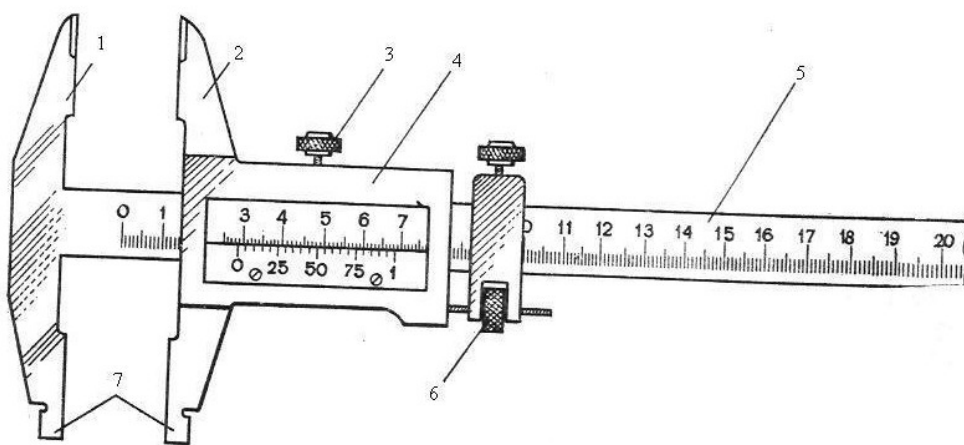


Рис. 1.4. Будова штангенциркуля: 1 – нерухома ніжка, 2 – рухома ніжка, 3 – стопорний гвинт, 4 – рамка з ноніусом, 5 – лінійка, 6 – мікрометричний пристрій, 7 – ніжки для вимірювання внутрішніх розмірів

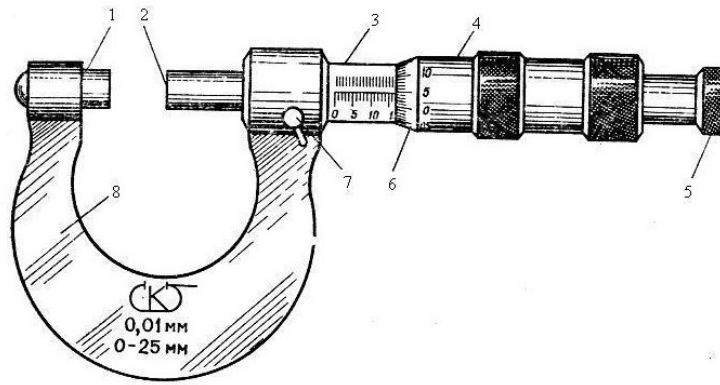


Рис. 1.5. Будова мікрометра: 1 – нерухома опорна п'ята, 2 – вимірювальна поверхня, 3 – стебло, 4 – мікрометричний гвинт, 5 – пристрій тріскачка, 6 – скошений обід барабана, 7 – стопорний гвинт, 8 – стальна скоба

деталь. Закріплюють рухому губку на штанзі стопорним гвинтом 3 (при відповідних навичках роботи з штангенциркулем гвинт можна не закріплювати) і роблять відлік за ноніусом. Для вимірювання внутрішніх розмірів деталі є калібровані губки 7. Загальна ширина їх при зведених губках найчастіше дорівнює 10 мм; цей розмір треба додавати до відліку за шкалою.

Мікрометр (рис. 1.5) – це інструмент для вимірювання лінійних розмірів з точністю до 0,01 мм. Він складається із стальної скоби 8, що має нерухому опорну п'яту 1, стебла 3, мікрометричного гвинта 4 і стопорного гвинта 7. Мікрометричний гвинт переміщується всередині спеціальної гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі. Крок гвинта 0,5 – 1,0 мм. На зовнішній поверхні стебла нанесено дві поздовжні шкали, зсунуті одна відносно одної на 0,5 мм. Зовні стебло охоплює барабан 4, з'єднаний з мікрометричним гвинтом. Таким чином, при обертанні барабана обертається і гвинт; при цьому переміщується його вимірювальна поверхня 2. Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступальне переміщення, пропорційне куту повороту. Скошений обід барабана 6 поділено на 50 (або 100) однакових поділок. На правому кінці барабана є особливий фрикційний пристрій – тріскачка 5. При вимірюванні слід обертати барабан тільки за головку тріскачки. Деталь при вимірюванні затискається між п'ятою і мікрометричним гвинтом. Після того, як досягнуто певного ступеня натиску на деталь, фрикційна головка починає проковзувати, даючи характерний тріск. Завдяки цьому затиснута деталь деформується порівняно мало (її розміри не спотворюються) і, крім того, це запобігає псуванню мікрометричного гвинта. Для відлічування показів мікрометра по шкалі стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. Для відлічування сотих часток міліметра користуються поділками на барабані (крок мікрометричного гвинта визначається заздалегідь).

Порядок виконання роботи

Визначення об'єму циліндра

1. Штангенциркулем виконати п'ять вимірювань діаметра і п'ять вимірювань висоти циліндра. Дані занести в таблицю.
2. Результати прямих вимірювань обробити в відповідності з теорією похибок і правилами наближення.
3. Обчислити об'єм циліндра, відносну похибку об'єму, а також величину довірливого інтервалу.

Визначення об'єму кулі.

1. За допомогою мікрометра зробити 5 вимірювань діаметра кульки.
2. Виконати обробку прямих, а потім непрямих вимірювань.
3. Обчислити об'єм кулі, відносну похибку об'єму, а також величину довірливого інтервалу.

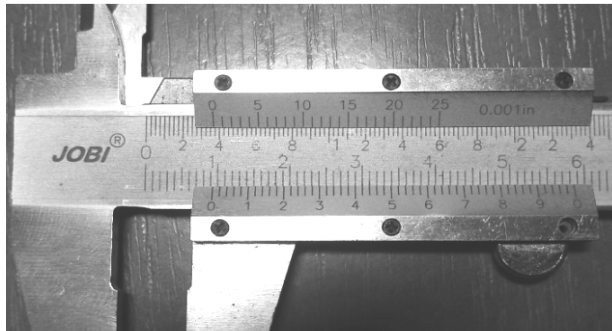
Варіанти обробки результатів вимірювання об'єму циліндру для самостійної роботи

Варіант	d , мм					h , мм				
1	4.2	4.3	4.2	4.1	4.4	17.8	17.9	17.7	18.0	17.7
2	5.2	5.3	5.2	5.1	5.4	18.8	18.9	18.7	19.0	18.7
3	6.2	6.3	6.2	6.1	6.4	19.8	19.9	19.7	20.0	19.7
4	7.2	7.3	7.2	7.1	7.4	20.8	20.9	20.7	21.0	20.7
5	8.2	8.3	8.2	8.1	8.4	21.8	21.9	21.7	22.0	21.7
6	9.2	9.3	9.2	9.1	9.4	22.8	22.9	22.7	23.0	22.7
7	10.2	10.3	10.2	10.1	10.4	23.8	23.9	23.7	24.0	23.7
8	11.2	11.3	11.2	11.1	11.4	24.8	24.9	24.7	25.0	24.7
9	12.2	12.3	12.2	12.1	12.4	25.8	25.9	25.7	26.0	25.7
10	13.2	13.3	13.2	13.1	13.4	26.8	26.9	26.7	27.0	26.7
11	14.2	14.3	14.2	14.1	14.4	27.8	27.9	27.7	28.0	27.7
12	15.2	15.3	15.2	15.1	15.4	28.8	28.9	28.7	29.0	28.7
13	16.2	16.3	16.2	16.1	16.4	29.8	29.9	29.7	30.0	29.7
14	17.2	17.3	17.2	17.1	17.4	30.8	30.9	30.7	31.0	30.7
15	18.2	18.3	18.2	18.1	18.4	31.8	31.9	31.7	32.0	31.7

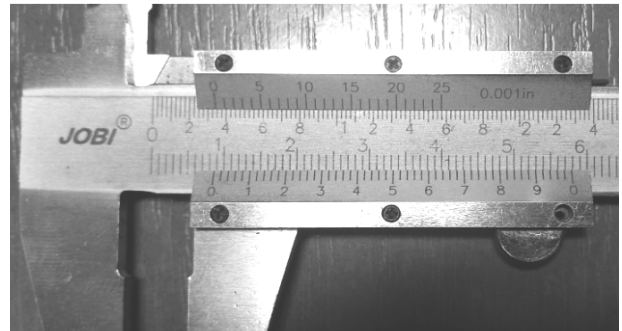
Контрольні запитання і завдання

1. Що означає виміряти фізичну величину? Як потрібно представляти результат вимірювання?
2. Яким чином можна перевірити на наявність грубих похибок при вимірюванні деякої величини?
3. Охарактеризуйте прямі і непрямі, контактні і безконтактні методи вимірювання лінійних розмірів.
4. Що являє собою ноніус, і на чому базується метод лінійного ноніуса?
5. Що таке довірливий інтервал? Який фізичний зміст має коефіцієнт надійності?
6. Що представляє собою коефіцієнт Стюдента? До яких граничних значень буде прямувати коефіцієнт Стюдента для $\alpha = 0,68, 0,95$ та $0,997$, якщо кількість вимірювань необмежено зросте?

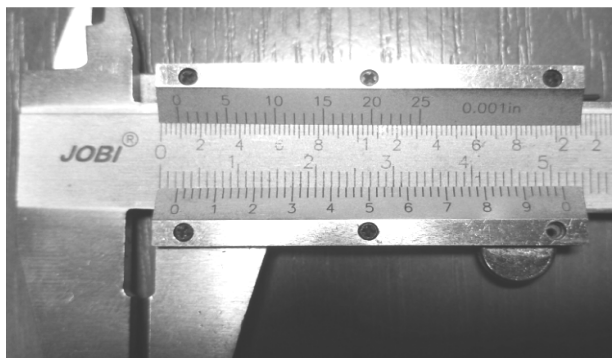
7. Яка будова і які правила користування штангенциркулями, мікрометричними інструментами, механічними вимірювальними приладами?
8. Яка ширина зазору між ніжками штангенциркуля на представлених нижче рис. 1.6 та для мікрометра на рис. 1.7?



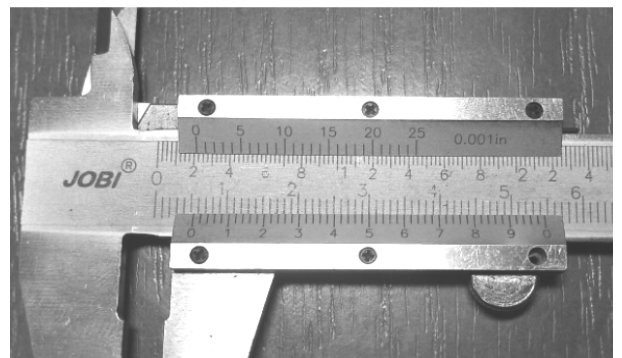
а



б

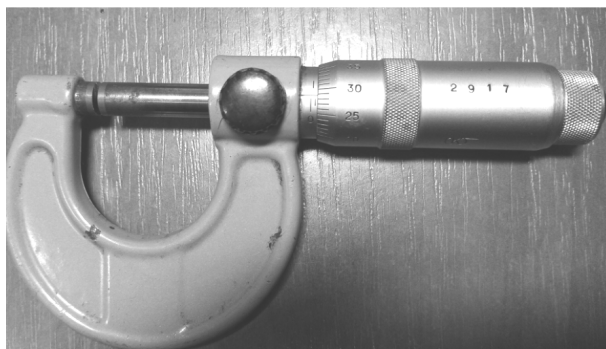


в

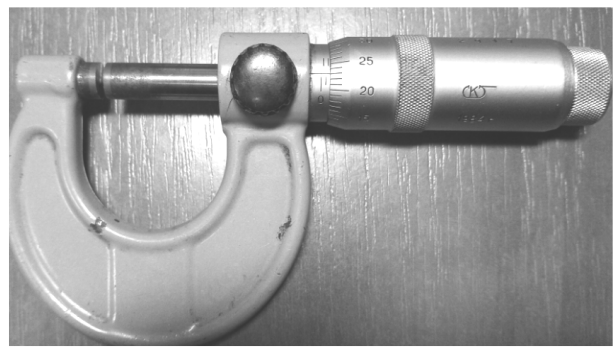


г

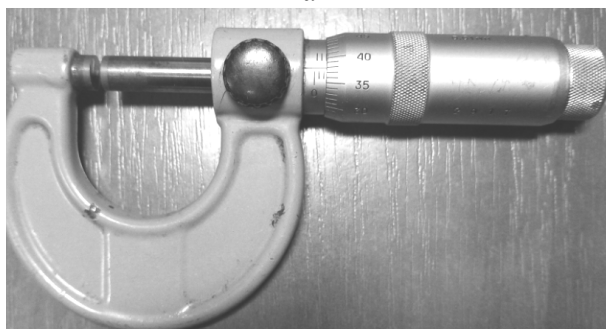
Рис. 1.6. Різні положення ніжок штангенциркуля



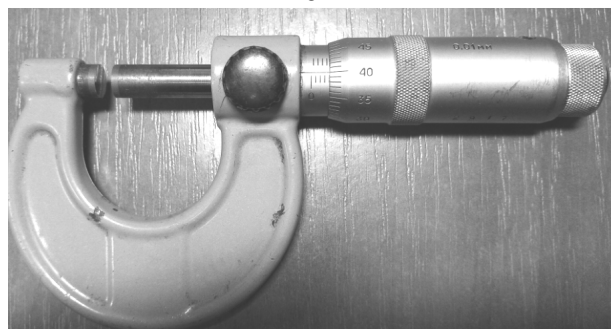
а



б



в



г

Рис. 1.7. Різні положення мікрометра

РОЗДІЛ 2. МЕХАНІКА ТА МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

Лабораторна робота № 2.1

Визначення модуля Юнга пружних матеріалів

Мета роботи: Визначити модуль Юнга методами розтягнення та вигину для різних матеріалів, які мають форми трубок і пластин.

Обладнання: індикатор лінійного подовження, набір сталевих вантажників масою по 0,5 кг.

Деформацією називають зміну форми та об'єму тіл під дією різних сил. В залежності від сил, які діють, розрізняють наступні види деформацій: розтягнення, стиснення, зсув, кручення, вигиб. Всіляка деформація пружного тіла супроводжується виникненням пружних напруг. Вони виникають внаслідок того, що зовнішня сила викликає зміщення одних частин відносно інших. Кожна частина тіла діє на оточуючі її частини, які, в свою чергу, чинять на неї рівну та протилежну дію. Таким чином через будь-яку площадку усередині тіла передається дія двох рівних та протилежних сил. Границя відношення сили ΔF до площини перетину ΔS , на яку вона діє, визначена за умови, що площа перетину прямує до нуля, називається механічною напругою в даній точці тіла:

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S}.$$

Механічна напруга в різних точках тіла – різна, та тільки в деяких випадках можна вважати їх постійними у взятому перетині. В цьому випадку напруга рівна $\sigma = F/S$. При зміні зовнішньої сили, деформація, яка її викликає, також змінюється. При невеликих зовнішніх силах, тобто для **пружних (малих)** деформаціях спостерігається пропорційність між зовнішньою силою та величиною деформації $\Delta \ell$ (закон Гука: $F = k \cdot \Delta \ell$, де k – коефіцієнт пружності, що залежить від матеріалу та фізичного стану тіла). Після закінчення дії зовнішньої сили деформація зникає, тобто тіло відновлює свою початкову форму та розміри. Це стадія **пружних деформацій**.

При збільшенні деформуючої сили пропорційність порушується, деформація зростає швидше, причому після закінчення дії сили деформація зникає не повністю. Це стадія **пластичних** деформацій. Напругу, яка розмежовує стадії пружних та пластичних деформацій, називають **межею пружності** тіла. Деформація, яка зберігається після закінчення дії сили, називається **залишковою**. При ще більшому збільшенні зовнішньої сили тіло можна зруйнувати. Напруга, вище якої тіло руйнується, називається **межею міцності**.

а) Визначення модуля Юнга по деформації розтягнення

Розглянемо випадок деформації розтягнення для тіла, яке має скрізь однакову товщину. Прикладом можуть бути металева нитка, дріт. Якщо верхній кінець такого тіла закріпити, а до нижнього підвесити тягар масою m , то тіло буде видовжуватися. Позначимо його початкову довжину через ℓ , а абсолютне

подовження через $\Delta\ell$. За величину деформації прийmemo відносне подовження $\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell}$. По закону Гука відносне подовження ε пропорційне механічній напрузі: $\varepsilon \sim \sigma$. З міркувань зручності коефіцієнт пропорційності вводять, як обернену величину E , яка називається модулем Юнга. Вона вимірюється Н/м², або в Па. **Закон Гука** в цьому випадку записується у вигляді:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{або} \quad \frac{\Delta\ell}{\ell} E = \frac{F}{S}.$$

З цієї рівності очевидно, що **модуль Юнга рівний тій напрузі, яка б розтягнула тіло вдвічі ($\Delta\ell = \ell$) в порівнянні з початковою довжиною**. Однак для більшості тіл це неможливо, так як такі напруги перевищують межу міцності. Модуль Юнга з врахуванням виразу для площі перетину дроту $S = \frac{\pi d^2}{4}$ обчислюють за формулою:

$$E = \frac{4\ell}{\pi d^2 (\Delta\ell/P)}, \quad (1)$$

де $P = mg$ – сила, з якою розтягується досліджуваний зразок. Модуль Юнга характеризує пружні властивості і є важливою характеристикою тіл. Для знаходження модуля Юнга методом розтягнення використовується пристрій, який зображений на рис. 2.1.

До досліджуваного зразку приєднана платформа, на яку послідовно кладуть гирі, в результаті чого змінюється натяг дроту. Індикатор відмічає збільшення довжини дроту. При проведенні досліду необхідно мати на увазі, що сталевий дріт при відсутності навантаження завжди трохи зігнута, що не може сказатися на результатах, особливо при великих навантаженнях. Випрямляти дріт шляхом збільшення початкової напруги небезпечно, бо це може призвести до невиконання закону Гука, тобто можуть виникнути залишкові деформації.

Порядок виконання роботи:

1. Встановити індикатор на нуль.
2. В процесі експерименту необхідно слідкувати за виконанням закону Гука (лінійного зв'язку між відносним подовженням та напругою). Для цього необхідно навантажити дріт одним з тягарів масою 0,5 кг, потім його забрати, відмічаючи кожен раз абсолютне подовження $\Delta\ell$. Повторити експеримент з двома, трьома, чотирма і п'ятьма гирями. Якщо довжина дроту не повертається в початковий стан, необхідно кожного разу аретирувати (встановлювати на нуль) індикатор.

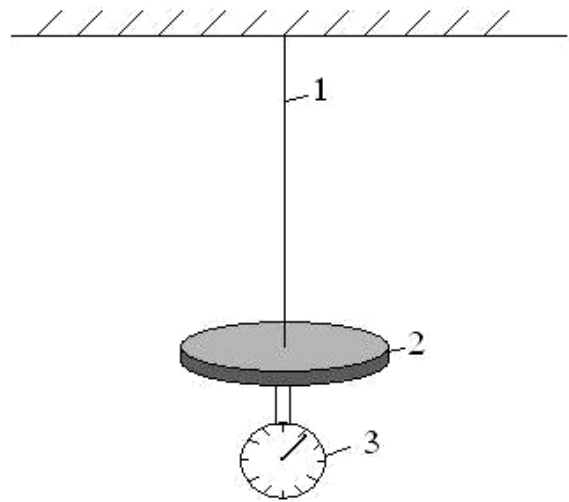


Рис. 2.1. Визначення модуля Юнга методом розтягу: 1 – сталевий дріт, 2 – платформа для тягарів, 3 – індикатор

- Зняти залежності подовження сталевго дроту від її навантаження при зростаючому та спадаючому навантаженні.
- Дані заносять до таблиці і обчислюють абсолютне подовження $\Delta \ell / P$ на 1 кг тягара, а потім знаходять середнє значення цієї величини, яке разом з іншими величинами використовується для визначення модуля Юнга по (1).
- За допомогою мікрометра в декількох місцях (не менш 5 вимірів) вимірюють діаметр досліджуваного зразка. Обчислюють середнє значення і довірчий інтервал. При вимірюванні діаметру необхідно зве трути увагу на те, щоб не згинати дріт мікрометром.
- Виміряти довжину дроту та знайти похибку її вимірювання.
- Відносну похибку модуля Юнга визначають за формулою:

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \ell_0}{\ell}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta \ell / P)}{(\Delta \ell / P)}\right)^2}.$$

Тут Δd і $\Delta(\Delta \ell / P)$ – довірливі інтервали, які знаходять, обробляючи їх прямі вимірювання, а $\Delta \ell_0$ – абсолютна похибка довжини зразка лінійкою.

Для полегшення розрахунків результати вимірювання можна заносити в таблицю:

m , кг	Навантаження					Розвантаження			
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
$\Delta \ell$, мм									
$\Delta \ell / P$, мм/Н									

б) Визначення модуля Юнга по деформації вигину

Якщо пружну пластинку чи трубу нерухомо закріпити одним кінцем у стіні, а інший кінець навантажити тягарем масою m , цей кінець буде опускатися, зразок вигибається. При вигині верхні шари розтягуються, нижні – стискаються, а середній шар, який називається нейтральним, зберігає свою довжину. Очевидно, що середня частина майже не чине опір вигину. Ця обставина враховується в техніці і знаходить відображення в природі. Наприклад, стержні, які працюють на вигиб, звичайно роблять порожніми, чим досягають економії матерії і полегшують конструкції без шкоди для міцності.

Переміщення λ , яке отримує вільний кінець стержня, називають стрілою прогину. Стріла прогину буде тим більша, чим більше навантаження і, крім того, вона повинна залежати від форми і розмірів пластини і її модуля пружності.

Для пластини, яка має довжину L , ширину a і висоту b , стріла прогину дорівнює $\lambda = \frac{4mgL^3}{Eab^3}$, де E – модуль Юнга, а mg – навантаження, яке прикладене до незакріпленого кінця.

Якщо пластина буде обома кінцями покладена на тверді опори і навантажена в середині вантажем масою m (рис. 2.2), то при розрахунку стріли прогину необхідно в формулу замість mg підставити $mg/2$, а замість L підставити $L/2$. Тобто пластина, яка опирається обома кінцями на опори, веде себе так, якби

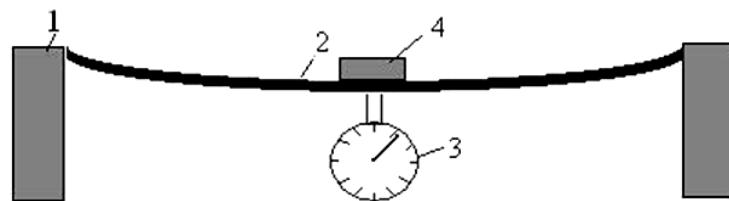


Рис. 2.2. Визначення модуля Юнга методом вигину: 1 – опори, 2 – пластина, 3 – індикатор, 4 – вантаж

вона була закріплена посередині, а на кожен з кінців діяла б сила, що дорівнює $P/2$. Отже, стріла прогину дорівнює $\lambda = \frac{mgL^3}{4Eab^3}$. З цієї формули знаходимо модуль Юнга для зразка у вигляді пластини

$$E = \frac{L^3}{4ab^3(\lambda/P)}. \quad (2)$$

Пристрій для визначення модуля Юнга методом вигину являє собою масивну платформу с двома стійками на кінцях, на які поміщують досліджуваній зразок. Посередині на спеціальній штанзі закріплюють індикатор для визначення стріли прогину.

Порядок виконання роботи:

1. Штангенциркулем декілька разів (не менш п'яти) вимірюють довжину, ширину і висоту пластини. Розраховують середнє значення і довірчий інтервал цих величин.
2. Пластину посередині навантажити і розвантажити послідовно тягарями 0,5 кг, 1,0 кг, 1,5 кг, 2,0 кг, 2,5 кг і кожен раз визначають стрілу прогину індикатором. Перевірити, чи повертається пластина в початковий стан.
3. Дані заносять до таблиці і визначають величину стріли прогину на одиницю ваги (λ/P) для кожного вимірювання, а потім розраховують середнє значення і довірчий інтервал.

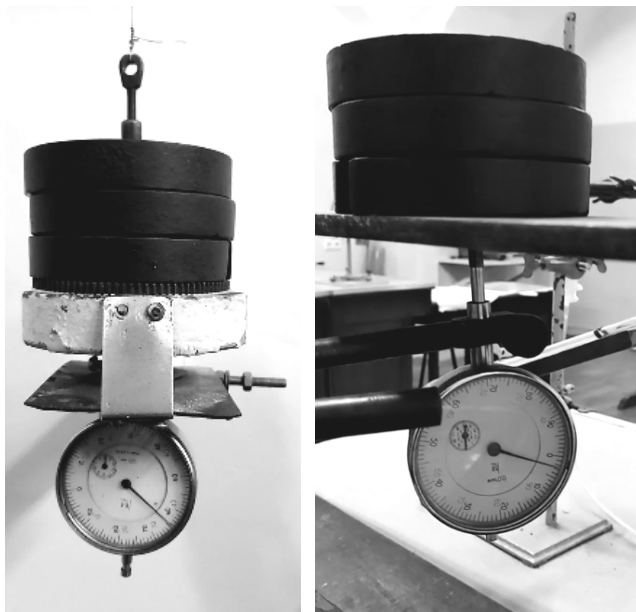
m , кг	Навантаження					Розвантаження			
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
λ , мм									
λ/P , мм/Н									

4. За формулою (2) обчислюють середнє значення модуля Юнга.
5. Відносну похибку модуля Юнга визначають по формулі:

$$\varepsilon_E = \sqrt{9\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + 9\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\lambda/P)}{(\lambda/P)}\right)^2}.$$

Варіанти для дистанційного виконання

Для виконання лабораторної роботи в дистанційній формі пропонується переглянути відео файл за посиланням.



№ варіанта	Вид деформації	Кількість вантажиків
1	Розтягнення	1,2,3,4,3,2,1
2	Вигин	2,3,4,5,3,2,1
3	Розтягнення	1,2,3,4,5,4,3,2,1
4	Вигин	3,4,5,4,3
5	Розтягнення	1,2,3,3,2,1
6	Вигин	2,3,4,4,3,2

Рис. 2.3. Приклади кадрів відеофайлів по деформації методом а) розтягнення та б) вигину

Так для визначення модуля Юнга по деформації розтягнення вибрана сталеві нитка довжиною $183,0 \pm 0,5$ см і діаметром $0,360 \pm 0,005$ мм.

На відео (рис. 2.3а) показано процес навантаження і розвантаження платформи, а також покази індикатора лінійного подовження. При визначенні показників індикатора (величини видовження нитки) треба розуміти, що один оберт стрілки відповідає подовженню в 1мм і складає 100 поділок на циферблаті. Отже одна поділка складає 0,01 мм.

Посилання наступне:

https://drive.google.com/file/d/1FF_E8RVvTyP8l0Co0-L3YpIOB6hQqKUY/view?usp=sharing

Для визначення модуля Юнга по деформації вигину вибрана сталеві планка довжиною $113,0 \pm 0,5$ см, шириною $8,0 \pm 0,1$ см та товщиною $7,0 \pm 0,1$ мм.

Посилання на відео файл наступне:

https://drive.google.com/file/d/171BOFifegPf3MPUd5LS4nDl1_JWDPTNp/view?usp=sharing

Контрольні питання та завдання:

1. Які основні види деформацій ви знаєте?
2. Чому сила пружності, яка виникає в при деформації тіла, направлена протилежно до зовнішньої сили?
3. Сформулюйте закон Гука. Коли він виконується?
4. Який фізичний зміст модуля Юнга? В яких одиницях він вимірюється?
5. Який механізм виникнення залишкової деформації?
6. Поясніть приказку «Рветься там, де тонко».
7. Чому труба і суцільний циліндр однакового діаметру і довжини витримують однакове навантаження на прогин?

Лабораторна робота № 2.2

Дослідна перевірка рівняння Бернуллі

Мета роботи. Перевірити дослідним шляхом рівняння Бернуллі за допомогою визначення витрати води.

Обладнання: лабораторна установка, мензурка, секундомір.

Аналіз картини стаціонарної ламінарної течії рідини дозволяє розбити її на досить тонкі трубки течії. Частинка рідини, що знаходиться в якійсь трубці, так і залишатиметься в ній протягом усього часу руху. Можна вважати, що швидкість частинок рідини однакова в поперечному перерізі трубки і направлена перпендикулярно до нормального перерізу трубки.

Масу рідини, що протікає через поперечний переріз трубки в одиницю часу, називають елементарною масовою витратою $dm = \rho v dS$, де dS – площа поперечного перерізу трубки, v – швидкість потоку рідини. Бічна поверхня трубки непроникна для частинок, тому виконується закон збереження маси в одиницю часу (**рівняння нерозривності**):

$$\rho_1 v_1 dS_1 = \rho_2 v_2 dS_2.$$

Якщо рідина нестислива, якою є, наприклад, при звичайних умовах вода, то густина рідини залишається постійною, тобто $\rho = \text{const}$ та $v_1 dS_1 = v_2 dS_2$. При цьому добуток $v dS$ виражає елементарну об'ємну витрату.

Таким чином, форма трубки визначає швидкість течії: швидкість зростає там, де трубки течії звужуються, і, навпаки, падає там, де вони розширюються.

Рівняння Бернуллі для стаціонарного перебігу стисливої рідини в трубці течії:

$$p + \rho gh + \rho v^2 / 2 = \text{const}.$$

Воно відіграє фундаментальну роль у всіх гідродинамічних дослідженнях. У рівнянні Бернуллі p – статичний тиск, тиск, що стискає частинку рідини; ρgh – гідростатичний тиск, тобто зміна тиску при зміні висоти на величину h ; $\rho v^2 / 2$ – називається динамічним тиском.

Рівняння Бернуллі є наслідком закону збереження енергії для частки рідини, що рухається вздовж трубки струму. Воно випливає з того, що робота сил тиску повинна дорівнювати збільшенню суми кінетичної та потенційної енергій частинки, адже сили тиску представляють зовнішні сили по відношенню до аналізованої частки.

Установка для дослідної перевірки рівняння Бернуллі є трубкою змінного перерізу. Від кожного перерізу відходять вертикальні манометричні трубки, які з'єднані між собою і заповнені частково ртуттю. Міліметрова лінійка дає мож-

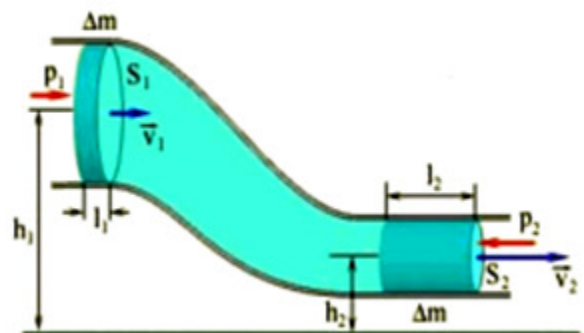


Рис. 2.4. Трубка течії

ливість відрахувати різницю рівнів рідини в обох вертикальних трубках (рис. 2.5).

Перевірка справедливості рівняння Бернуллі здійснюється шляхом порівняння об'ємної витрати води, визначеної за різницею тисків у перерізах труби S_1 та S_2 (рис. 2.5) (на основі рівняння Бернуллі) з об'ємною витратою води, виміряною при допомозі мензурки та секундоміра.

Нехай в перерізах швидкості стаціонарного руху води v_1 та v_2 , а статичні тиски – p_1 і p_2 . Тоді рівняння Бернуллі для горизонтальної трубки та умова нерозривності потоку запишеться:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad \text{та} \quad d_1^2 v_1 = d_2^2 v_2,$$

де d_1 і d_2 – діаметри трубок, ρ – густина рідини (води).

Спільний розв'язок цих рівнянь щодо v_2 :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \frac{d_2^4}{d_1^4}\right)}}. \quad (1)$$

Різниця тисків вимірюється ртутним манометром і дорівнює

$$p_1 - p_2 = (\rho_{Hg} - \rho) g \Delta h,$$

де ρ_{Hg} – густина ртуті, $\Delta h = H_2 - H_1$ – різниця висот стовпів ртуті у манометричних трубках.

Якщо в експериментальній установці $d_1^4 \gg d_2^4$, то формула (1) перетворюється в:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(\rho_{Hg} - \rho) g \Delta h}{\rho}}. \quad (2)$$

Об'ємна витрата води (об'єм води, який проходить через поперечний переріз за одну секунду) визначається за формулою

$$Q = \frac{V}{t} = S_2 v_2.$$

Тому швидкість потоку в вузькій трубці можна визначити і за формулою:

$$v'_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4V}{\pi d_2^2 t}. \quad (3)$$

Для перевірки справедливості рівняння Бернуллі достатньо порівняти величини розрахованих по формулам (1) – (3) швидкостей потоку чи відповідних об'ємних витрат.

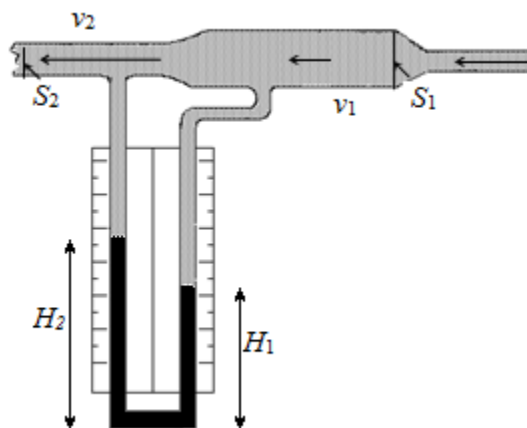


Рис. 2.5. Експериментальна установка

Для перевірки на можливість користуватися рівнянням Бернуллі необхідно користуватися числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \bar{v}_2 d_2}{\eta} \quad \text{або} \quad Re = \frac{4\rho Q}{\pi \eta d_2},$$

де $\bar{v}_2$ – середня швидкість течії в трубі, η – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини.

Течія рідини буде залигатися ламінарною при $Re < 2300$.

Вода поступає в установку з водопроводу через кран, а після установки зливається через трубку.

Порядок виконання роботи.

1. Поступово відкриваючи кран, встановити стаціонарну течію води в горизонтальній трубці установки. Визначити різницю тисків по ртутному манометру (фактично Δh).
2. Перенести кінець зливного шлангу в мензурку і одночасно ввімкнути секундомір. Визначити час t , за який наповниться мензурка об'ємом V . Дослід повторити тричі.
3. Змінити витрату рідини за допомогою крану (змінити різницю тисків) і повторити дослід. Експеримент повторити для 5 різних різниць тисків.
4. Виміряти внутрішні діаметри трубки d_1 і d_2 . В залежності від співвідношення діаметрів обчислити за формулою (1) чи (2) швидкості течії в вузькій частині труби.
5. Розрахувати швидкість течії по витраті рідини за формулою (3).
6. Побудувати на одному графіку залежності $v_2(\Delta h)$ і $v_2^{1/2}(\Delta h)$ і зробити висновок про можливість застосування рівняння Бернуллі для дослідженої течії.
7. Визначити число Рейнольдса для максимальної виміряної швидкості.

Варіанти для дистанційного виконання.

Для дистанційного виконання роботи пропонується використати відеофрагменти дослідів з 6 різними різницями тисків.

Дослід	Посилання
1	https://drive.google.com/file/d/1j9DvZvbXfXF0UosuPxisonjKnZuDUxcM/view?usp=sharing
2	https://drive.google.com/file/d/1gHC8eSSs1sUV4fANWbiMzoZoFXqkkyHz/view?usp=sharing
3	https://drive.google.com/file/d/1CU5CAc1pCFxV70ZPi3I4cL_5ob-epD89/view?usp=sharing
4	https://drive.google.com/file/d/1kdJNMTnR4mZ_8nm7xhChvd6w-isNrM8i/view?usp=sharing
5	https://drive.google.com/file/d/1IJeO9kdd6fWLehW9ZO-ChAYfDl5Bin1x/view?usp=sharing
6	https://drive.google.com/file/d/16fWxPbq8KbZ0lSoMuebZOq6wjWOO8oE_/view?usp=sharing

На кожному відео показано шкалу ртутного манометру з встановленою різницею рівнів і процес наповнювання мензурки водою через зливний шланг.

Діаметри внутрішніх перерізів трубки $d_2 = 5$ мм та $d_1 = 18$ мм. Об'єм мензурки до білої позначки складає $V = 1$ л.

Варіанти для виконання роботи

Варіант	1	2	3	4	5	6
Відеодосліди	1, 3, 5	2, 4, 6	1, 2, 3	4, 5, 6	1, 2, 5	3, 4, 6

Контрольні запитання:

1. Який рух називається стаціонарним? Що називають трубою течії?
2. Запишіть рівняння нерозривності рідини. Який його фізичний зміст? Які наслідки цього рівняння?
3. Запишіть рівняння Бернуллі і поясніть зміст членів, що входять до нього. Для якої рідини воно застосовується? Які наслідки впливають із рівняння?
4. Як влаштовані трубки Піто та Прандтля? Як за допомогою них виміряти швидкість потоку?

Лабораторна робота № 2.3

Визначення в'язкості рідини по методу Стокса

Мета роботи: з рівняння руху тіла сферичної форми в в'язкому середовищі визначити в'язкість рідини і порівняти її з дослідними даними.

Обладнання: циліндрична ємність з гліцерином, кульки скляні, мікрометр, лінійка, секундомір.

В даній роботі розглядається процес седиментації (осідання) частинок в полі сили тяжіння, що використовується, наприклад, для розшарування частинок різної густини в розчинах, суспензіях.

На тверду кульку, що падає у в'язкій рідині, діють три сили: сила тяжіння кульки F_T , виштовхувальна сила F_A , що визначається за законом Архімеда, і сила опору рухові кульки з боку рідини F_C , яка зумовлена внутрішнім тертям рідини.

Основну роль при її русі відіграє не тертя кульки об рідину, а взаємне тертя окремих шарів рідини. Найближчий до поверхні кульки шар рідини ніби прилипає до неї і рухається зі швидкістю ку-

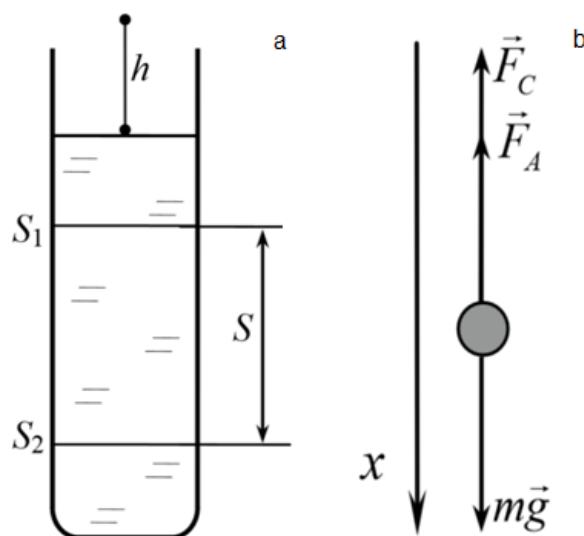


Рис. 2.6. а) Загальна схема експериментальної установки
б) Діючі на кульку сили

льки, інші шари – з дедалі меншою швидкістю.

Робота сил в'язкості залежить від розмірів поверхні вибраною елемента рідини і пропорційна величині $\eta v \ell^2$, а кінетична енергія цього ж елемента рідини залежить від його об'єму і пропорційна $\rho v^2 \ell^3$, де v – швидкість руху окремого шару рідини, ℓ – лінійні розміри елемента рідини, ρ – її густина, а η – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини. Тому відношення енергії елемента рідини до роботи сил в'язкості, тобто безрозмірна величина:

$$\text{Re} = \frac{\rho v \ell}{\eta}$$

характеризує відносну роль сил в'язкості і називається числом Рейнольдса (на ім'я англійського фізика О. Рейнольдса). Чим менше число Рейнольдса, тим більшу роль відіграють сили в'язкості в процесі руху рідини.

Коефіцієнт в'язкості η для різних рідин має різне значення і залежить від параметрів, які характеризують стан рідини, в першу чергу від її температури. Одиниці вимірювання коефіцієнту – кг/(м·с).

Якщо кулька падає в рідині, нескінченній у всіх напрямках, не залишаючи після себе ніяких завихрень, при малих значеннях числа Рейнольдса сила опору визначається законом Стокса:

$$F_C = 6\pi\eta v r,$$

де v – швидкість руху кульки; r – її радіус.

Запишемо рівняння руху кульки:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_C.$$

Усі три сили, що діють на кульку, яка рухається в рідині, напрямлені по вертикалі: сила тертя і виштовхувальна сила – вгору, сила тяжіння – вниз. Сила тертя зі збільшенням швидкості кульки зростає.

При певних швидкостях руху кульки алгебраїчна сума трьох сил дорівнює нулю (прискорення стане рівним нулю), тобто кулька рухається за інерцією з постійною швидкістю. Для цього випадку справедливе співвідношення

$$F_T - F_A - F_C = 0$$

або

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_p g + 6\pi r \eta v.$$

де ρ – густина кульки; ρ_p – густина рідини. Розв'язавши рівняння відносно коефіцієнта динамічної в'язкості, отримаємо

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_p}{v_s} g r^2 \quad \text{або} \quad \eta = \frac{1}{18} \frac{\rho - \rho_p}{v_s} g d^2. \quad (1)$$

Зрозуміло, що забезпечити рух кульки в нескінченному середовищі практично неможливо, оскільки розміри посудини, в якій знаходиться рідина, скінченні. Тому при визначенні швидкості седиментації потрібно враховувати наявність стінок посудини. У випадку, коли кулька рухається в рідині, що знахо-

диться в циліндричній посудині радіусом R , при врахуванні наявності стінок, коефіцієнт динамічної в'язкості можна визначати, як

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_p}{v_s (1 + 2.4r/R)} g r^2$$

Установка (рис. 2.6) для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості методом Стокса – це прозора циліндрична посудина, закріплена на штативі. Зверху посудина закрита кришкою з отвором, до якої прикріплений пристрій для виймання кульки. На стінці посудини нанесено дві мітки. Відстань між поверхнею рідини і верхньою міткою 10-12 см. Радіус кульки визначають за допомогою мікрометра; внутрішній радіус посудини – за допомогою штангенциркуля; відстань між другою верхньою і нижньою мітками на посудині – за допомогою мірної лінійки; час, за який кулька проходить відстань S між мітками, за допомогою електронного секундоміра.

Кульку перед потраплянням в рідину кидають з деякої висоти h вертикально з нульовою початковою швидкістю (рис. 2.6). В результаті взаємодії кульки з поверхнею рідини і поступового занурення в в'язку рідину його швидкість змінюється і стає рівною зі швидкістю седиментації. Для зменшення шляху, протягом якого відбувається досягнення швидкості седиментації, кульку кидають в рідину поблизу її поверхні.

Порядок виконання роботи

1. З допомогою мікрометра виміряти діаметр d п'яти скляних кульок, які на око близькі за розміром.
2. Опустити першу кульку в гліцерин практично біля поверхні гліцерину і визначити час її руху між мітками.
3. Досліди повторити з іншими кульками. Визначити середній час руху кульки і розрахувати його довірливий інтервал.
4. Визначити середню швидкість седиментації, розділивши відстань між мітками на середній час руху кульки $v_s = S / \bar{t}$.
5. Знайти середній діаметр кульки і розрахувати його довірливий інтервал.
6. Розрахувати коефіцієнт динамічної в'язкості рідини за формулою (1). В розрахунках прийняти для гліцерину $\rho_p = 1260 \text{ кг/м}^3$; для скла: $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$.
7. Розрахувати похибку експериментального вимірювання швидкості седиментації, вважаючи, що основними є похибки, пов'язані з вимірюванням відстані і часу падіння кульки і дорівнює

$$\varepsilon_\eta = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{\bar{t}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d}{\bar{d}}\right)^2}.$$

Примітка: При порівнянні отриманих результатів з табличним значенням коефіцієнту в'язкості гліцерину треба враховувати, що це значення сильно залежить від температури. Так при 20°C $\eta_{20^\circ\text{C}} = 1,500 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а при 25°C $\eta_{25^\circ\text{C}} = 0,945 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Також треба враховувати, що гліцерин – гігроскопічна рідина. Тобто здатна поглинати водяний пар з повітря. При цьому його в'язкість зменшується. Так при масовій частці води 5 % в гліцерині його в'язкість при 20 °С знижується до 0,545 Па·с, а при 25 °С до 0,335 Па·с.

В загальному випадку залежність динамічної в'язкості водно-гліцеринових розчинів в залежності від температури T і масової концентрації води C можна представити у вигляді:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{6674}{T}\right) \exp\left(-\left(0.653 - 1.6 \cdot 10^{-3} T\right) C\right).$$

Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується використати відеофрагменти дослідів для 4 скляних кульок.

Дослід	Посилання
1	https://drive.google.com/file/d/16BsKpqWfAd8YWMc9HDVPXo2jvSAa-lRp/view?usp=sharing
2	https://drive.google.com/file/d/1-joFQnfQSm0I9YiYJ3lnuLYe3D4WGRCX/view?usp=sharing
3	https://drive.google.com/file/d/1RRzvnO_44E27X6Oz-pkn88obQ9jRPeie/view?usp=sharing
4	https://drive.google.com/file/d/1nUlCZbxLIXwn7xFloCutYWGh3Aef5hkU/view?usp=sharing

На кожному з відео показана кулька з мікрометром для визначення її діаметру, а також процес опускання цієї ж кульки в трубі з гліцерином. Відстань між мітками складає $S = 27$ см.

Варіанти для виконання роботи

Варіант	1	2	3	4	5	6
Відеодосліди	1, 3	2, 3	1, 2	1, 4	3, 4	2, 4

Контрольні питання.

1. Які сили діють на рухаючі в в'язкому середовищі кульку? Як вони направлені, коли кулька рухається відносно вертикалі під певним кутом?
2. Чому виникають сили в'язкого тертя, що діють на кульку? Поясніть механізм дії цієї сили.
3. Від чого залежить сила в'язкого тертя? Чи діє сила тертя на пліт, що пливе по річці?
4. Що таке число Рейнольда? Його фізичний зміст. Як з допомогою нього визначити характер руху кульки?
5. Що таке коефіцієнт динамічної в'язкості? Який його фізичний зміст?
6. Чому в в'язкому середовищі згодом кулька рухається зі сталою швидкістю?

Лабораторна робота № 2.4

Визначення прискорення вільного падіння за допомогою фізичного маятника (метод Бесселя)

Мета роботи: вимірюючи періоди коливань фізичного маятника, визначити за допомогою формули Бесселя величину прискорення вільного падіння.

Обладнання: фізичний маятник, секундомір, лінійка, дерев'яна підставка.

Фізичний маятник – тверде тіло довільної форми, яке під дією сили тяжіння здійснює коливання навколо нерухомої горизонтальної осі, що не проходить через центр маси тіла.

Застосування фізичного маятника засноване на властивості зв'язаності *центру гойдання* і точки підвісу. Ця властивість полягає в тому, що у всякому фізичному маятнику можна знайти такі дві точки, що при послідовному підвішуванні маятника за ту або іншу з них період коливань його залишається одним і тим же. Відстань між цими точками визначає собою приведену довжину даного маятника.

Якщо амплітуда коливань маятника мала, то час одного простого коливання його, тобто період коливання, визначається формулою

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}},$$

де I – момент інерції маятника відносно вісі гойдання, m – маса маятника, a – відстань від центру мас маятника до вісі обертання.

Момент інерції – скалярна величина, що є мірою інертності для обертального руху аналогічно до маси для поступального руху. Момент інерції існує незалежно від того, обертається тіло чи ні, так само як і маса існує незалежно від того, рухається тіло чи ні.

Момент інерції системи тіл відносно вісі обертання $I = \sum_i m_i r_i^2$, де m_i – маси тіл, r_i – відстань тіла до вісі обертання.

Момент інерції суцільних тіл, що мають густину ρ , можна обчислити інтегруванням: $I = \int_V \rho r^2 dV$.

Момент інерції тіла залежить від вибору осі обертання. Але це не значить, що для всілякої нової осі момент інерції I необхідно обчислювати спочатку. Момент інерції твердого тіла I відносно осі, яка паралельна осі, що проходить через центр інерції тіла, дорівнює (теорема Гюйгенса-Штейнера):

$$I = I_0 + ma^2,$$

де I_0 – момент інерції тіла відносно вісі, що проходить через центр інерції тіла (центр тяжіння), m – маса твердого тіла, a – відстань між осями.

Для тіл неправильної форми момент інерції знаходять експериментально. В методі Бесселя цю величину виключають. Для цього розглядають коливання маятника відносно двох різних точок підвісу.

Період коливань маятника відносно двох точок підвісу рівні:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + ma_1^2}{mga_1}}, \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + ma_2^2}{mga_2}}.$$

Звідси маємо

$$T_1^2 ga_1 - T_2^2 ga_2 = 4\pi^2(a_1^2 - a_2^2).$$

Для величини прискорення з останньої формули після перетворень отримуюмо рівняння, дане Бесселем

$$g = \frac{8\pi^2 L}{T_1^2 + T_2^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(T_1^2 - T_2^2)L}{(T_1^2 + T_2^2)(a_1 - a_2)}}, \quad (1)$$

де $L = a_1 + a_2$ – приведена довжина.

Якщо періоди рівні між собою ($T_1 = T_2 = T$), рівняння прийме вигляд

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}. \quad (2)$$

Добитися повної рівності періодів нелегко. Формула Бесселя дозволяє додати просто і з найменшим ступенем точності визначити величину прискорення при наближеній рівності періодів коливань.

Нехай T_1 і T_2 близькі один до одного, а величини a_1 і a_2 сильно відрізняються одна від одної (одна чечевиця маятника порожниста, інша суцільна). В цьому випадку, як видно з формули, немає необхідності визначати величини a_1 і a_2 з великим ступенем точності (не точніше, ніж до 1 мм).

Фізичні маятники залежно від вимог мають саму різну форму. Вони зазвичай складаються з металевого стрижня завдовжки понад 1 м, на поверхні якого нанесені міліметрові поділки. По стрижню можуть пересуватися і закріплюватися в тому або іншому положенні важка і легка чечевиця (вантаж) і опорні призми. Різні комбінації чечевиць і їх положень на стрижні з опорними призмами дають різні типи фізичних маятників.

У цій роботі застосовується фізичний маятник, зображений на рис. 2.7. На металевому стрижні A опорні призми B жорстко закріплені і не переміщуються. Жорстко закріплена і чечевиця C , що знаходиться між ними. Друга чечевиця D знаходиться на кінці стрижня (не між призмами) і може переміщатися за шкалою з ноніусом і закріплюватися в потрібному положенні. Відстань між призмами зазвичай стала.

Процедура досліджень зазвичай наступна. Спершу визначають періоди коливань маятника

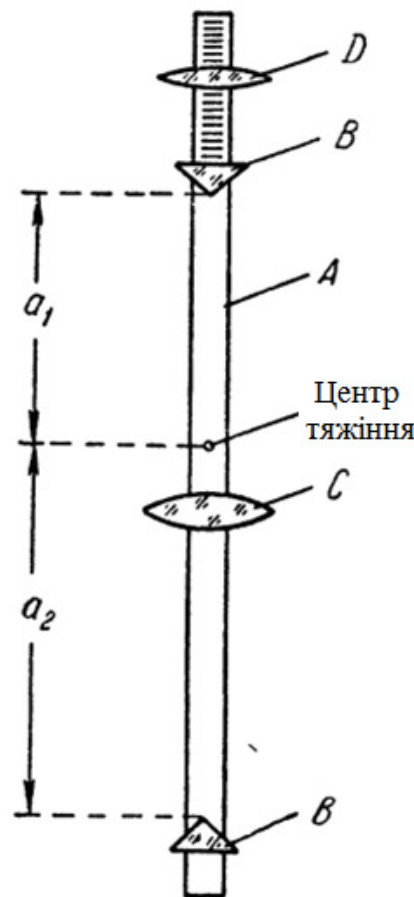


Рис. 2.7. Фізичний маятник

для різних положень чечевиці D на шкалі: в межах від 7 до 12 ділень (сантиметрів) основної шкали. У цьому інтервалі необхідно виміряти періоди через кожних 5 міліметрів, тобто отримати одинадцять значень періодів. Потім будуватиметься графік залежності періоду коливань від положення чечевиці на стрижні маятника, відкладаючи по осі абсцис ділення шкали, вказуючи положення чечевиці, а по осі ординат величину періоду коливань.

Після цього вісь обертання маятника змінюють, тобто примушують маятник коливатися на іншій опорній призмі. Знову, в тих же межах, з тим же числом вимірювань, абсолютно так само необхідно виміряти періоди коливань.

На тій же міліметровій отримані дані представляються у вигляді графіка. Точка перетину кривих визначає місцезнаходження рухомої чечевиці, яке дає найбільш близькі один до одного значення періодів.

В даній роботі пропонується спростити порядок дій.

Порядок виконання роботи

1. Визначити періоди коливань T_1 і T_2 (у прямому і перевернутому положенні маятника) з найбільшою ретельністю. Для цього визначити час 200 коливань маятника не менше трьох разів, звідки обчислити період коливань. Абсолютно так само поступають і при визначенні другого періоду (перевернутий маятник).

Увага. Виконання роботи вимагає уваги і ретельності. Недопустимі коливання маятника з кутом відхилення більше, ніж 4° . Адже формули для періоду коливань справедливі для малих коливань.

2. Для визначення величин a_1 і a_2 маятник зняти з консолі і обережно покласти його стрижнем на спеціальну підставку. На підставці, яка має гостру грань, маятник необхідно зрівноважити. Відстані від центру тяжіння маятника до опорних призм дають величини a_1 і a_2 . Вимірювання їх проводяться масштабною лінійкою з точністю до міліметра.

Увага. Уважно стежте за відповідністю періоду коливань T_1 та величини a_1 , періоду T_2 та величини a_2 .

3. За отриманими даними, користуючись формулою Бесселя, визначити величину прискорення сили тяжіння.

Варіанти для дистанційного виконання.

Для дистанційного виконання роботи пропонується використати відеофрагменти дослідів.

Дослід	Посилання
1 положення маятника	https://drive.google.com/file/d/1OD96G9wlaUufAbrQ_2aUaTXGyCYUUZqM/view?usp=sharing
2 положення маятника	https://drive.google.com/file/d/1sY6W0ASjA1K3u0VdkVbDDhrKAAPg5itv/view?usp=sharing
визначення центру тяжіння маятника	https://drive.google.com/file/d/1k8Naz6cw4TWPYfo9XpoIpxJ6PiwIfc1b/view?usp=sharing

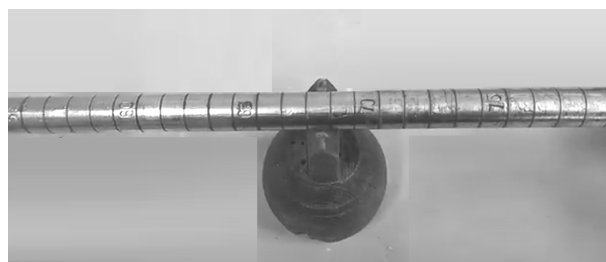
На відео представлено коливання одного і того ж маятника відносно двох точок. В першому положенні опорна призма B взята між чечевицями, а в другому положенні – поза ними.

Металевий циліндричний стрижень має на собі сантиметрові поділки, що полегшують визначення довжин a_1 та a_2 .

В кожному з варіантів пропонується визначити час вказаної кількості коливань. Період коливань для подальших розрахунків взяти як середнє значення між обчисленими величинами. Для точного обчислення часу можна використувати вбудований лічильник часу відеопрогравача. Тим більш, що деякі з них мають можливість показувати і частки секунд. В цьому випадку достатньо розраховувати час невеликої кількості повних коливань.



Рис. 2.8. Перше та друге положення фізичного маятника



Стрижень з сантиметровими поділками

№ варіанта	Кількість коливань
1	10, 15, 20
2	11, 16, 21
3	12, 17, 22
4	13, 18, 23
5	14, 19, 24
6	15, 20, 25

Контрольні запитання

1. Яка будова фізичного маятника?
2. Що називається періодом коливання і в яких одиницях він вимірюється?
3. Від чого залежить період коливання фізичного маятника?
4. Візьміть аркуш паперу. Зробіть ручкою (олівцем) отвір в будь-якій точці аркушу. Це точка, через яку проходить вісь обертання. Намалюйте відрізок з довжиною a , що входить в формулу для періоду коливань.
5. В яких одиницях вимірюється прискорення вільного падіння? Як воно залежить від географічної широти та висоти над рівнем моря?

Лабораторна робота № 2.5

Визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом резонансу

Мета роботи: ознайомитися з умовами виникнення резонансу в повітрі і визначити швидкість звуку.

Обладнання: кварцова труба, динамік, звуковий камертон, насос, лінійка.

Хвиля – процес поширення коливань у суцільному середовищі. При поширенні хвилі частки середовища коливаються біля своїх рівноважних положень. Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передається стан коливального руху та його енергія, і тому основна властивість усіх хвиль, незалежно від їхньої природи, – перенос енергії без переносу речовини.

Рівняння звукової хвилі представляється у вигляді

$$s = a \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

де s – зміщення величини, що коливається, a – амплітуда (максимальне зміщення), $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число, φ_0 – початкова фаза.

При поширенні звукової хвилі в газах відбувається багаторазове стиснення та розширення газу (змінюється **густина** ρ). Це приводить до підвищення або зменшення його температури (і **тиску** p) у місцях розширення або стиснення. Оскільки ці процеси відбуваються з великою частотою, то температура газу не встигає вирівнюватися.

Отже, з точки зору термодинаміки, процес поширення звуку в газах можна вважати адіабатичним. На основі цього уявлення Лаплас вивів формулу для розрахунку швидкості поширення звуку в газах

$$u = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (1)$$

де $\gamma = C_p/C_v$ – показник адіабати (для повітря $\gamma = 1,4$), $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала; T – термодинамічна температура газу; M – його молекулярна маса (для повітря $M = 0,029$ кг/моль).

Між швидкістю звуку u , його частотою ν та довжиною звукової хвилі λ існує співвідношення:

$$u = \lambda \nu. \quad (2)$$

Частоту звуку в лабораторних умовах знаходять за частотою коливань джерела звуку. Довжину звукової хвилі в повітрі визначають як відстань між двома послідовними точками, що коливаються в однакових фазах. Отже, завдання обчислення швидкості звуку в повітрі зводиться до експериментального визначення положення двох точок, які перебувають одна від одної на відстані λ . Цю експериментальну задачу можна розв'язати методом резонансу (методом стоячих хвиль).

Стоячі хвилі виникають в результаті складення двох зустрічних плоских хвиль з однаковими амплітудами та частотами. Для виникнення стоячих хвиль необхідно, щоб різниця фаз між ними була сталою (рис. 2.8а). При цьому виникає акустичний **резонанс** – різке збільшення амплітуди вимушених коливань у коливальній системі при збігу частоти зовнішньої сили з частотою власних ко-

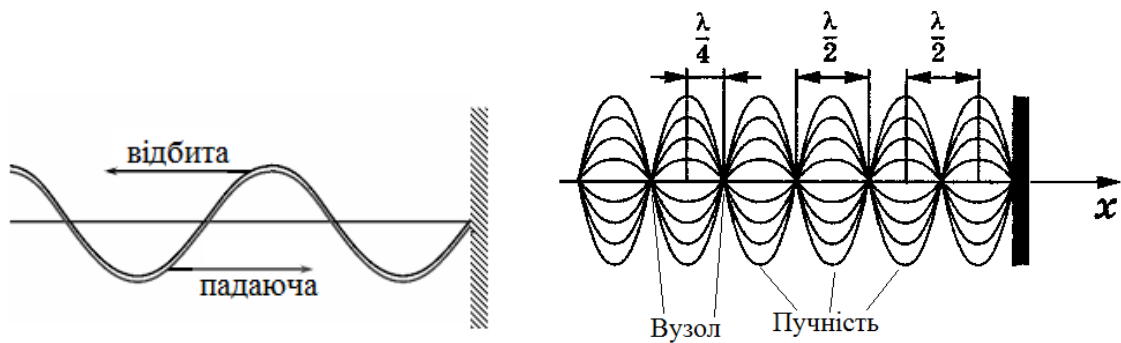


Рис. 2.8. а) Падаюча та відбита хвиля на границі з більш щільним середовищем у випадку утворення стоячої хвилі
б) Коливання стоячої хвилі

ливань. У разі акустичного резонансу коливання стовпа повітря в трубці досягає максимальної амплітуди.

Якщо середовище, від якого відображається хвиля, більш густіше, ніж середовище, в якому вона розповсюджується, то на межі розподілу виникає вузол, а якщо навпаки, то пучність. Утворення вузла пов'язане з тим, що хвиля, відбиваючись від щільнішого середовища, змінює фазу на протилежну і на границі середовищ відбувається накладання коливань із протилежними фазами, в результаті чого виходить вузол. Саме цей випадок спостерігається в роботі, де звукова хвиля розповсюджується в повітрі і відбивається від поверхні води.

Метод визначення швидкості звуку базується на властивості звукової стоячої хвилі. Вона характеризується точками, коливання в яких відсутні (рис.2.8b) (**вузлами**), і точками, амплітуда коливань в яких максимальна (**пучностями**). Коливання всіх точок стоячої хвилі, які лежать між двома сусідніми вузлами, відбуваються з різними амплітудами, але з однаковими фазами. Віддаль між сусідніми вузлами або пучностями називається довжиною стоячої хвилі.

Нехай рівняння прямої та зворотної хвиль, які розповсюджуються вздовж осі x мають вигляд

$$s_1 = a \cos(\omega t - kx), \quad s_2 = a \cos(\omega t + kx),$$

де s_1, s_2 – зміщення; a – амплітуда коливань.

В результаті їх складення маємо рівняння для стоячої хвилі

$$s = s_1 + s_2 = 2a \cos kx \cos \omega t = A \cos \omega t,$$

де $A = 2a \cos kx$ – амплітуда стоячої хвилі. Вона залежить від координати x , що визначає положення точок середовища. Оскільки $\cos kx$ може набувати значень від 0 до 1 (від'ємні значення тут не мають фізичного змісту), то амплітуда різних точок може змінюватися від 0 до $2a$. В точках хвилі, що мають найбільші амплітуди (пучності стоячої хвилі) $A = 2a$ справедливо:

$$|\cos kx| = 1, \text{ або } kx = \pm n\pi, \frac{2\pi}{\lambda} = n\pi, \quad x = \pm n \frac{\lambda}{2}.$$

В точках, де амплітуди дорівнюють нулю (вузлах стоячої хвилі) виконується умова:

$$\cos(kx) = 0 \text{ або } 2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm(2n+1)\frac{\pi}{2}, \text{ звідки } x = \pm(2n+1)\frac{\lambda}{4}.$$

Відстань як між сусідніми пучностями, так і між сусідніми вузлами знайдемо як різницю координат. Наприклад, для двох сусідніх пучностей маємо

$$x_{k+1} - x_k = (k+1)\frac{\lambda}{2} - k\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}.$$

Відстань від вузла до найближчої пучності дорівнює чверті довжини хвилі:

$$(2k+1)\frac{\lambda}{4} - k\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{4}.$$

Вузли утворюються в тих місцях, в яких коливання в обох хвилях весь час здійснюються в протилежних фазах. Так як стояча хвиля нерухома, то не переносить енергію.

Для визначення швидкості звуку в повітрі можна використовувати установку, яка має два варіанти реалізації (рис.2.9).

Установка 1. Використання камертону. Звукову хвилю заданої частоти (вказана на камертоні) можна визвати, ударяючи молоточком по ніжкам камертона. Для цього камертон (рис. 2.9а) розмішують над стовпом повітря в трубі і, піднімаючи або опускаючи посудину 1, змінюють висоту стовпа повітря в трубі та встановлюють по лінійці, при яких положеннях рівня води спостерігається максимум гучності звукової хвилі.

Установка 2. Використання звукового генератора. На генераторі встановлюють певну частоту і невеличкий динамік посиляє звукову хвилю в повітряний стовп. Рівень води в трубі змінюється за допомогою ручного повітряного насоса, що накачує повітря в буферну ємність і надлишковим тиском витісняє воду в трубу. Після накачування води практично до самого верху труби, роботу насоса припиняємо і вода починає повільно опускатися.

Якщо при деякій висоті стовпа повітря спостерігається максимум гучності, то це означає, що стовп повітря знаходиться з коливаннями камертону в резонансі. Резонанс відбувається лише при умові, що частота звуку співпадає з вла-

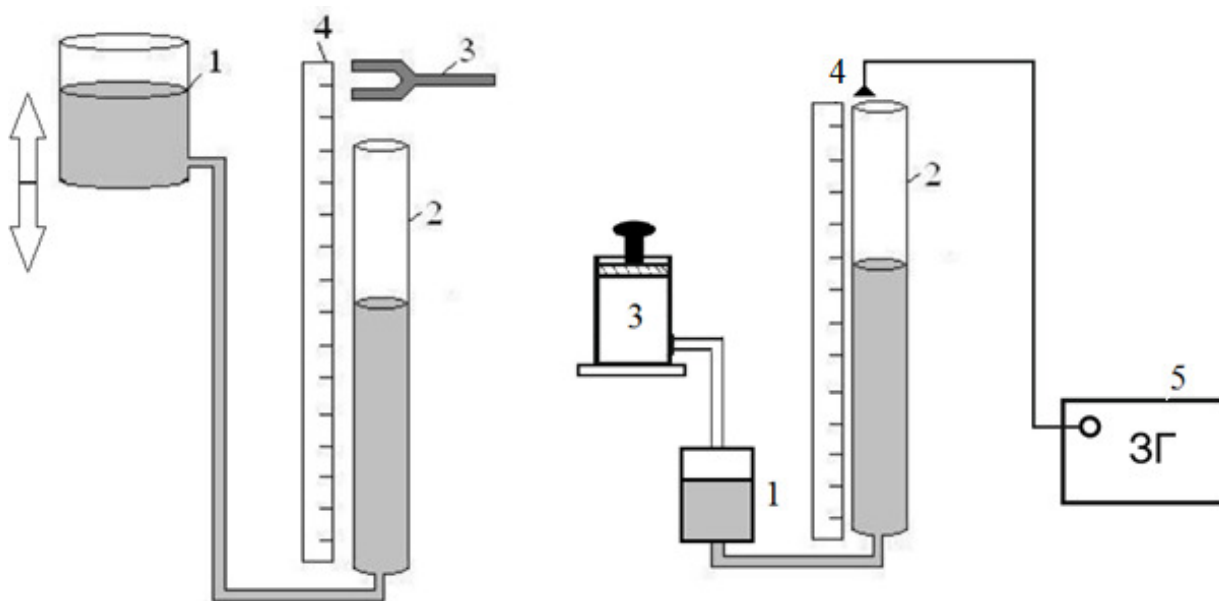


Рис. 2.9. Установка для визначення швидкості звуку методом резонансу:

а) 1 – посудина, 2 – труба, 3 – камертон, 4 – лінійка

б) 1 – посудина, 2 – труба, 3 – насос, 4 – динамік, 5 – звуковий генератор

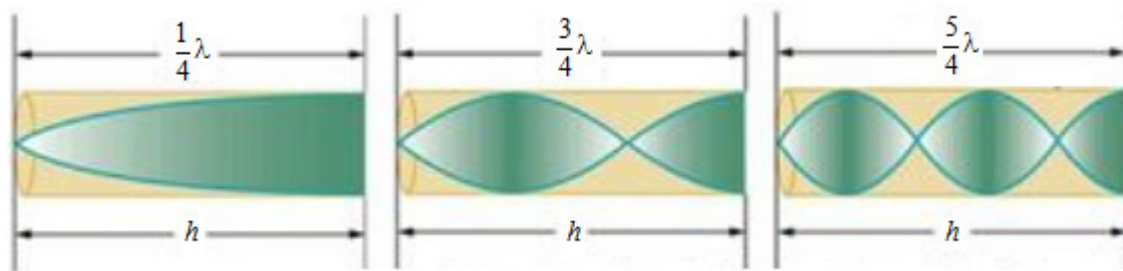


Рис. 2.10. Вигляд стоячої хвилі при різних співвідношеннях довжини повітряного стовпа і довжини хвилі

сною частотою повітряного стовпа. Довжина стовпа повітря при резонансі повинна дорівнювати непарному числу чверті звукової хвилі, яка йде від камертона. Тобто при резонансі висота повітряного стовпа може дорівнювати

$$h = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \dots \quad (3)$$

Це пояснюється тим, що при резонансі в повітряному стовпі виникає стояча хвиля, вузол якої знаходиться біля нижчого кінця повітряного стовпа (на поверхні води), а пучність – біля відкритого кінця труби, де ми розміщуємо камертон.

З огляду на те, що положення динаміку чи камертону не розташовані повністю на зрізі труби при визначенні довжини хвилі по (3) можуть виникати значні похибки, особливо при використанні $h_1 = \lambda / 4$, де похибка в 1 см є суттєвою. Тому краще знаходити положення рівня води (h_1, h_2, h_3 і т. д.), при яких спостерігається резонанс, а для розрахунку довжини хвилі використовувати співвідношення:

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}\lambda, \quad h_3 - h_2 = \frac{1}{2}\lambda, \dots \quad (4)$$

Таким чином, вимірюючи висоту стовпа повітря, при яких спостерігається резонанс, можна визначити довжину звукової хвилі.

Порядок виконання роботи

Установка 1

1. Вдарити молоточком по ніжкам камертона і піднести його до відкритого кінця труби, заповненої водою. Опустити баластну посудину, збільшуючи тим самим висоту повітряного стовпа.
2. По лінійці помітити ті поділки, де спостерігається максимум гучності звука (резонанс). Визначити висоту h_1 повітряного стовпа, при якому спостерігається перший резонанс. Дослід повторити 3-5 раз. Продовжуючи опускати баластний посуд, знайти висоти повітряного стовпа, при яких спостерігається другий і третій максимуми звучання.
3. Розрахувати довжини хвилі по формулам $\lambda = 4h_1$, $\lambda = 4h_2 / 3$ та $\lambda = 4h_3 / 5$. Знайти середнє значення довжини хвилі по результатам спостереження резонансу при різних висотах повітряного стовпа.
4. Розрахувати швидкість звуку по формулі $u = \lambda \cdot \nu$, де ν – частота коливань, подвоєне значення якої вказане на камертоні.

5. Порівняти її зі значенням, отриманого по формулі (1).
6. Визначити абсолютну та відносну похибку експерименту за формулами:

$$\Delta u = 2v\Delta h, \quad \varepsilon_u = \Delta u/u,$$

де $\Delta h = 1$ см.

Установка 2

1. Поставити на генераторі задану частоту та ввімкнути звуковий генератор. Гучність роботи поставити на середній рівень. За допомогою насоса підняти воду до рівня, що лежить нижче на 10 см за зріз труби. Зупинити працювати насосом. Вода почне опускатися.
2. По лінійці помітити ті поділки (h_1, h_2, h_3 і т.д), де спостерігається максимум гучності звуку (резонанс). Дослід повторити 3 рази.
3. Повторити дослід при іншій частоті звуку.
4. Визначити відстані між знайденими поділками ($h_2 - h_1, h_3 - h_2$ і т. д,) та її середнє значення. По формулі (4) розрахувати довжину хвилі, по формулі (2) – швидкість звуку.
5. Порівняти її зі значенням, отриманого по формулі (1).
6. Визначити абсолютну та відносну похибку експерименту за формулами:

$$\Delta u = 2v\Delta h, \quad \varepsilon_u = \Delta u/u,$$

де $\Delta h = 1$ см.

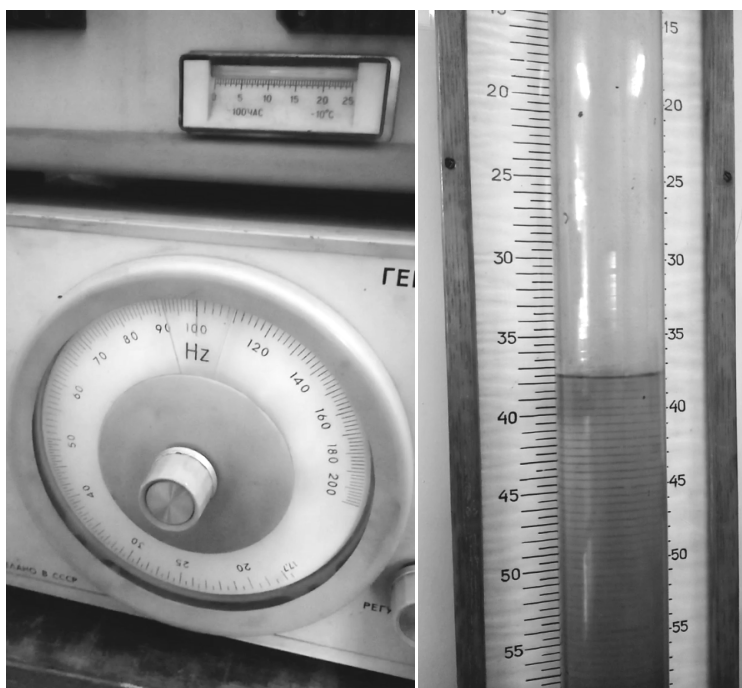
Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується використати відеофрагменти дослідів.

Дослід	Посилання
800 Гц	https://drive.google.com/file/d/1fGQv6RUBLS9_BaU_fDgKO4wr19q3K0kk/view?usp=sharing
1000 Гц	https://drive.google.com/file/d/1tdb118LJ-7sOeHk121Wvq0DyrpZH78Vp/view?usp=sharing
1200 Гц	https://drive.google.com/file/d/1BTUN-8kShUzdxtVMZUBEwglwz7KqdLu/view?usp=sharing
1400 Гц	https://drive.google.com/file/d/1dm5L5NpVt6PrVOlcogVIp0fSQtxkPyQK/view?usp=sharing

На відео представлено опускання рівня води при працюючому звуковому генераторі. Частоту звуку визначаємо по показам циферблату звукового генератора (на початку відео), які потрібно помножити на 10 (рис. 2.11).

В кожному з дослідів пропонується визначити положення рівня води, коли спостерігається підвищення гучності звуку: 3-4 положення. Необхідно визначити відстані між ними та її середнє значення. По формулі (4) розрахувати довжину хвилі. По формулі (2) розрахувати швидкість звуку. Порівняти її зі значенням, отриманого по формулі (1).



№ варіанта	Частоти, Гц
1	800; 1200
2	1000; 1400
3	800; 1400
4	1000; 1200
5	800; 1000
6	1200; 1400

Рис. 2.11. Циферблат звукового генератора та труба з сантиметровою шкалою

Контрольні питання

1. Що таке хвиля? Які хвилі називаються поздовжніми? Які поперечними?
2. Поясніть характеристики звукової хвилі: довжина, частота, амплітуда.
3. Чому процес поширення звуку в повітрі вважають адіабатичним?
4. Як залежить швидкість поширення звуку в повітрі від температури?
5. Яку хвилю називають стоячою і як вона виникає?
6. Які основні умови для спостереження звукового резонансу?
7. При якій довжині повітряного стовпа спостерігається максимум гучності звучання і чому?

Лабораторна робота № 2.6

Експериментальне визначення відношення питомих теплоємностей C_p/C_v для повітря за методом Клемана-Дезорма

Мета роботи: зрозуміти газові закони та перший закон термодинаміки, ознайомитися з методами визначення відношення теплоємності газу при сталому тиску до його теплоємності при сталому об'ємі, виміряти відношення теплоємностей для повітря.

Обладнання: балон з повітрям, водяний манометр, ручний насос.

Теплоємністю тіла називають кількість тепла, яку треба надати йому чи відібрати для зміни температури тіла на один градус:

$$C = dQ/dT.$$

Розглядають питому c та молярну C_μ теплоємності, які характеризують вже не тіло, а речовину, з якої складається тіло. **Молярна** C_μ теплоємність (теплоємність одного моля):

$$C_\mu = \frac{\mu}{m} \frac{\delta Q}{dT}.$$

Питома c теплоємність (теплоємність одиниці маси):

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}.$$

Зв'язок між молярною C_μ і питомою c теплоємностями: $C_\mu = \mu c$.

Перший закон термодинаміки: отримане тілом тепло dQ витрачається не тільки на збільшення внутрішньої енергії dU , а й на виконання тілом роботи dA :

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (1)$$

Тому, залежно від того, здійснюється чи ні робота при нагріванні тіла, до нього треба підвести більшу чи меншу кількість тепла для однієї й тієї ж зміни його внутрішньої енергії (температури). Таким чином, теплоємність визначається не тільки властивостями речовини, але залежить також від умов нагрівання тіл та є функцією процесу.

Для **твердих та рідких** тіл робота, яка пропорційна зміні об'єму dV тіла при його нагріванні $dA = pdV$, настільки мала, що нею можна знехтувати, тому теплоємність цих тіл в різних процесах практично однакова. Це пов'язано з тим, що такі тіла мають малі значення температурного коефіцієнту розширення.

Для **газів** залежність величини теплоємності від виду процесу виявляється суттєвою. Якщо нагрівання газу відбувається без здійснення роботи, тобто при сталому об'ємі, то відповідна цьому процесу теплоємність має назву **теплоємності при сталому об'ємі** C_v та, так як в даному випадку $dA = 0$ та $dQ = dU$, дорівнює:

$$C_v = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_v = \left(\frac{dU}{dT} \right)_v,$$

а зміна внутрішньої енергії газу $dU = C_v dT$.

Якщо при нагріванні на dT газ здійснює роботу, то для тієї ж зміни внутрішньої енергії треба затратити тепло, більше на величину цієї роботи. З урахуванням виразів для dA та dU перший закон термодинаміки (1) треба записати таким чином:

$$\delta Q = C_v dT + pdV. \quad (2)$$

Зокрема, при нагріванні зі здійсненням роботи тиск може залишитись сталим. Теплоємність такого процесу має назву теплоємності при сталому тиску C_p згідно рівняння Майєра:

$$C_p = C_v + R.$$

Враховуючи, що внутрішня енергія молю ідеального газу, $U = \frac{i}{2} RT$ де i – число ступенів свободи, запишемо: $C_v = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R$ та $C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2} R$.

Для опису адіабатичного процесу, а також для великої кількості інших процесів, суттєве значення має відношення $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, яке іноді **називають кое-**

фіцієнтом Пуассона. Очевидно, що для газів $\gamma = \frac{i+2}{i}$. Таким чином, це відношення може бути знайдено шляхом розрахунку, якщо відомо **число ступенів свободи** i молекули даного газу (кількість незалежних змінних, які потрібно для описання руху молекули). Для одноатомних газів $i = 3$, звідки $\gamma = \frac{3+2}{3} = 1.67$, а

для двоатомних (N_2, O_2) – $i = 5$ та $\gamma = \frac{5+2}{5} = 1.4$.

Для експериментального визначення γ можна використати рівняння адіабатичного процесу $pV^\gamma = const$.

В методі Клемана-Дезорма (рис. 2.12а) використовують балон, з'єднаний трубкою з водяним манометром та іншою трубкою з краном, який з'єднує балон об'ємом V з оточуючим повітрям. Цю трубку використовують для накопичення у балоні повітря за допомогою ручного насоса та для випуску надлишку повітря. В методі газ послідовно проходить крізь три стани, які характеризуються такими параметрами (p_1, V_1, T_1) , (p_0, V, T_2) , (p_2, V, T_1) . Один із процесів є адіабатичним.

До балону при закритому крані накачують повітря. Надмірний тиск можна

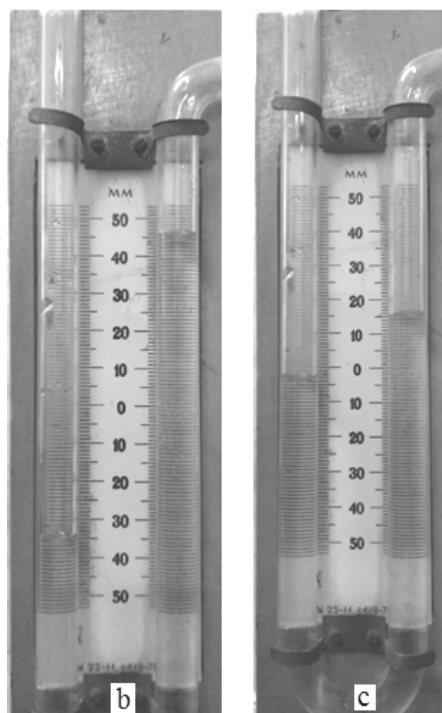
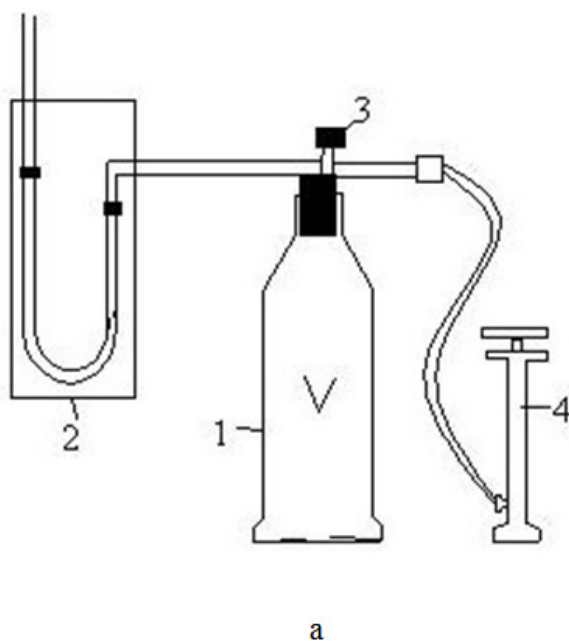


Рис. 2.12. а) Установка для визначення відношення питомих теплоємностей для повітря: 1 – балон з повітрям, 2 – водяний манометр, 3 – кран, 4 – насос. б) та в) Приклади вигляду манометрів в першому та останньому положеннях

визначити за допомогою відкритого манометру. Так як повітря, що стискається під поршнем насосу, нагрівається, то треба зачекати, поки внаслідок теплообміну температура його зрівняється з температурою оточуючого середовища T_1 . При цьому тиск повітря p_1 в балоні визначається за встановленою різницею рівнів рідини в манометрі (рис. 2.12b).

Відкривши швидко кран, ми даємо повітрю можливість швидко виходити з балону, поки тиск у ньому не зрівняється з зовнішнім, атмосферним p_0 , після чого кран знову закриваємо. Зрозуміло, що маса газу, яка тепер заповнює об'єм V балону, займала перед відкриттям крану менший об'єм V_1 , який був лише частиною повного об'єму V . Процес розширення газу можна вважати адіабатичним, так як він відбувається настільки швидко, що помітного теплообміну між газом та стінками балону не здійснюється. Тому повинно виконуватися рівняння адіабати:

$$p_1 V_1^\gamma = p_0 V^\gamma \quad (3)$$

До моменту закриття крану тиск усередині та зовні об'єму зрівнялись, але газ в балоні охолонув внаслідок адіабатичного процесу. Якщо зачекати, поки газ, завдяки теплообміну, нагріється до початкової температури кімнати, то тиск у балоні підвищиться до якоїсь величини p_2 , що можна відстежити за показами манометру (рис. 2.12c). Порівнюючи цей останній стан маси газу, який залишився у балоні (p_2 , V , T_1), з початковим, перед відкриттям крану (p_1 , V_1 , T_1), ми побачимо, що обидва стани спостерігаються при сталій температурі і тому в даному випадку можна використати закон Бойля-Маріотта

$$p_1 V_1 = p_2 V. \quad (4)$$

З (3) та (4) можна виключити об'єми, які не змінюються. Для цього треба піднести рівняння (4) до степені γ та почленно поділити на рівняння (3).

$$\frac{p_1^\gamma V_1^\gamma}{p_1 V_1} = \frac{p_2^\gamma V^\gamma}{p_2 V} \quad \text{або} \quad \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^\gamma = \frac{p_1}{p_2}.$$

З останнього рівняння величина γ може бути знайдена шляхом логарифмування:

$$\gamma = \frac{\ln p_1 - \ln p_0}{\ln p_1 - \ln p_2}$$

Так як практично тиски p_2 , p_1 та p_0 мало відрізняються між собою, то різниці логарифмів можна замінити різницями відповідних чисел: $\gamma = \frac{p_1 - p_0}{p_1 - p_2}$.

Різниця рівнів рідини у трубках манометру h показує, на скільки тиск у посудині більше атмосферного, тобто $p_1 = p_0 + \rho g h_1$, $p_2 = p_0 + \rho g h_2$. Тому робоча формула для визначення γ має вигляд:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}, \quad (5)$$

де h_1 – різниця між рівнями рідини в першому стані, h_2 – в останньому.

Порядок виконання роботи

1. Накачати у балон небагато повітря, дати йому набути температури оточуючого середовища, що буде видно вже по встановленій різниці рівнів h_1 рідини у манометрі. Записати цю різницю.
2. Відкрити кран, швидко випустити таку кількість повітря, щоб тиск у балоні дорівнював атмосферному (відсутність різниці рівнів) та закрити кран (після припинення шуму випускання повітря).
3. Спостерігаючи за манометром, зачекати, поки різниця рівнів h_2 не перестане збільшуватись. Записати цю різницю рівнів.
4. Повторити операції (1)-(3) 5 разів та розрахувати значень γ за формулою (5). Дані зручно записувати у таблицю.
5. Розрахуйте середнє значення $\langle\gamma\rangle$ та відхилення кожного значення від середнього $\Delta\gamma = \gamma_i - \langle\gamma\rangle$, записати у таблицю.

n	h_1	h_2	$h_1 - h_2$	γ_i	$\Delta\gamma_i$
1					
2					
3					
4					
5					
$\langle\gamma\rangle = \frac{\sum \gamma_i}{5} =$					

6. Довірливий інтервал розраховується за формулою: $\Delta\gamma = t_\alpha^n \sqrt{\frac{\sum (\Delta\gamma_i)^2}{n(n-1)}}$, де t_α^n – коефіцієнт Стюдента для n вимірювань (коефіцієнт надійності виберіть $\alpha = 0,95$).
7. Порівняйте отриманий результат $\langle\gamma\rangle$ з табличним γ_{tab} та порівняйте цю різницю з розрахованою похибкою $\Delta\gamma$.

Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується використати фото дослідів. На кожній парі фото є зображення манометру в першій та останній стадії досліду для вимірювання величин h_1 та h_2 . З огляду на те, що меніск (межа води і повітря в трубці манометру) є округлим, то при визначенні різниці положень верхнього та нижнього менісків треба орієнтуватися на одні і ті ж самі точки (край чи нижня точка).

Варіанти для самостійної роботи представлені в таблиці справа.

При виконанні потрібно заповнити таблицю (див. порядок виконання роботи).

Варіант	Досліди
1	1, 3, 5
2	2, 4, 6
3	3, 5, 6
4	1, 2, 4
5	2, 4, 5
6	1, 3, 6

Посилання на фотоматеріали

Дос- лід		Посилання
1	h_1	https://drive.google.com/file/d/16qFIBkHpRkBJ-63CZ6ufdXkY-QwnJ77q/view?usp=sharing
	h_2	https://drive.google.com/file/d/1hGka4GtUt11ZqZbflr0uLgKuzX7QSi/view?usp=sharing
2	h_1	https://drive.google.com/file/d/1yFx29-VJ62FREB_-1mFjeCwUwGKFrjWz/view?usp=sharing
	h_2	https://drive.google.com/file/d/1uDoV8jNhBiILe6vy32eiSpqC4jRjZug9/view?usp=sharing
3	h_1	https://drive.google.com/file/d/1savbbispmyyhavj0hzUytGuM3ISHsfCM/view?usp=sharing
	h_2	https://drive.google.com/file/d/1VciWj628tTiwdla48SVn1YmU1KRkyJw_/view?usp=sharing
4	h_1	https://drive.google.com/file/d/1eKa7t64_J0fVJO7KP7mUMQOXX3RL7ud3/view?usp=sharing
	h_2	https://drive.google.com/file/d/12j8wn-MYhNBO2ydSXJQEkNEdKZls56G5/view?usp=sharing
5	h_1	https://drive.google.com/file/d/1AoJ0YOU7eOAN8Equjc2yoIFvgLWrE2kH/view?usp=sharing
	h_2	https://drive.google.com/file/d/1Wgiegg5wh0VGinNLn8X3EZvkdh009iqv/view?usp=sharing
6	h_1	https://drive.google.com/file/d/16RnQtKy68WRHkgByjxDtF0hw6bCN0TOa/view?usp=sharing
	h_2	https://drive.google.com/file/d/1o0z36_gpCWjA-0rY0B9fm6rpMZvOBgLy/view?usp=sharing

Переглянути процедуру виконання роботи можна за посиланням:

<https://drive.google.com/file/d/1OYYdJFMfUzq5sBSMVORqtRNngUGoWii4E/view?usp=sharing>

Контрольні питання

1. Що таке теплоємність? Від чого залежить теплоємність тіла? Чим відрізняються питома та молярна теплоємності?
2. Як відрізняються C_p та C_v для газів, твердих та рідких тіл?
3. Поясніть перший закон термодинаміки.
4. Що розуміють під числом ступенів свободи? Чому число ступенів свободи молекул інертних газів дорівнює 3? Яке число ступенів свободи у молекули води?
5. Як визначається адіабатичний процес? Як змінюється температура газу при адіабатичному стисненні та розширенні?
6. Як та чому змінюється тиск повітря в балоні в усіх фазах експерименту? Як при цьому змінюється температура?

Лабораторна робота № 2.7

Визначення поверхневого натягу рідини методом відривання крапель

Мета роботи: ознайомитись з методом відриву крапель для вимірювання поверхневого натягу рідини

Обладнання: скляна трубка з поділками та звуженням на кінці, стакан, затискач, гумова груша, шланг.

Молекула, що знаходиться всередині рідини, взаємодіє з оточуючими її молекулами. Але оскільки взаємодії симетричні, рівнодіюча сила дорівнює нулю. Молекули поверхнього шару межують також з молекулами іншого середовища (іншої рідини, твердого тіла, парами цієї ж рідини). Для таких молекул симетрія сил порушується і сили, що діють на кожну молекулу поверхнього шару, є невідновженими (рис. 2.13). Таким чином на межі розділу фаз речовина знаходиться в особливому стані, який характеризується **поверхневим натягом**.

У випадку межі розділу рідина-пара поверхневий натяг характеризує молекулярні сили зчеплення в рідкій фазі. Результуюча сила, яка діє на довільну молекулу на поверхні рідини спрямована всередину рідини. Ці сили обумовлюють додатковий тиск на рідину. Тому молекула, яка виходить на граничний шар, повинна здійснити роботу проти сил цього тиску і, отже, її потенціальна енергія буде більшою.

Коефіцієнт поверхневого натягу α чисельно дорівнює роботі, яка витрачається на утворення одиниці площі поверхні розділу фаз (надлишкова потенціальна енергія одиниці поверхні): $\sigma = \Delta W / S$.

Рідина, що межує зі своїм паром, в рівновазі має мінімальну поверхню, що обумовлено наявністю сил, що намагаються скоротити поверхню рідини до мінімально можливого значення надлишкової поверхневої енергії. Цим обумовлено майже сферична форма падаючих крапель рідини. Поверхневий шар рідини подібний пружній плівці, в якій діють сили, направлені по дотичній до поверхні. Ці сили отримали назву сил поверхневого натягу. Коефіцієнт поверхневого натягу можна також визначити як відношення сил поверхневого натягу до довжини відрізка, на який діє ця сила:

$$\sigma = F / l.$$

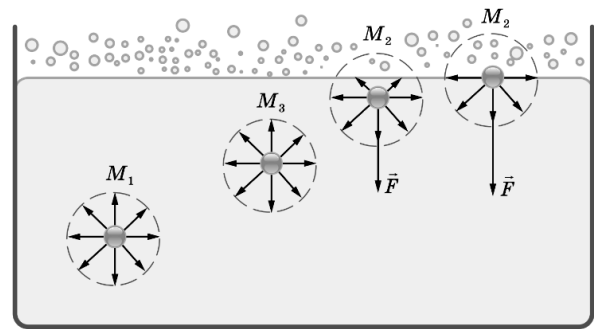


Рис. 2.13. Взаємодія молекули рідини в різних її частинах

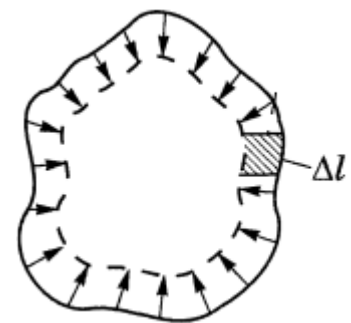


Рис. 2.14. Сили поверхневого натягу

Викривлення поверхні рідини приводить до появи додаткового надлишкового тиску на ній, який направлений в сторону ввігнутої викривленої поверхні. У випадку сферичної поверхні радіусу r надлишковий тиск

$$\Delta p = 2\sigma / r.$$

Коефіцієнт поверхневого натягу залежить від температури, і на межі рідини і в насиченого пару обертається в нуль при температурі, трохи меншу за критичну, що природно, оскільки по мірі наближення до критичної температури різниця між рідким і газоподібним станами зникає.

Коефіцієнт поверхневого натягу залежить від хімічного складу рідини і, зокрема, домішок. Мило, спирт, ефір і деякі інші речовини зменшують поверхневий натяг води. Ці речовини концентруються в поверхневому шарі, зменшують його енергію і називаються **поверхнево-активними** (ПАР).

Для визначення коефіцієнту поверхневого натягу існує декілька методів, найпростіший з них – метод відриву крапель. Прилад, що використовується для вимірювань (рис. 2.15), представляє собою скляну капілярну трубку, що має звуження з шийкою круглої форми радіуса r .

Коли рідина витікає з вертикальної трубки, то на її кінці утворюється поверхнева плівка. Ця плівка розтягується під дією сили тяжіння рідини і приймає сферичну форму. Сила тяжіння тягне рідину – вниз, збільшуючи розмір краплі і розтягуючи поверхню; поверхневий натяг намагається скоротити поверхню плівки.

Розрив поверхневої плівки при відриві краплі відбувається по краю шийки капіляра, довжина якого рівна $2\pi r$. Передбачається, що в момент відриву краплі її сила тяжіння mg дорівнює силі поверхневого натягу $F = 2\pi r\sigma$:

$$2\pi r\sigma = mg.$$

Якщо маса краплі $m = \rho V_k$, де ρ – густина рідини і V_k – об'єм однієї краплі, то в результаті маємо

$$\sigma = \frac{\rho V_k g}{2\pi r}. \quad (1)$$

Якщо радіус шийки не вказаний, то можна його визначити за допомогою паперового або пластикового клина (прямокутний трикутник, як на рис. 2.16). Для цього користуємося знаннями про подібні трикутники з геометрії. Помістивши клин в отвір, ми можемо відмітити та виміряти глибину занурення s_1 . Далі виміряти лінійкою довжину катетів клина (він же прямокутний трикутник) s_2 та D . Радіус шийки визначаємо з формули

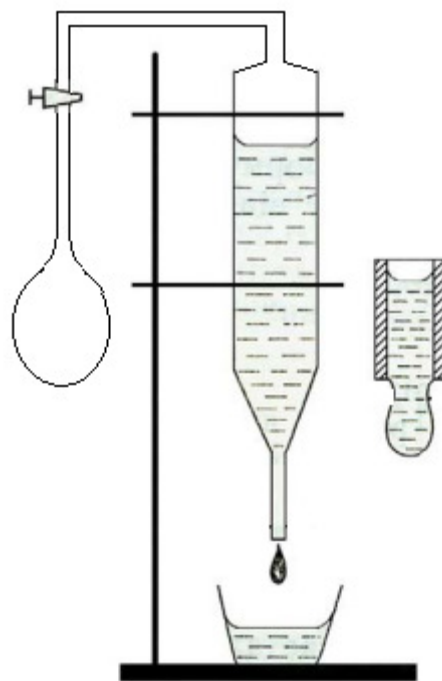


Рис. 2.15. Експериментальна установка

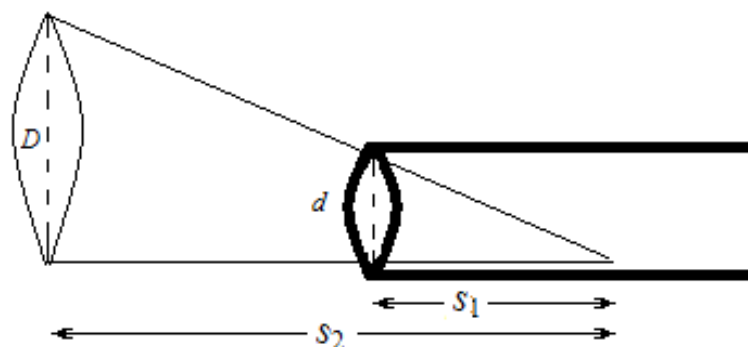


Рис. 2.16. Для визначення радіуса шийки

$$r = \frac{d}{2} = \frac{Ds_1}{2s_2}.$$

Об'єм однієї краплі розраховують наступним чином. На капілярі є мітки. Об'єм рідини V , який може зайняти вона між ними визначається заздалегідь і, зазвичай відомий. Тому необхідно підрахувати кількість крапель n , які складають об'єм рідини між мітками. Тоді $V_k = \frac{V}{n}$.

Рідина в капіляр зтягується за допомогою повітряної груші в стиснутому стані і піднятому стакані з рідиною. Краном регулюється швидкість капання рідини. Вона не повинна бути великою, щоб крапля в момент відриву мала практично нульову швидкість.

Порядок виконання роботи:

1. Заповнити капіляр дистильованою водою вище мітки за допомогою гумової груші.
2. Відрегулювати витіснення рідини краплями до швидкості, коли можна їх підрахувати.
3. Полічити число крапель води за час проходження рівня води між сусідніми мітками. Значення об'єму рідини між мітками є на установці. Виконати вимірювання 5 разів.
4. Знайти середнє значення кількості крапель $\bar{n}$, довірливий інтервал Δn .
5. Розрахувати по формулі (1) коефіцієнт поверхневого натягу.
6. Розрахувати абсолютну і відносну похибку визначення коефіцієнту поверхневого натягу за формулою:

$$\frac{\Delta \sigma}{\bar{\sigma}} = \frac{\Delta n}{\bar{n}}.$$

7. Порівняти з табличними даними.

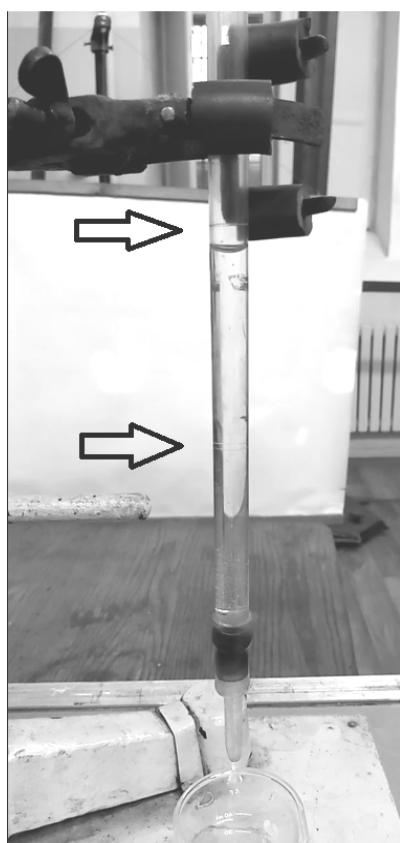
Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується використати відеофрагменти дослідів. Досліди проводилися при різних температурах води. Вода попередньо нагрівалася в електрочайнику і потім впускалася в капіляр за допомогою гумової груші.

Дослід	Посилання
1 (20°C)	https://drive.google.com/file/d/16rVu0xWpapLfE7gsYyEF6VhISHkt6g_I/view?usp=sharing
2 (55°C)	https://drive.google.com/file/d/1YNDnaTu1Tvu6MqEurm0r6dh4a5sTeKi_/view?usp=sharing
3 (30°C)	https://drive.google.com/file/d/1IoJ9ck8DSpTuJUblWYRAEzj7yXpajmVw/view?usp=sharing
4 (30°C)	https://drive.google.com/file/d/1lE-OnwSEyCNSQzQxO8_oF494cuXQs-A5/view?usp=sharing

На відео представлено опускання рівня води в капілярі. Необхідно порахувати кількість крапель води, які вміщуються в об'єм рідини між двома мітками.

Для даного капіляру об'єм рідини між мітками $V = 5$ мл. Радіус шийки капіляра $r = 1,6$ мм.



№ варіанта	Досліди
1	1, 3
2	2, 4
3	1, 4
4	2, 3
5	1, 2
6	3, 4

Рис. 2.17. Капіляр з рідиною
(стрілками відмічені мітки)

Контрольні питання

1. У чому причина особливих властивостей поверхневого шару? Що таке поверхневий натяг?
2. Чому викривлення поверхні рідини призводить до появи додаткового тиску? Куди воно спрямоване та від чого залежить?
3. Від яких факторів залежить значення поверхневого натягу рідини?
4. Поясніть явища змочування та незмочування рідиною твердої поверхні.

Лабораторна робота № 2.8
Визначення абсолютної та відносної вологості
повітря психрометром Августа

Мета роботи: визначити відносну та абсолютну вологість за допомогою психрометра Августа.

Обладнання: психрометр Августа, психрометрична таблиця, гігрометр.

Атмосферне повітря містить деяку кількість водяних парів. Кількість цих парів може змінюватись як по абсолютній величині, так і по ступеню насиченості, що характеризується абсолютною та відотною вологістю.

Абсолютною вологістю повітря називають масу водяної пари в грамах, що міститься в 1 м³ повітря, тобто її парціальній густині. Частіше абсолютну вологість вимірюють парціальним тиском водяної пари p , що знаходиться в повітрі при даній температурі і визначається вона в мм. рт. ст. або в Па. Це можливо, коли температури невисокі і пара далека від стану насичення, і тому можна застосовувати рівняння Менделєєва-Клапейрона.

Під **відотною вологістю** розуміють відношення абсолютної вологості до парціального тиску водяної пари p_n , яка насичує простір при тій же самій температурі і визначають в відсотках

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Частіше за все водяна пара знаходиться в повітрі в ненасиченому стані. Внаслідок зменшення температури навіть кількість водяної пари може стати насиченою і тоді утворюється туман або роса. Температура, при якій наявна в повітрі водяна пара стає насиченою, тобто починає конденсуватись, називається **точкою роси**. **Насичена пара** – пара, яка перебуває в термодинамічній рівновазі з рідиною або твердим тілом при даній температурі. В більш простому розумінні це означає, що кількість молекул, які вилітають з рідини чи твердого тіла, дорівнює кількості молекул, що влітають з газової фази в рідину чи тверде тіло.

Швидкість випаровування залежить від того, як близько водяна пара від стану насичення. Якщо $\varphi = 100\%$, то це означає, що пар в повітрі насичений і випаровування не відбувається. Чим менше відносна вологість, тим далі водяна пара від стану насичення і тим інтенсивніше випаровування. Тиск p_n насиченої водяної пари при заданій температурі – величина таблична. Швидкість випаровування також залежить від види рідини, температури поверхні рідини, площі випаровування та наявності конвекції.

Найбільш поширеним методом для визначення вологості повітря являється психрометричний метод з використанням приладу – психрометра Августа (рис. 2.18а). Цей прилад складається з двох термометрів: сухого та змоченого водою (балончик цього термометра обернений мокрим батистом). Показники термометрів будуть різними. Внаслідок випаровування води з батисту «вологий» термометр буде показувати температуру більш низьку, ніж «сухий». Чим

менше вологість навколишнього повітря, тим інтенсивнішим буде процес випаровування і тим нижчі показання «вологого» термометра. Виміри по двом термометрам дадуть різницю температур, яка і буде характеризувати вологість повітря.

Показання мокрого термометра в психрометрі відрізняються (в бік завищення) від справжньої температури мокрого термометра, бо кульці мокрого термометра передається певна кількість теплоти за рахунок випромінювання навколишніх тіл і деяка кількість тепла надходить через виступаючий стовпчик ртуті термометра, що має температуру навколишнього повітря. Щоб зменшити цей вплив, захищають кульку екранами, обгорнути батистом виступаючий стовпчик ртуті, підвищити швидкість руху повітря і цим збільшити швидкість випаровування. Як показують спеціальні дослідження, при швидкості повітря 1.5 – 2 м/с і температурі мокрого термометра більше 20 °С помилка стає близько 1 % від різниці показань термометрів і нею можна знехтувати.

Нехай температура «вологого» термометра t_1 , а «сухого», що вимірює те-

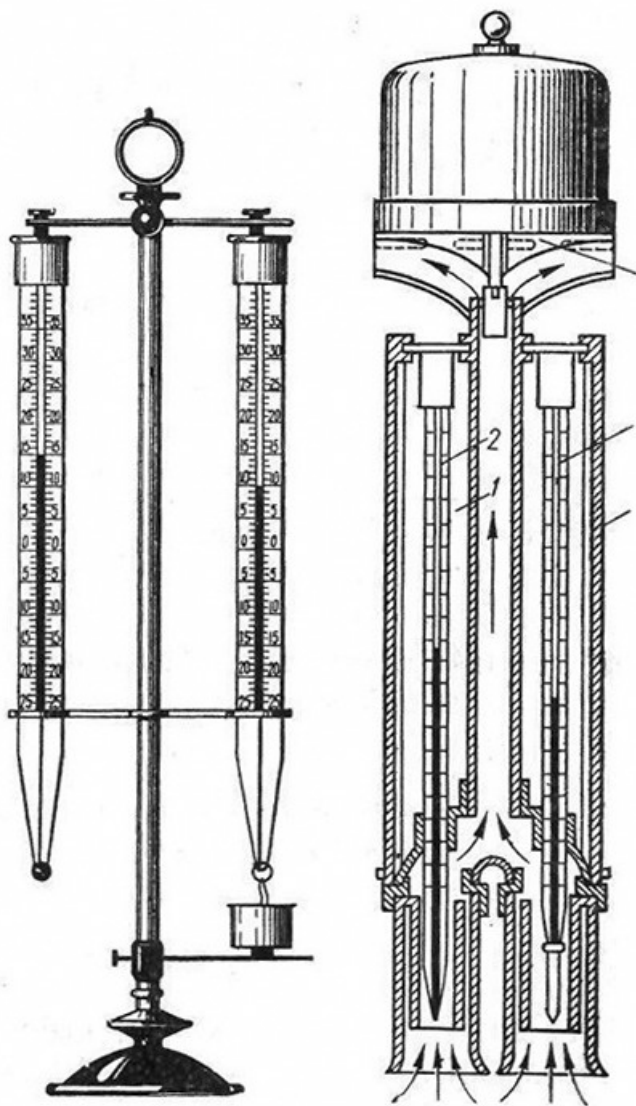
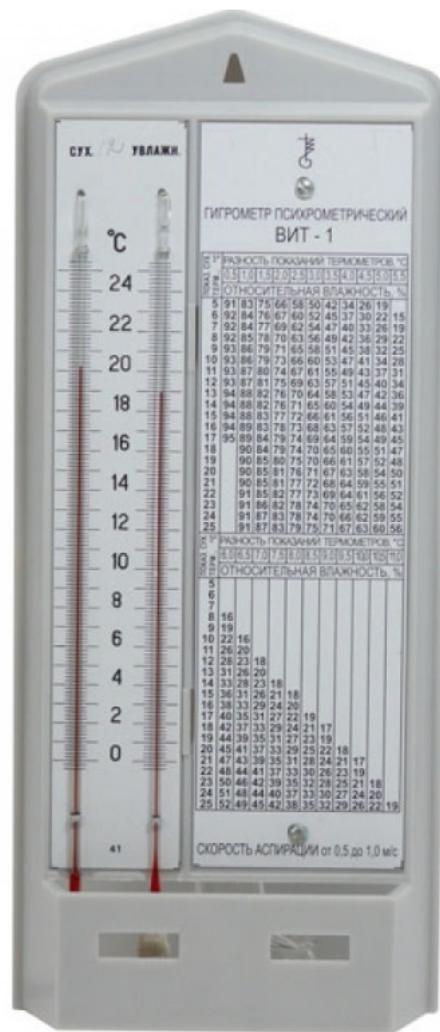


Рис.2.18. а) Психрометр Августа



б) Гігрометр ВІТ-1

температуру повітря, t . Зниження температури «вологого» термометра буде відбуватися до тих пір, поки не наступить теплова рівновага, при якій притік тепла до балончика «вологого» термометра зовні дорівнює витратам тепла на випаровування.

Для невеликих різниць температур кількість тепла Q_1 , що отримав балончик «вологого» термометра за одиницю часу, по закону Ньютона пропорційна його поверхні S та різниці температур між ним і «сухим» термометром

$$Q_1 = \alpha S (t - t_1),$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі.

Швидкість випаровування по закону Дальтона визначається

$$W = -\frac{dm}{dt} = \frac{cS(p_n - p)}{p_0},$$

де m – маса води, що випаровується, p_0 – атмосферний тиск, p_n – тиск насиченої пари при температурі рідини, що випаровується (тобто при T_1), p – тиск водяної пари, що знаходиться в повітрі, c – коефіцієнт пропорційності, який залежить від швидкості потоку повітря.

Кількість тепла, що йде на випаровування Q_2 за одиницю часу, дорівнює $Q_2 = WL$, де L – питома теплота випаровування води. Падіння температури «вологого» термометра закінчується, коли буде виконуватись умова $Q_1 = Q_2$, або

$$\alpha S(t - t_1) = \frac{cSL}{p_0}(p_n - p).$$

Звідки

$$p = p_n - Ap_0(t - t_1).$$

Величина $A = \frac{\alpha}{cL}$ називається сталою психрометра.

Стала психрометра A в основному залежить від швидкості руху повітря, яка визначає коефіцієнти теплообміну і випаровування. Експериментальними дослідженнями Зворикіна встановлено таку формулу для цього коефіцієнту:

$$A \cdot 10^6 = 593.1 + \frac{135.1}{\sqrt{v}} + \frac{48}{v},$$

де v – швидкість руху повітря біля психрометра, м/с. Стала A дуже залежить від швидкості руху повітря в області малих значень швидкості, а при великих – змінюється мало. Тому, змушуючи вентилятором вимушено рухатися повітря зі швидкістю 3-5 м/с, стала психрометра змінюється мало і дорівнює $A \approx 0,0007$.

Тому кінцева формула для визначення абсолютної вологості має вигляд

$$p = p_n - 0.0007 p_0(t - t_1). \quad (2)$$

Формула вірна в тому випадку, коли біля приладу утворюється рівномірний рух повітря.

Зручним для вимірювання вологості і температури повітря є також гігрометр (рис. 2.18b). Він містить психрометричною таблицею. Однак покази «вологого» термометра встановлюються в ньому доволі повільно.

Таблиця 1

Тиск p_n і густина ρ насиченої водяної пари

$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$
0	0.611	4.84	13	1.50	11.4
1	0.656	5.22	14	1.59	12.1
2	0.705	5.60	15	1.70	12.8
3	0.757	5.98	16	1.81	13.6
4	0.813	6.40	17	1.94	14.5
5	0.872	6.84	18	2.06	15.4
6	0.934	7.3	19	2.19	16.3
7	1.01	7.8	20	2.34	17.3
8	1.07	8.3	21	2.48	18.3
9	1.15	8.8	22	2.64	18.4
10	1.23	9.4	23	2.81	20.6
11	1.31	10.0	24	2.99	21.8
12	1.40	10.7	25	3.17	23.0

Порядок виконання роботи

1. Змочити батист, яким покрито балончик «вологого» термометра, дистильованою водою за допомогою резинові гриші або піпетки. Треба уважно слідкувати за тим, щоб вода не потрапила на другий термометр, або на внутрішню поверхню трубки, в якому знаходиться термометр.
2. Ключем заводять вентилятор (5-6 обертів ключа), приводячи тим самим в рух повітря, і слідкують за температурою «вологого» термометра.
3. Коли температура «вологого» термометра перестане знижуватися і буде мати постійне значення (через 4-5 хв.), записують показання t_1 і t ; вентилятор при цьому повинен працювати повним ходом.
4. Вимірюють барометром атмосферний тиск p_0 .
5. По табл. 1 знаходять пружність насичених парів води p_n при температурі «вологого» термометра t_1 .
6. По формулі (2) знаходять абсолютну вологість повітря ρ .
7. По формулі (1) знаходять відносну вологість повітря. Тиск насичених водяних парів p_n знаходять по табл.1 при температурі «сухого» термометра.
8. Знайти відносну вологість також за допомогою психрометричної таблиці (табл.2). Порівняти з розрахованою по формулі (1). Відносна вологість за психрометричною таблицею визначається як точка перетину горизонтальної лінії (температура «сухого» термометра) та вертикальної лінії (температура «вологого» термометра).

Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується взяти два значення термометрів («сухого» та «вологого») і провести процедуру обробки результатів вимірювання (п.4–8 порядку виконання роботи). На рис. 2.19 представлено барометр, який показує атмосферний тиск в Па.

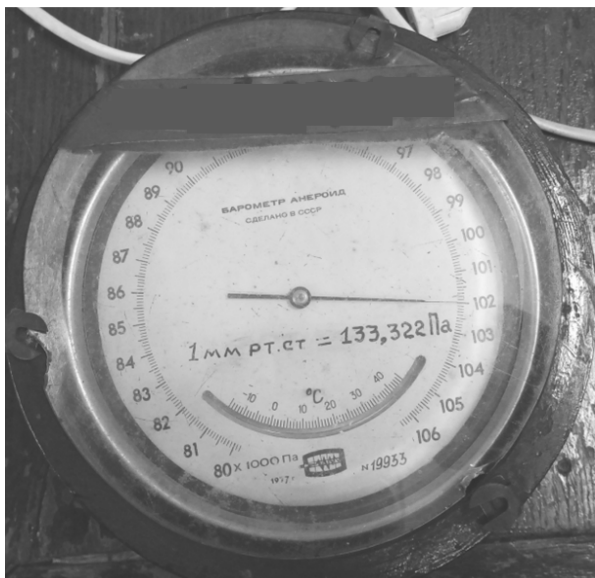


Рис. 2.19. Барометр

№ варіанта	Покази термометрів
1	17°C та 20°C
2	18°C та 20°C
3	18°C та 22°C
4	19°C та 22°C
5	20°C та 24°C
6	19°C та 23°C

Контрольні питання

1. Що таке абсолютна і відносна вологість? Як вони визначаються?
2. Що таке насичена пара? Ненасичена?
3. Чому вранці спостерігається випадання роси чи поява туману? Чому вона згодом зникає?
4. Від чого залежить швидкість випаровування? Назвіть 5 основних чинників.
5. Чому температура вологого термометра менша за температуру сухого?
6. Навіщо «вологий термометр» потрібно постійно обдувати?
7. Для чого термометри поміщені в нікельовані металеві трубки?

Таблиця 2

Психрометрична таблиця

Показання "сухого" термометра, °C	Різниця показів сухого та вологого термометрів, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Відносна вологість, %										
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРИКА. ОПТИКА

Лабораторна робота № 3.1

Визначення опору провідників постійного струму за допомогою мостової схеми

Мета роботи: ознайомлення з класичним методом визначення опорів провідників за допомогою рівноважного мосту Уїтстона.

Обладнання: джерело постійного струму на 5 В, реохорд з опором 102 Ом, чутливий гальванометр М 2031/1 з опором 4,1 кОм, магазин опорів Р34 від 1 до 10 кОм класу точності 0,1, набір невідомих опорів (500, 750, 1275, 3580, 8910 Ом), лінійка, подвійний ключ, з'єднувальні дроти.

Міст Уїтстона складається з чотирьох послідовно з'єднаних опорів, які утворюють замкнутий прямокутник $ABCD$ (рис. 3.1). В одну із діагоналей схеми підключається чутливий гальванометр, а в іншу – джерело живлення. Ділянка, де включений гальванометр, називається **мостом**, звідси назва методу.

При використанні моста в рівноважному режимі процес вимірювання зводиться до пошуку такого співвідношення між опорами, які складають схему, при яких сила струму в діагоналі CD перетворюється на нуль. Гілки бруківки, утворені опорами R_1, R_2, R_3, R_4 , називаються плечима моста.

При довільному співвідношенні опорів, які складають мостову схему, через гальванометр повинен протікати струм. Для знаходження струмів, які протікають через гальванометр та в плечах моста, використовують правила Кірхгофа. Перед їх використанням у кожній з гілок повної системи довільно вибирають (якщо напрямок невідомий) напрямок протікання електричного струму.

Перше правило Кірхгофа. Алгебраїчна сума струмів, що проходять через вузол, дорівнює нулю:

$$\sum I_i = 0.$$

В протилежному випадку у вузлі відбувалося б накопичення або поглинання електричного заряду.

Вузлом називається точка розгалуження кола, тобто з'єднання більш як двох провідників. Струм, що втікає у вузол, вважається позитивним, а струм, що витікає – негативним.

Якщо повна схема містить m вузлів, перше правило Кірхгофа використовують для $m-1$ вузлів.

Друге правило Кірхгофа. У замкнутому контурі алгебраїчна сума падінь напруги на ділянках ланцюга дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що знаходяться в даному контурі:

$$\sum I_i R_i = \sum E_j.$$

Для запису рівняння слід обійти замкнутий контур, виділений в загальному електричному ланцюзі. При обході контуру напрямок (за або проти годинникової стрілки) обирається довільно. Падіння напруги вважається позитивним, якщо обрано раніше напрямок струму на даній ділянці між двома вузлами збіга-

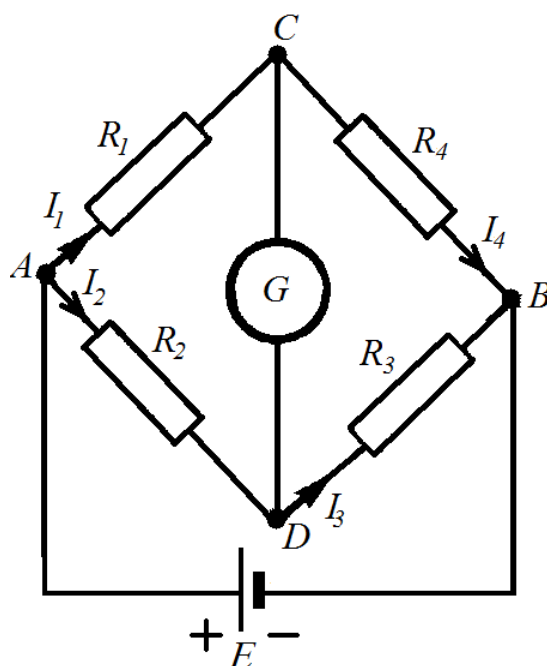


Рис. 3.1 Принципова схема мосту Уїтстона

ється з напрямком обходу контуру, і негативним, якщо напрямок струму протилежний напрямку обходу. ЕРС вважається позитивною, якщо при обході за контуром джерело струму проходить від негативного полюса до позитивного, і негативного - у протилежному випадку. При використанні другого правила Кірхгофа необхідно стежити за тим, щоб новий контур не міг бути отриманий шляхом додавання або віднімання вже розглянутих контурів.

Повна кількість рівнянь, що складаються за правилами Кірхгофа, має співпадати з кількістю різних струмів у цій схемі.

Таким чином, для даної схеми (рис. 1) можна показати, що існує одне співвідношення між опорами, при якому сила струму, що протікає через гальванометр, обертається в нуль. Хоча при цьому в інших ланках моста сила струму не дорівнює нулю.

Струм в діагоналі CD буде відсутній, коли потенціали точок C і D будуть рівними: $\varphi_C = \varphi_D$. Використовуємо для контурів $ACDA$ та $CBDC$ друге правило Кірхгофа:

$$I_2 R_2 - I_1 R_1 = 0, \quad I_4 R_4 - I_3 R_3 = 0.$$

Беручи до уваги, що у збалансованому містку сила струму через гальванометр дорівнює нулю, отже $I_1 = I_4$ та $I_2 = I_3$, отримаємо умову рівноваги:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad \text{або} \quad \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}.$$

Це співвідношення може служити для пошуку будь-якого з чотирьох опорів, включених в місток, якщо відомі три інших опори. Тому суть процесу вимірювання на мостовій схемі полягає в експериментальному визначенні опорів, що відповідають знайденому співвідношенню.

Мостова схема використовується наступним чином (рис. 3.2). В одне з плеч моста включається відомий опір R , наприклад, магазин опорів. В інше пле-

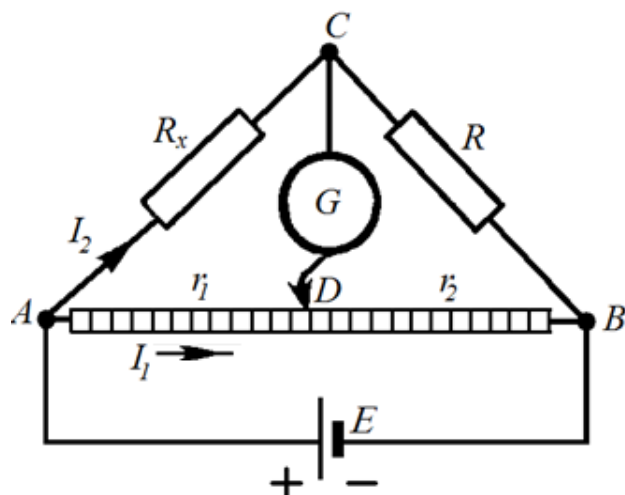


Рис. 3.2. Практична реалізація мостової схеми Уїтстона

че включається невідомий опір R_x . Виходячи з того, що в розрахункову формулу входить відношення опорів третього і четвертого плеч мостової схеми, зазвичай вони встановлюються у вигляді металевого провідника (реохорда AB), натягнутого вздовж міліметрової шкали. З'єднання гальванометра з реохордом здійснюється за допомогою рухомого контакту D . Таким чином, опорами r_1 і r_2 являються відрізки провідника по різні сторони від рухомого контакту. Тому відношення опор r_1 і r_2 замінюють на відношення відповідних довжин реохорда l_1 і l_2 (AD и DB):

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2} \quad \text{або} \quad R_x = R \frac{l_1}{l - l_1},$$

де l – загальна довжина реохорда.

В цих умовах процес вимірювання на мостовій схемі полягає в встановленні в магазині опору значення, близького до невідомого опору, і відшукуванні за допомогою рухомого контакту такого його положення, при якому струм в гальванометрі обертається в нуль.

Відносна похибка вимірювання таким методом дорівнює:

$$\delta = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l + \Delta l_1}{l - l_1}.$$

Величина $\frac{\Delta R}{R}$ визначається класом точності магазину опору. Неважко показати, що мінімум похибки методу відповідає максимуму загального знаменника і, отже, у випадку $l_1 = l/2$. Тобто похибка мінімальна, коли рухомий контакт D розташований на середині реохорду.

На практиці зазвичай використовують подвійний ключ, яким можна замикати та розмикати не тільки коло джерела струму, але і коло включеного в мост гальванометра (рис. 3.3). Суть дії ключа полягає в тому, що при натисканні на нього спочатку замикаються пластинки c і d , а потім пластинки a і b . При припиненні тиску на ключ розмикання пластинок відбувається в зворотному порядку. Необхідність такого ключа пов'язана з тим, щоб коло гальванометра,

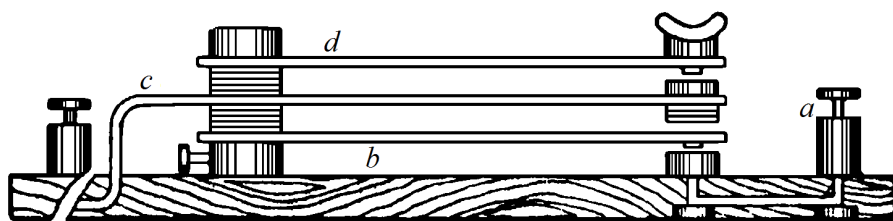


Рис. 3.3. Подвійний ключ

підключеного до нижніх пластин, замикалося після замикання кола джерела струму, а розмикалося, навпаки, раніше кола джерела струму. Причиною є те, що в моменти замикання і розмикання кола джерела електрорушійної сили виникають електрорушійні сили самоіндукції. Сили струму, що виникають при цьому (хоч і не на значний час) можуть бути значними і вивести з ладу гальванометр. Таким чином, коло гальванометра стає замкнутим в рівноважному режимі роботи схеми.

Зазвичай струм, що протікає через гальванометр, не дорівнює нулю. З метою запобігання сильних поштовхів рухомої системи гальванометра, урівноважування мосту слід розпочинати при малому значенні сили струму. Для цього гальванометр шунтований змінним опором. По мірі покращення рівноваги мосту опір змінного шунту можна збільшувати. Остаточне урівноваження мосту проходить при розімкнутому шунті.

В схемі використовують стрілочний гальванометр магнітоелектричної системи, у якого нульове положення знаходиться посередині шкали і стрілка може відхилятися в обидві сторони. Під стрілкою гальванометра розташована дзеркальна смужка. При правильному вимірюванні стрілка гальванометра повинна закривати своє зображення в дзеркалі.

Слід пам'ятати, що необхідно тримати міст під струмом протягом можливого малого проміжку часу для зменшення нагрівання резисторів і відповідно зміни їх величин.

Порядок виконання роботи:

- 1.Зібрати електричну схему містка для вимірювання опору постійного струму відносно рис. 3.4.

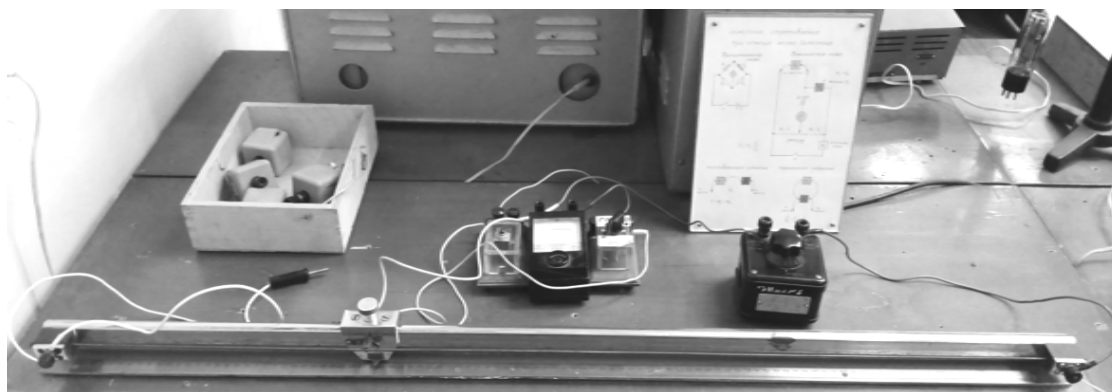


Рис. 3.4. Експериментальна установка

Реохорд АВ замінює два відомих опора r_1 і r_2 . Відношення цих опорів можна змінити за допомогою рухомого контакту. Як третій, регулюючий, опір R_3 застосовується магазин опорів. В четверте плече вмикається досліджуваний опір R_x . В діагональ такої схеми вмикається чутливий гальванометр G , послідовно з яким з'єднується змінний опір R_n .

2. Щоб зберегти гальванометр від проходження великих струмів, встановлюють найменше значення опору R_n – ставлять в положення “грубо”. Контакт C ставлять на середину реохорда.
3. Для визначення R_x збалансуйте міст, регулюючи R . Для більш точнішого балансування містка зменшенням опору R_n треба збільшити чутливість гальванометру і здобудьте рівновагу переміщенням движку C .
4. Записати одержані значення R , l_1 і l_2 і розрахувати R_x за формулою:

$$R_x = R_3 \frac{l_1}{l_2}.$$

Вимірювання проводяться три рази і обчислюється похибка.

5. Ввімкнути в схему інший невідомий опір і повторити операції 2-4, як описано вище, і визначити його значення.
6. Обидва невідомих опори включити паралельно, а потім послідовно і визначити їх значення. Порівняти одержані на досліді значення з розрахунками за формулами:

$$R_{\text{парал}} = \frac{R_{x1} R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}} \quad R_{\text{послід}} = R_{x1} + R_{x2}.$$

7. Оцініть похибку вимірювання. Зробіть висновки.
8. Порівняти знайдений опір зі значеннями, які вимірювалися омметром і надані в пункті «Обладнання».

Варіанти для дистанційного виконання

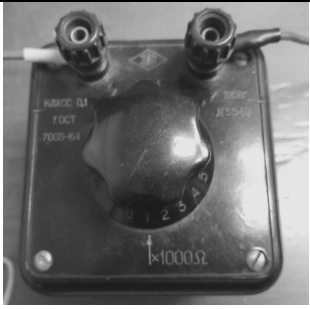
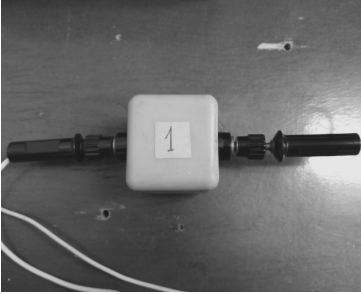
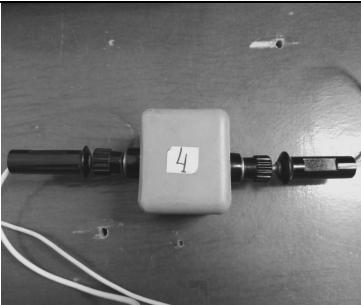
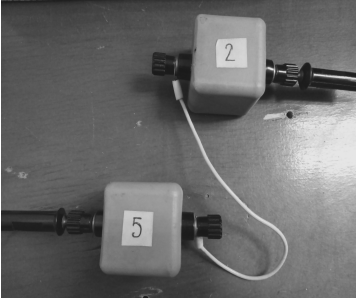
Для дистанційного виконання роботи необхідно вибрати два з чотирьох опорів, які пронумеровані. Для кожної з пар необхідно знайти в нижче представленій таблиці випадки підключення окремо кожного опору, їх послідовного і паралельного з'єднання. Для кожного експерименту надано довжини реохорда зліва і справа від рухомого контакту C , опір магазину R_0 .

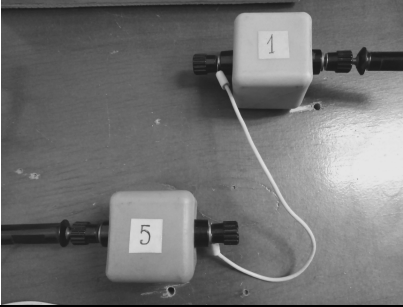
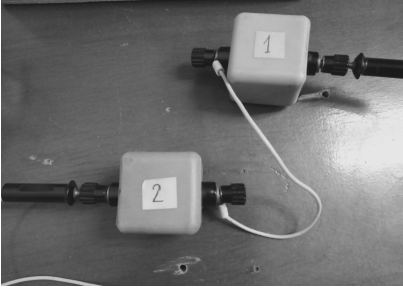
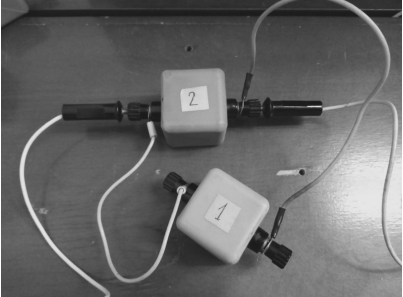
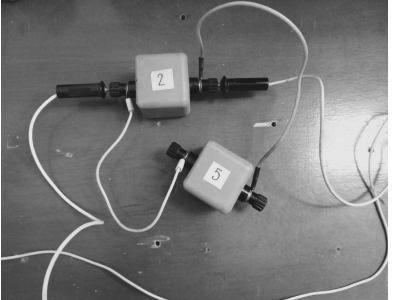
Необхідно виконати 4, 6 та 7 пункти порядку виконання роботи.

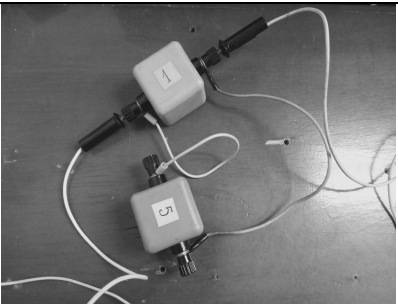
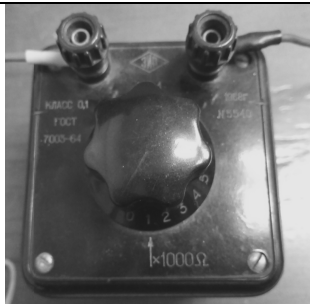
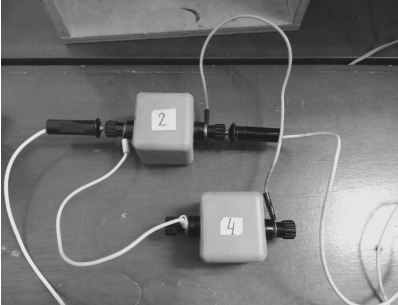
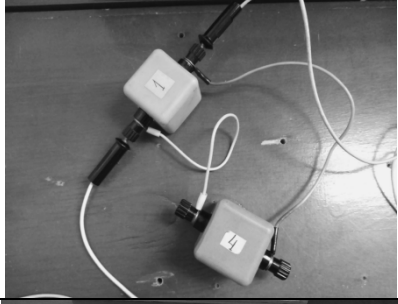
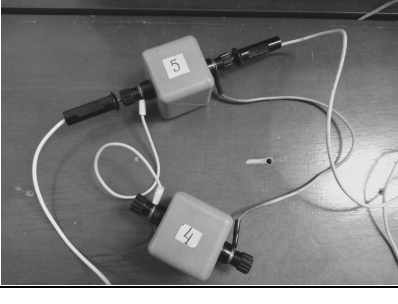
№ варіанта	1	2	3	4	5	6
Опори	1, 4	2, 5	1, 2	1, 5	4, 5	2, 4

Приклад виконання одного вимірювання можна переглянути за посиланням:

<https://drive.google.com/file/d/1Xive0CZ6LXaSDp6-dEiafApqwMwSZYvN/view?usp=sharing>

Невідомий опір	Показання на реохорді зліва	Показання на реохорді справа	Опір R_0 , Ом
	56 см	44 см	
	33 см	67 см	
	54 см	46 см	
	69 см	31 см	
	76 см	24 см	
	72 см	28 см	

Невідомий опір	Показання на реохорді зліва	Показання на реохорді справа	Опір R_0 , Ом
	70 см	30 см	
	37 см	63 см	
	67 см	33 см	
	55 см	45 см	
	26 см	74 см	
	36 см	64 см	

Невідомий опір	Показання на реохорді зліва	Показання на реохорді справа	Опір R_0 , Ом
	32 см	68 см	
	48 см	52 см	
	30 см	70 см	
	46 см	54 см	

Контрольні питання:

1. В чому полягає принцип мостової схеми?
2. Сформулюйте правила Кірхгофа та закон Ома для ділянки кола.
3. Як залежить опір металевого дроту від його геометричних розмірів?
4. Виведіть формули для опору послідовного і паралельного з'єднання опорів.
5. Провідник склади двічі. Як змінився його опір?
6. Чому час роботи мостової схеми повинен бути мінімальним?

Лабораторна робота № 3.2

Вивчення температурних залежностей електропровідності металів та напівпровідників

Мета роботи: ознайомитися з явищем електропровідності в твердих тілах. Вивчити температурну залежність опору металів і напівпровідників. Розрахувати температурний коефіцієнт опору металевого дроту і енергію забороненої зони напівпровідника.

Обладнання: мікротермостат з потужністю 150 Вт, що працює від мережі 220 В, дві пробірки, моток мідного дроту опором близько 25 Ом, напівпровідниковий опір близько 1 МОм, міст постійного струму, омметр, з'єднувальні дроти, термометр.

Характер електропровідності твердих тіл можна пояснити у рамках квантової зонної теорії, суть якої полягає у наступному.

Енергетичні стани електронів окремого атома, згідно з постулатами Бора, приймають дискретні значення і постають у вигляді енергетичних рівнів. При великих відстанях атоми незалежні один від одного, і енергетичні рівні схематично відображаються у вигляді окремих ліній (рис 3.5a).

При зближенні атомів до відстаней, характерних для твердих тіл, між електронами сусідніх атомів спостерігається сильна взаємодія, за рахунок чого спостерігається «розщеплення» енергетичних рівнів. Таким чином, енергії рівнів стають іншими. Кожний енергетичний рівень окремого атома розщеплюється на таке число компонентів, скільки атомів є у твердому тілі, тобто окремі рівні енергії перетворюються на енергетичні зони з величезною кількістю близько розташованих рівнів, причому ширина зони детермінується (визначається) лише величиною взаємодії атомів, а не їх числом (рис. 3.5b).

Величина енергії взаємодії внутрішніх електронів атомів твердого тіла невелика, і відповідні рівні дають вузькі зони, відокремлені одна від одної значними енергетичними зонами (**забороненими зонами**). Для зовнішніх електронів атомів взаємодія значна і відповідні енергетичні зони досить широкі і не перекриваються.

Таким чином, структура енергетичних рівнів твердого тіла являє собою суму дозволених зон з великою кількістю близько розташованих рівнів, розділених забороненими зонами. Згідно з принципом Паулі в N станах (на N рівнях) кожної зони може знаходитися не більше $2N$ електронів. Якщо в зоні немає електронів, то її вклад в електропровідність дорівнює нулю. Якщо зона повністю заповнена, то її вклад в електропровідність також дорівнює нулю, тому що зовнішнє електричне поле не може змінити енергію електронів і створити електричний струм. Під дією зовнішнього поля електричний струм може виникнути тоді, коли зона не повністю заповнена, чи може частково звільнитися від електронів внаслідок нагрівання, освітлення і т.д. Такі зони називаються **зонами провідності** чи власними зонами. Електрони нижніх енергетичних зон не можуть приймати участь у переносі заряду з двох причин. По-перше, ці електрони зв'язані зі своїми атомами, а по-друге, ці зони повністю заповнені. Верхня зона

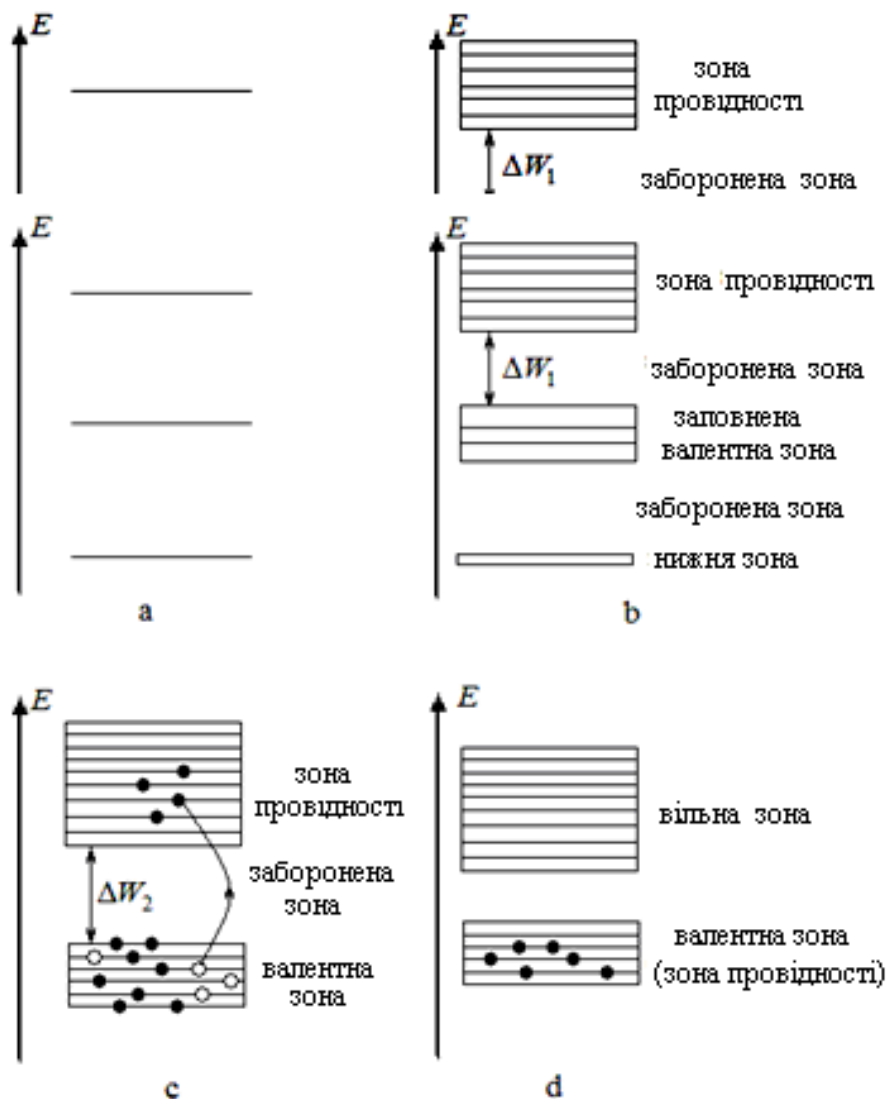


Рис. 3.5. Енергетичні рівні а) одинокого атома, б) діелектрика, в) напівпровідника, д) металу

зазвичай носить назву **валентної зони**, так як вона відповідає рівням валентних електронів. Електрони валентної зони усупільнені і можуть вільно рухатися по всьому твердому тілу. Однак цього ще недостатньо для виникнення електричного струму.

Якщо валентна зона повністю заповнена і відокремлена від вільної зони широкою забороненою зоною, з енергією ΔW_1 , то зовнішнє електричне поле не може змінити характер руху електронів. Цим і пояснюється відсутність електропровідності в **діелектриках** (рис. 3.5b). Ширина забороненої зони у типових діелектриків становить близько 10 еВ (1 електрон-вольт рівний $16 \cdot 10^{-19}$ Дж). Щоб діелектрик проводив струм, необхідно надати електрону енергію, більшу, ніж значення енергії забороненої зони. Теплової енергії та енергії звичайних електричних полів для цього недостатньо.

В **напівпровідниках** (рис. 3.5c) валентна зона повністю заповнена і відокремлена від зони провідності забороненою зоною ΔW_2 , відносно невеликою.

За порядком величини вона дорівнює тепловій енергії і не перевищує 3-3.5 еВ, тобто енергетичний бар'єр між зоною провідності і валентною зоною менший.

Природа носіїв заряду в напівпровідниках двояка. Перехід електрона з валентної зони в зону провідності означає не лише появу електрона, здатного рухатися у речовині, а також і появу «дірки», тобто вакансії, на яку можуть переходити інші електрони валентної зони. Іншими словами, у електричному полі починають рухатися не тільки електрони, але й «дірки». Тому розрізняють електронну та «діркову» провідність, відповідно, n і p -провідність. Окрім такої власної провідності у напівпровідниках існує ще так звана домішкова провідність. Якщо у ґратку напівпровідника потрапляють домішки більшої валентності, ніж власні атоми, то надлишкові електрони будуть переходити у міжвузля і зумовлювати n -провідність. Якщо ж у ґратку потрапляють атоми-домішки меншої валентності, ніж основні, то вони захоплюють електрони сусідніх атомів і утворюється недостача електронів у зв'язках, тобто «дірки». У такому разі виникає діркова провідність. Домішкова провідність перевищує власну у сотні і навіть тисячі разів.

У **металах** (рис. 3.5d) електрони заповнюють валентну зону не повністю, яка і являється одночасно зоною провідності. Тому достатньо надати електрону зовсім невелику енергію (більше 10^{-23} еВ) для того, щоб перевести їх на більш високі рівні в межах валентної зони. Тобто електропровідність металів дуже велика.

Зазвичай на практиці зручно вимірювати не електропровідність, а опір R – величину обернену до провідності. Опір діелектриків є дуже великим і у даній роботі не вивчається.

Опір металів, навпаки є дуже малим, так як їх електропровідність дуже велика. Електричний опір провідників залежить від температури. З підвищенням температури тепловий рух атомних ядер стає більш інтенсивним, і вони перешкоджають спрямованому руху електронів, тобто створюють опір електричному струму. Залежність опору металів від температури можна виразити співвідношенням

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2),$$

де R_0 і R_t – значення опору, відповідно, при 0°C і при температурі $t^\circ\text{C}$; α і β – індивідуальні сталі металу, що визначаються з досліду.

Для визначення α і β можна зробити вимірювання опору мінімум при трьох значеннях температури. Яскравим представником металу, для якого використовують квадратичну залежність, являється платина.

В невеликому інтервалі зміни температури можна вважати залежність опору металу від температури лінійною:

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

В цьому випадку для визначення α можна зробити вимірювання опору мінімум при двох значеннях температури. Для багатьох металів саме лінійна залежність з певною похибкою використовується в різних практичних задачах.

Якщо побудувати графік залежності $R_t = f(t)$ (рис. 3.6а), то за тангенсом кута нахилу прямої ϕ можна знайти α :

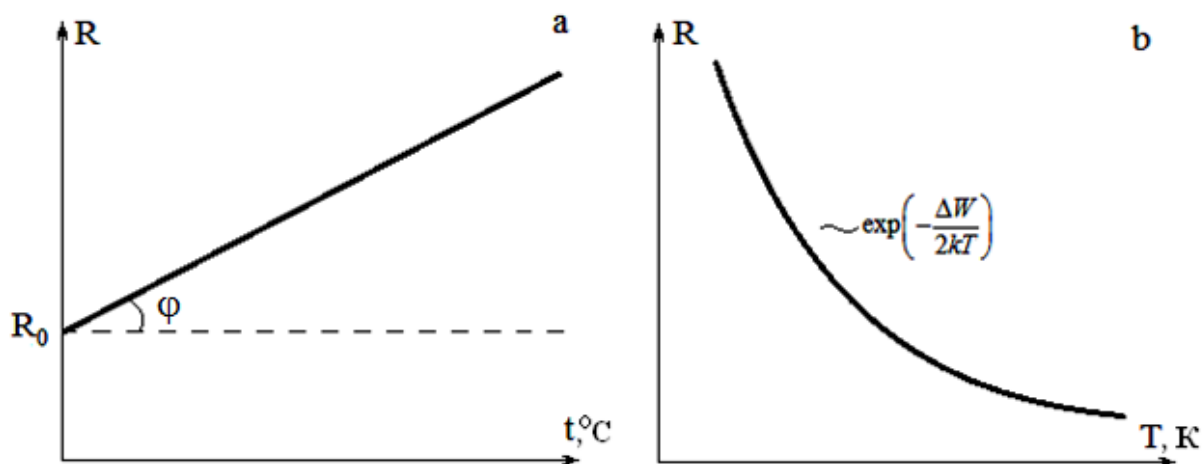


Рис. 3.6. Характерні залежності опору а) металу та б) напівпровідника від температури

$$\alpha = \frac{tg \varphi}{R_0}.$$

У напівпровідниках, як було зазначено вище, електропровідність зумовлена як рухом електронів, так і рухом «дірок». І оскільки ширина забороненої зони відносно невелика, то число носіїв, і як наслідок, провідність напівпровідника сильно залежить від температури і прикладеної напруги. Концентрація електронів та «дірок» у напівпровіднику росте з температурою за експоненціальним законом:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right),$$

де ΔW – енергія переходу електрона із валентної зони у зону провідності, T – температура тіла у градусах Кельвіна. Так як концентрація електронів та «дірок» росте по експоненті, то рухливість іонів не грає помітної ролі, і у результаті електропровідність напівпровідника росте з підвищенням температури практично також експоненціально. Як наслідок, опір, являючись величиною оберненою до провідності, зменшується (рис. 3.6b) при підвищенні температури за законом

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right).$$

Якщо прологарифмувати останній вираз $\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2kT}$ і побудувати графік залежності $\ln R$ від $1/T$, можна за нахилом цієї прямої визначити ширину забороненої зони ΔW напівпровідника:

$$\Delta W = 2k \cdot tg \psi.$$

Величину ΔW зручно представляти в еВ (електрон-вольтах). Для цього значення в Дж ділять на величину $1.6 \cdot 10^{-19}$.

Для визначення тангенса кута нахилу $tg\varphi$ та $tg\psi$ для підстановки в (1) та (2), на отриманих залежностях $R(t)$ для металу та $\ln R(1/T)$ для напівпровідника добудовують трикутник, в якому гіпотенузою є експериментальна крива. Тангенсом кута нахилу являється відношення вертикального катета до горизонтального (в масштабі).

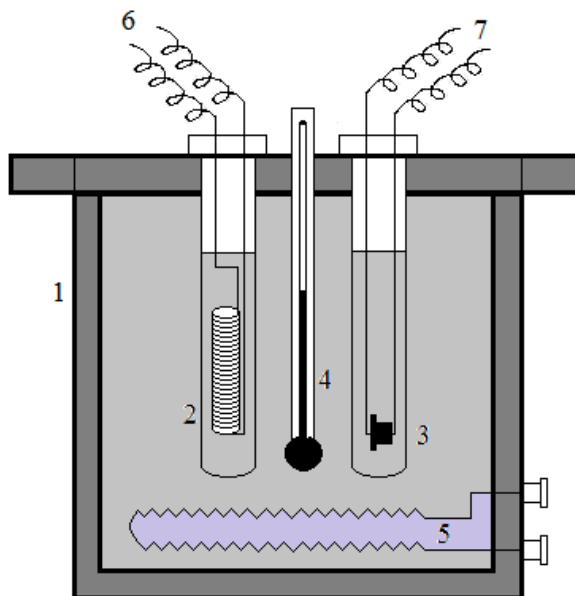


Рис. 3.7. Мікротермостат з досліджуваними зразками: 1 – мікротермостат, 2 – металевий дріт, 3 – напівпровідниковий опір, 4 – термометр, 5 – електронагрівач, 6 – дроти до мостової схеми, 7 – дроти до омметра

Зразки, опір яких вимірюється, поміщують у мікротермостат (рис. 3.7). Термостат для нагрівання зразків представляє собою водяну ванну, в яку в двох пробірках окремо поміщують моток мідного дроту і напівпровідниковий опір. В нижній частині ванни міститься електричний нагрівник, що є складовою частиною мікротермостата. Температуру води в ванні регулюють за допомогою термометру. Кінці металевого дроту та напівпровідникового опору приєднані до омметрів (рис. 3.8).

Порядок виконання роботи:

1. Перш ніж ввімкнути мікротермостат, необхідно ознайомитися з його будовою. Опір металевого дроту і напівпровідника вимірюється за допомогою омметрів.
2. Вимірювання виконати при температурах 30, 40, 50, 60, 70 та 80°C.
3. Дані занести у таблицю:

$t, ^\circ\text{C}$	30	40	50	60	70	80
R (дріт)						
R (напівпровідник)						
$\ln R$ (напівпровідник)						
$1/T, 1/K$						

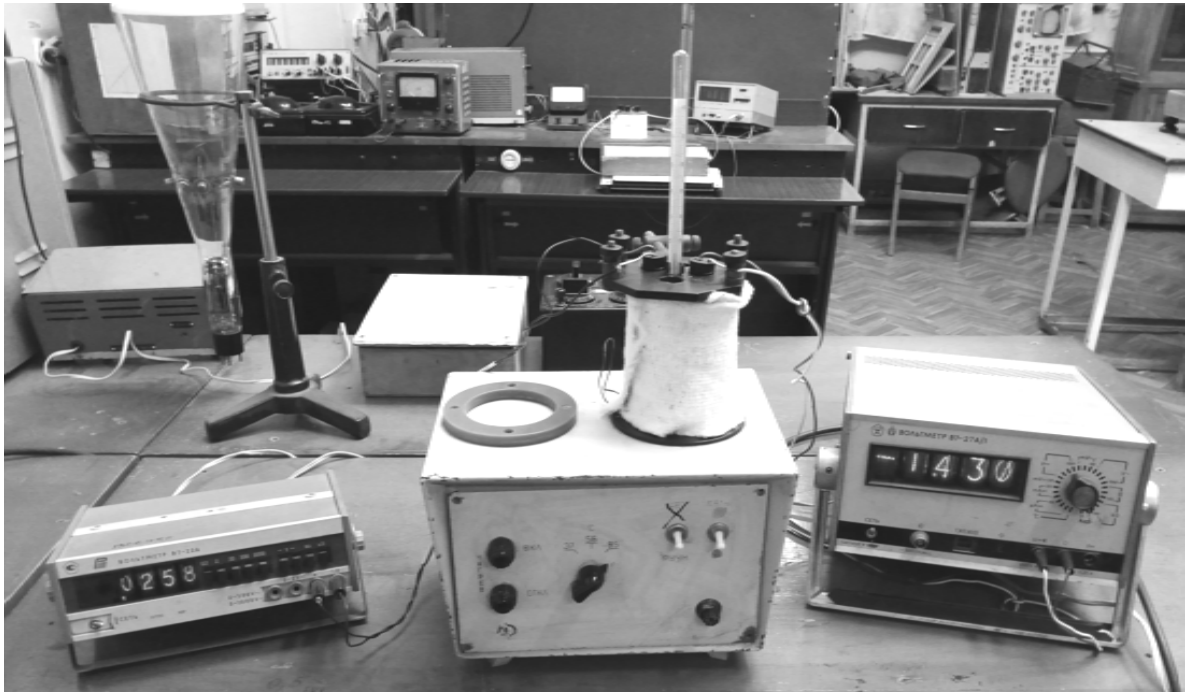


Рис. 3.8. Експериментальна установка

5. Побудувати на міліметровому папері графік залежності R від t для дроту і $\ln R$ від $1/T$ для напівпровідникового опору.
6. Із графіків визначити температурний коефіцієнт опору α і енергію забороненої зони напівпровідника ΔW (в еВ).

Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується використання набору фотознімків показів омметрів при різних температурах води в термостаті. Пе-



№ варіанта	Досліди
1	1, 3, 5, 7, 9
2	2, 4, 6, 8, 10
3	3, 5, 7, 9, 11
4	2, 3, 4, 5, 6
5	5, 6, 7, 8, 11
6	1, 4, 6, 8, 10

**Рис. 3.9. Для визначення одиниць
вимірювання опору металу (зверху)
та напівпровідника (знизу)**

ред заповнення таблиці результатів необхідно, в першу чергу, зрозуміти, що саме показують омметри (рис. 3.9). Червоними стрілками показано одиниці вимірювання отриманих значень.

Посилання на матеріали:

Дослід	Посилання
1	https://drive.google.com/file/d/1VZ6QYwWDxU9WvnAfv4cQ8J3oRYpvsH2J/view?usp=sharing
2	https://drive.google.com/file/d/196cdFFrYXxICMiVStoHvfghg80h6dxg/view?usp=sharing
3	https://drive.google.com/file/d/1hFtC3xhPrC_Cdm9c--71KBJDJlyHsQn/view?usp=sharing
4	https://drive.google.com/file/d/17umKxUL_I_17p8Rn7xXoGWpZ25haS3fj/view?usp=sharing
5	https://drive.google.com/file/d/1I6BvOORL5orRfZV4mz5eQGy5jRw72OLD/view?usp=sharing
6	https://drive.google.com/file/d/1QtuzYhRFZyWYRwDle3N9FTVnMB137IsR/view?usp=sharing
7	https://drive.google.com/file/d/1BJjVmGNqSqL0vsNLSbBDPWfFbA5Ifbgd/view?usp=sharing
8	https://drive.google.com/file/d/1a87PGhiLIRTjVjvw1HGeWp7nUyfac0MD/view?usp=sharing
9	https://drive.google.com/file/d/1EGKuesI_QA3DxlyMC2PYr_IJnouthfyJ/view?usp=sharing
10	https://drive.google.com/file/d/1CAOVFlaXgx67oBYKOcRBNcvnVtkv4iF5/view?usp=sharing
11	https://drive.google.com/file/d/1pEPH7niPgpsOys0kUC3cFJXqHji4cnEz/view?usp=sharing



Рис. 3.10. Приклад фото одного з експериментів

На рис. 3.10. показано приклад зображення одного з експериментів. На фото можна визначити температуру по показникам термометра з термостату, а також відповідні значення опорів металевго дроту та напівпровідника по показам омметрів. **Увага.** Знак мінус в значенні омметра для опору напівпровідника не потрібно враховувати.

Таблицю в п. 3 порядку виконання роботи заповнювати для 5 значень температур в дослідях вибраного варіанту.

Контрольні питання:

1. У чому різниця між провідниками, напівпровідниками і діелектриками з точки зору зонної теорії?
2. Чому електрони нижніх енергетичних зон не можуть приймати участь у переносі заряду?
3. Що таке електронна і діркова провідність у напівпровідниках?
4. Чому опір металів росте з підвищенням температури?
5. Як залежить опір напівпровідника від температури?

Лабораторна робота № 3.3

Перевірка закону Ома для кола змінного струму

Мета роботи: експериментальним шляхом, використовуючи закон Ома, визначити повний опір в колі змінного струму і порівняти його з розрахованим теоретично. Визначити коефіцієнт самоіндукції котушки та ємність конденсатора.

Обладнання: котушка індуктивності з індуктивністю 107,7 мГн і опором 10,5 Ом, два конденсатора по 10 мкФ, реостат, амперметр змінного струму до 0,5 А, вольтметр змінного струму до 100 В, ключ, лабораторний автотрансформатор (ЛаТр).

Розглянемо як пов'язані струм і падіння потенціалів на активному опорі, конденсаторі і котушці індуктивності в колі змінного струму.

Активний опір. Якщо до кінців провідника з активним опором R подати змінну напругу, величина якої в кожний момент часу змінюється з часом t згідно рівнянню

$$U_R = U_{R0} \sin \omega t ,$$

де U_{R0} – амплітуда, а ω – кругова частота, то в ньому виникає струм, сила якого визначається згідно закону Ома

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_{R0}}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t , \quad \text{де } I_0 = \frac{U_{R0}}{R} .$$

Конденсатор. Розглянемо електричне коло, що містить конденсатор. Якщо конденсатору надати заряд q , то різниця потенціалів між його обкладинками приймає значення U_C , яке визначається із співвідношення $q = CU_C$, де C – коефіцієнт пропорційності, який називається електроємністю. Він є геометричним параметром і залежить від середовища, що заповнює простір між електродами. Конденсатор, ввімкнутий в мережу постійного струму, створює розрив в мережі. При ввімкненні конденсатора в мережу змінного струму розриву мережі не буде, так як вона замикається струмами зміщення.

Нехай до конденсатора прикладена синусоїдальна напруга

$$U_C = U_{C0} \sin \omega t ,$$

де U_{C0} – амплітудне значення напруги.

Тоді заряд конденсатора в будь-який момент часу $q = CU_{C0} \sin \omega t$. За означенням сила струму є заряд, що протікає за одиницю часу: $I = \frac{dq}{dt}$, тоді сила струму змінюється з часом згідно

$$I = \omega CU_{C0} \cos \omega t = \omega CU_{C0} \sin(\omega t + \pi/2).$$

Звідси видно, що коливання струму випереджують коливання напруги по фазі на $\pi/2$. Величина $I_0 = \omega CU_{C0}$ являє собою амплітудне значення струму. Запишемо його так, щоб можна було порівняти з законом Ома:

$$I_0 = \frac{U_{C0}}{Z_C}, \quad Z_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Величина Z_C називається ємкісним опором. Якщо ємність C вимірюється в фарадах, а **кругова частота** $\omega = 2\pi\nu$, де ν – частота в герцах, то Z_C вимірюється в омах.

Котушка індуктивності. Розглянемо електричне коло, що містить котушку і джерело змінної напруги U_L . В котушці при проходженні змінного струму

$$I = I_0 \sin \omega t$$

виникає ЕРС самоіндукції, що дорівнює $E_s = -L \frac{\partial I}{\partial t}$. Якщо омичний опір котушки малий, то $R = 0$, то згідно другого правила Кірхгофа (що також виконується і для змінних струмів) $U_L + E_s = 0$. Тобто падіння напруги на котушці $U_L = -E_s$. Використовуючи останню рівність, знаходимо:

$$U_L = \omega LI_0 \cos \omega t = U_{L0} \sin(\omega t + \pi/2).$$

Видно, що коливання напруги на котушці випереджають коливання струму по фазі на $\pi/2$. Максимальне падіння напруги $U_{L0} = \omega LI_0$ представляється як

$$U_{L0} = I_0 Z_L, \quad Z_L = \omega L.$$

Величину Z_L називають індуктивним опором. Якщо індуктивність L вимірювати в генрі, то Z_L отримаємо в омах.

Послідовне з'єднання активного опору, конденсатора і котушки.

Визначимо повний опір електричного кола, що містить послідовно з'єднані опір R (активний опір), ємність C і індуктивність L (рис. 3.11), що створюють так звані реактивні опори $Z_C = \frac{1}{\omega C}$ і $Z_L = \omega L$.

Якщо електричне коло містить тільки активний опір, то коливання напруги і струмів будуть співпадати за часом. При наявності в ланцюзі ємності напруга на конденсаторі відстає від струму по фазі на $\pi/2$, а при наявності індуктивності напруга на котушці випереджає струм на $\pi/2$. При послідовному з'єднанні сумарна напруга являється арифметичною сумою падінь напруг на кожному з елементів. Для знаходження результуючої напруги зазвичай використовують векторну діаграму.

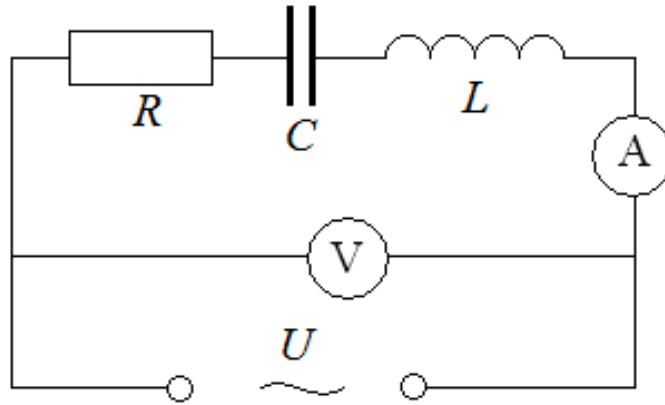


Рис. 3.11. Блок-схема установки для перевірки закону Ома для кола змінного струму

Візьмемо в якості прямої, від якої відраховується початкова фаза, вісь струмів. Сумарну напругу U представимо вектором, що дорівнює сумі векторів U_R , U_C і U_L . Довжина векторів дорівнює амплітудним значенням відповідних напруг, а напрямки векторів визначається їх фазами по відношенню до вісі струмів (рис. 3.12). Із діаграми видно, що

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad \text{або} \quad I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}.$$

Ця формула називається **законом Ома для змінного струму**. Із формули випливає, що повний опір кола

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Зсув фаз φ в ланцюзі між струмом і напругою визначається з діаграми:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

В закон Ома входять амплітудні значення струму і напруги. Але електро-

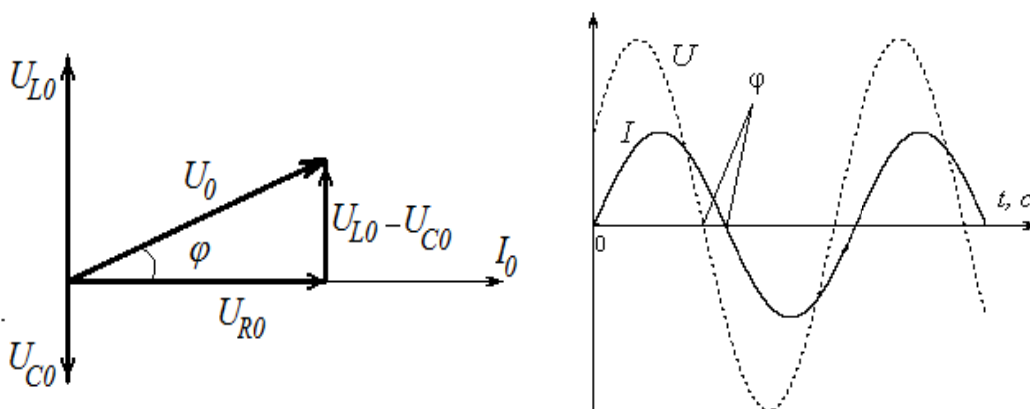


Рис. 3.12. Векторна діаграма для послідовного з'єднання опору конденсатора і котушки індуктивності в колі змінного струму

вимірювальні прилади визначають не амплітудні, а ефективні значення U_{ef} і I_{ef} . Під **ефективним струмом** I_{ef} розуміють силу постійного струму, що виділяє в провіднику за певний проміжок часу таку ж кількість тепла, як і змінний струм, який ми розглядаємо. Можна показати, що $I_{ef} = I_0 / \sqrt{2}$. Аналогічно визначається ефективна напруга U_{ef} : $U_{ef} = U_0 / \sqrt{2}$. Тоді закон Ома для ефективних значень:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}.$$

Під R в формулах слід розуміти суму всіх активних опорів кола (в тому числі і котушки індуктивності). Якщо різниця потенціалів вимірюється безпосередньо на клеммах котушки, то R є опір однієї лише котушки.

Порядок виконання роботи

Завдання № 1. Перевірка закону Ома для кола змінного струму

1. Зібрати електричне коло по схемі на рис. 3.11.
2. За допомогою ЛаТру встановити величину струму і напруги в колі. При декількох значеннях ефективної сили струму виміряти відповідні значення ефективної напруги. Дані занести в таблицю.
3. Для кожного вимірювання розрахувати експериментальне значення повного опору за формулою $Z = \frac{U_{ef}}{I_{ef}}$ і знайти середнє значення.

4. Взяти значення використаних в роботі опору R , індуктивності L котушки і електроємності C конденсатора у лаборанта. Розрахувати теоретичне значення повного опору за формулою $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$. Для визначення кругової частоти необхідно знати частоту струму. Якщо струм беруть з міської мережі, то $\nu = 50$ Гц.

5. Розрахувати зсув фаз φ між струмом і напругою: $\varphi = \arctg \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right)$.

6. Визначити похибку вимірювань експериментально отриманого значення, зрівняти його з теоретичним.

Завдання № 2. Визначення коефіцієнта самоіндукції котушки з залізною серцевиною

1. Від'єднати в попередній схемі (рис. 3.11) конденсатор. В котушку вставити залізну серцевину.

2. При декількох значеннях ефективної сили струму виміряти відповідні значення ефективної напруги. Розрахувати середнє значення повного опору кола Z .
3. Знаючи опір котушки розраховують індуктивність за формулою

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}.$$

4. Розрахувати зсув фаз ϕ між струмом і напругою $\phi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$.
5. Повторити вимірювання при наявності залізного сердечника всередині котушки. Зробити висновки.

Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується використання відеофайлів.

Завдання 1. Перевірка закону Ома для кола змінного струму

На кожному відео для кола змінного струму, що складається з послідовного з'єднання опору ($R = 10.5 \text{ Ом}$), індуктивності ($L = 107.7 \text{ мГн}$) та ємності ($C_1 = 10 \text{ мкФ}$ чи $C_2 = 20 \text{ мкФ}$), необхідно визначити при трьох значеннях ефективної напруги відповідні значення ефективної сили струму (рис. 3.13).

Необхідно виконаними п.3-6 порядку виконання роботи.

Посилання на відеоматеріали:

Варіант	Елементи	Посилання
1	RLC_1	https://drive.google.com/file/d/1c8z8aGAcgmKaz9hcQ2rIjyydbFPYgxAe/view?usp=sharing
2	RLC_2	https://drive.google.com/file/d/1bsMKVdmCjGIO4EKIEjL1vGBjDnaArbXU/view?usp=sharing
3	RLC_1	https://drive.google.com/file/d/1vYD5bgM7abanF1t7IrchEmv4guPRzwFL/view?usp=sharing
4	RLC_2	https://drive.google.com/file/d/1wXigJXt7mhu-Aw-qsyVICGG8kKqlx35C/view?usp=sharing
5	RLC_1	https://drive.google.com/file/d/1XeAB3cirJFIBGrMpg5OE2HNcXK19FhPU/view?usp=sharing
6	RLC_2	https://drive.google.com/file/d/1ViiHrUe_m-ObHrE9MF7eWSjrYllcTyKk/view?usp=sharing



Рис. 3.13. Приклади показів вольтметра і амперметра з відеофайлу

Завдання 2. Визначення коефіцієнта самоіндукції котушки з залізною серцевиною

На кожному відео для кола змінного струму, що складається з послідовного з'єднання опору ($R = 10.5 \text{ Ом}$), індуктивності необхідно визначити при трьох значеннях ефективної напруги відповідні значення ефективної сили струму. Необхідно виконаними п. 2-5 порядку виконання роботи.

Посилання на відеоматеріали:

Варіант	Посилання
1	https://drive.google.com/file/d/1bs6r6kroMLvOO9Ujx0mJhb2gcrqxWXzM/view?usp=sharing
2	https://drive.google.com/file/d/19db4rhHWXbOY2kd4ECrV161hWqwKppxa/view?usp=sharing
3	https://drive.google.com/file/d/1foTQFeb_Uh8ZCoWV-Lr5zoILsF7jKl-w/view?usp=sharing
4	https://drive.google.com/file/d/1dAyNiHKvnURkr6oM965eutUmlfRhq716/view?usp=sharing
5	https://drive.google.com/file/d/12JVhbqkVlFZm58sX7CACt9TwTH-Bf4cH/view?usp=sharing
6	https://drive.google.com/file/d/1bs6r6kroMLvOO9Ujx0mJhb2gcrqxWXzM/view?usp=sharing

Контрольні питання:

1. Дайте визначення ємкісного і індуктивного опорів. Чим принципово відрізняється активний опір від реактивного?
2. Яке співвідношення між фазами струму і напруги на ємкісному і індуктивному опорах?
3. Поясніть закон Ома для кола змінного струму.
4. При якій умові в мережі, що містить ємкість і індуктивність, зсув фаз між струмом і напругою буде дорівнювати нулю?
5. Що таке ефективне значення сили струму і напруги?

Лабораторна робота № 3.4

Визначення ємності конденсатора за допомогою мостової схеми Сотті

Мета роботи: ознайомитися з мостовим методом вимірювання ємності конденсатора та перевірити відомі формули для ємності послідовно і паралельно з'єднаних конденсаторів.

Обладнання: джерело струму Б76 з напругою 12.6 В та частотою 50 Гц, вольтметр ВЗ-33 до 300 В з точністю до 0.01 В, реохорд з опором 110 Ом, еталонний конденсатор з ємністю 2 мкФ, два конденсатора з невідомою ємністю, з'єднувальні дроти.

Для визначення ємності конденсатора використовується та обставина, що конденсатор, включений в електричне коло змінного струму, утворює в ньому певний опір. Опір конденсатора (Z_c) пов'язаний з його електроємністю (C) і частотою (ω) змінного струму:

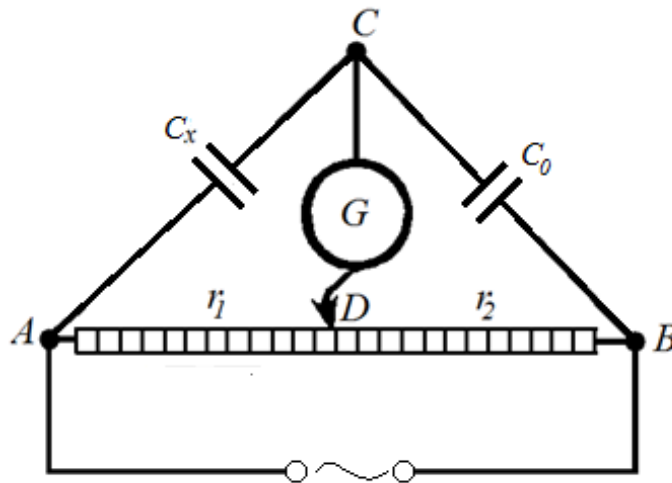


Рис. 3.14. Мостова схема для визначення ємності конденсатора

$$Z_c = \frac{1}{\omega C}.$$

Це дозволяє задачу визначення ємності конденсатора фактично звести до задачі визначення опору конденсатора.

Відомо, що одним з найпростіших методів визначення опору являється використання мостової схеми. Ця схема дозволяє проводити порівняння опорів, включених в плечі моста. В даній задачі використовується мостова схема (міст Сотті), в якій в одне плече підключена невідома ємність C_x , в друге – відома ємність C_0 (рис. 16). Третє і четверте плече складають опори плеч дрютяного реохорда.

Для того, щоб в мості (стрілочний гальванометр) не було струму, необхідно, як і завжди у випадку змінного струму, щоб напруги на кінцях моста були рівні і по амплітуді, і по фазі. Ці дві умови виконуються одночасно, якщо опори плечей мостової схеми утворюють пропорцію (для змінних струмів можна використати аналогічний підхід для постійних струмів, як в лабораторній роботі № 3.1):

$$\frac{Z_{C_x}}{r_1} = \frac{Z_{C_0}}{r_2}.$$

Підставляючи значення опорів конденсаторів, знаходимо співвідношення між ємностями і опорами, коли струм на ділянці CD дорівнює нулю ($I_g=0$):

$$C_x = C_0 \frac{r_2}{r_1}.$$

Виходячи з того, що опори r_1 и r_2 являються відрізками реохорда, відношення опорів заміняють на відношення відповідних довжин реохорда L_1 и L_2 (AD и DB):

$$C_x = C_0 \frac{L_2}{L_1}.$$

Відносна похибка вимірювання таким методом дорівнює:

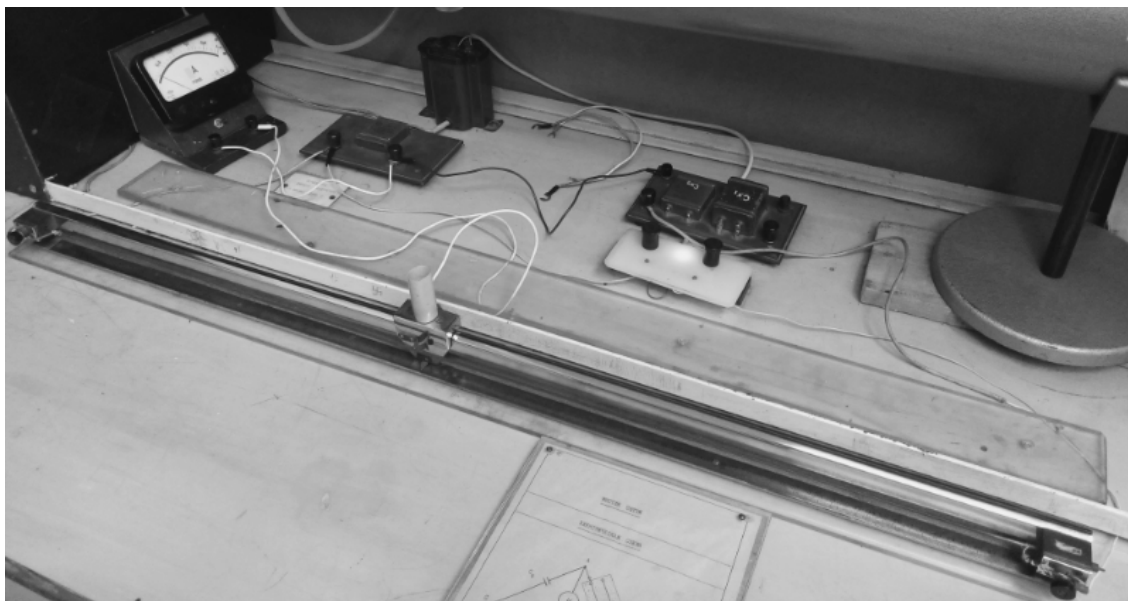


Рис. 3.15. Експериментальна установка

$$\delta = \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2} = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \Delta L,$$

де $\Delta L = \Delta L_1 = \Delta L_2$ – похибка вимірювання довжини (при використанні міліметрової лінійки вона дорівнює 1 мм).

Порядок виконання роботи:

1. Скласти електричне коло (рис. 3.15) по схемі на рис. 3.14. В якості невідомого конденсатора підключити будь-який з двох невідомих. Поставити рухомий контакт D на середину реохорда. Границю вимірювання гальванометра поставити на максимальне значення (300 В).
2. Ввімкнути джерело живлення. Рухаючи, якщо потрібно, контакт D вздовж реохорда досягти близького до нульового положення стрілки гальванометра. Поступово зменшуючи границю вимірювання гальванометра до 1-3 В, коректувати положення контакту D на реохорді. Виміряти відповідні довжини і розрахувати ємність конденсатора. Для перевірки повторити декілька разів.
3. Повторити вимірювання для другого конденсатора, а також для паралельного і послідовного з'єднань першого і другого конденсаторів. Не забудьте! Границю вимірювання гальванометра перед кожним новим вимірюванням необхідно поставити на максимальне значення (300 В). Розрахувати похибки вимірювань.
4. Експериментальні значення порівняти з відомими формулами для ємності паралельного і послідовного з'єднання конденсаторів:

$$C_{\text{парал}} = C_1 + C_2 \quad \text{і} \quad C_{\text{послід}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

5. Зробіть висновки.

Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується обробка результатів вимірювання (п.1.-3 порядку виконання) для двох невідомих конденсаторів.

Проглянути процедуру вимірювання можна за посиланням:

<https://drive.google.com/file/d/1Vv2dH8AuOx6g5XnhwL28WhismQYzBIW3/view?usp=sharing>

При виконанні розрахунків вважати, що $C_0 = 2,0$ мкФ, $L_1 + L_2 = 100$ см, $\Delta L = 0,5$ см.

Варіанти для самостійного виконання

Варіант	Підключення C_{x1}	Підключення C_{x2}	Паралельне з'єднання C_{x1} та C_{x2}	Послідовне з'єднання C_{x1} та C_{x2}
1	$L_2 = 41.0$ см	$L_2 = 55.5$ см	$L_2 = 66.0$ см	$L_2 = 31.0$ см
2	$L_2 = 37.5$ см	$L_2 = 60.0$ см	$L_2 = 67.5$ см	$L_2 = 30.0$ см
3	$L_2 = 43.0$ см	$L_2 = 33.0$ см	$L_2 = 55.5$ см	$L_2 = 23.0$ см
4	$L_2 = 43.0$ см	$L_2 = 55.5$ см	$L_2 = 66.5$ см	$L_2 = 32.0$ см
5	$L_2 = 33.5$ см	$L_2 = 55.5$ см	$L_2 = 63.5$ см	$L_2 = 26.5$ см
6	$L_2 = 60$ см	$L_2 = 52.5$ см	$L_2 = 72.0$ см	$L_2 = 39$ см

Контрольні питання:

1. Які типи конденсаторів ви знаєте?
2. Що називається ємністю конденсатора? Від чого вона залежить? Як залежить електроємність від хімічних властивостей речовини, яка знаходиться між пластинками конденсатора? Чому дорівнює енергія конденсатора?
3. Чому через конденсатор не може проходити постійний струм? Як опір конденсатора залежить від частоти змінного струму і електроємності?
4. Виведіть формули для паралельного і послідовного з'єднань конденсаторів.
5. В яких приладах для дослідження фізико-хімічних властивостей та фазових переходів речовини використовується мостова схема Сотті?

Лабораторна робота № 3.5

Визначення періоду дифракційної ґратки

Мета роботи: Визначити, використовуючи параметри спектральних ліній атома ртуті, період дифракційної ґратки по дифракційному спектру. Розрахувати основні характеристики ґратки: період d , число штрихів N на 1 мм.

Обладнання: джерело світла – ртутна лампа, блок живлення для ртутної лампи, дифракційні ґрати, гоніометр.

Прозорі дифракційні ґратки є сукупність великої кількості паралельних, дуже близько розташованих один до одного щілин, розділених непрозорими проміжками. Такі ґратки можна отримати, якщо на скляну пластину ділильною машиною нанести ряд паралельних штрихів, залишивши непошкодженими вузькі смужки скла. Подряпини розсіюють світло і непрозорі, непошкоджені ділянки скла грають роль щілин.

Якщо через a позначити ширину щілини, а через b – ширину непрозорого проміжку, то величину $d = a + b$ називають **періодом** або сталою дифракційної ґратки.

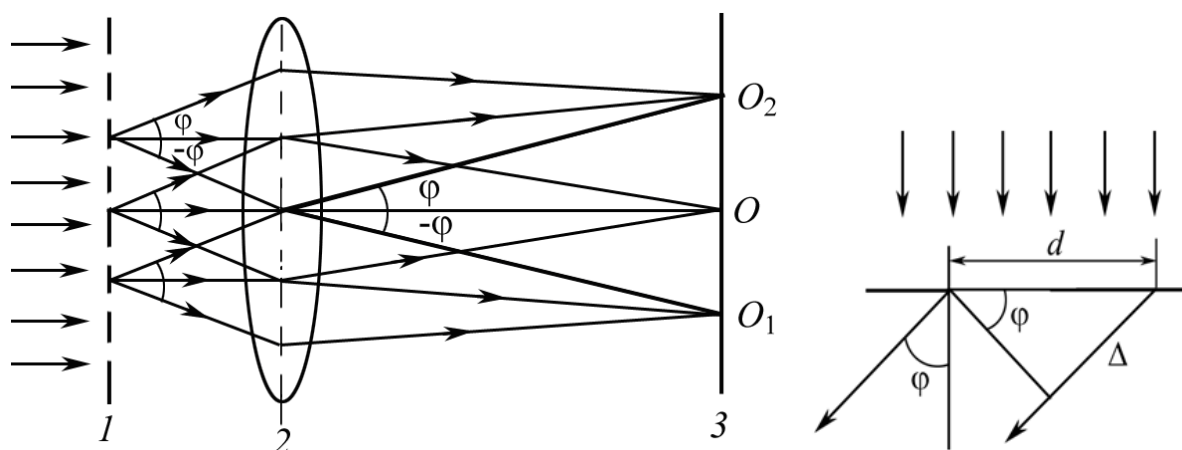


Рис 3.16. Проходження променів крізь дифракційну ґратку
1 – дифракційна ґратка, 2 – лінза, 3 – екран

Нехай на дифракційні ґрати (рис. 3.16), що має N штрихів, падає нормально до її поверхні плоска монохроматична хвиля з довжиною хвилі λ . Ґратами вона розбивається на N вторинних хвиль, які за **принципом Гюйгенса-Френеля** (фізичний принцип, згідно з яким будь-яка точка простору, якої досягла хвиля, є джерелом вторинних хвиль, що розповсюджуються у всіх напрямках) когерентні і можуть інтерферувати. Щоб спостерігати інтерференційну картину, треба лінзою (рис. 3.16) звести ці хвилі в певні точки екрану, розташовані у фокальній площині лінзи. При цьому слід врахувати, що основна частина випромінювання розповсюджується в первинному напрямі і збирається лінзою в її головному фокусі O , але в результаті дифракції частина променів відхиля-

ється від первинного напрямку, наприклад на кут φ , і збирається лінзою в побічних фокусах O_1 і O_2 .

Результат інтерференції визначається **різницею фаз δ** або **різницею ходу Δ** коливань, що складаються. Як видно з рис.3.16b, різниця ходу від сусідніх щілин рівна $\Delta = d \sin\varphi$, де φ – кут дифракції. Знаючи різницю ходу, можна знайти різницю фаз із співвідношення $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$. З теорії коливань відомо, що для тих

напрямів, для яких в різниці ходу укладається ціле число довжин хвиль $\Delta = k\lambda$, виникають максимуми інтенсивності, які називають головними, і тоді основна формула для дифракційних ґрат має вигляд

$$d \cdot \sin\varphi = k\lambda, \quad (1)$$

де k набуває значень: $k = 0, \pm 1, \pm 2, 3 \dots$ і називається **порядком максимуму**.

На рис. 3.17 показаний розподіл освітленості у фокальній площині лінзи від дифракційних ґрат. Вся інтерференційна картина має вид вузьких світлих смуг, розділених темними широкими проміжками.

Зі збільшенням порядку максимуму величина головних максимумів знижується. Це відбувається через те, що в бічних напрямках щілини посиляють менше світла.

З формули (1) слідує, що якщо решітка освітлюється білим світлом, то відбудеться розкладання їх у спектр. При заданому значенні k максимуми для різних довжин хвиль одержуються під різними кутами φ . При $\varphi = 0$ виникає максимум нульового порядку для всіх довжин хвиль, який є зображенням щілини у

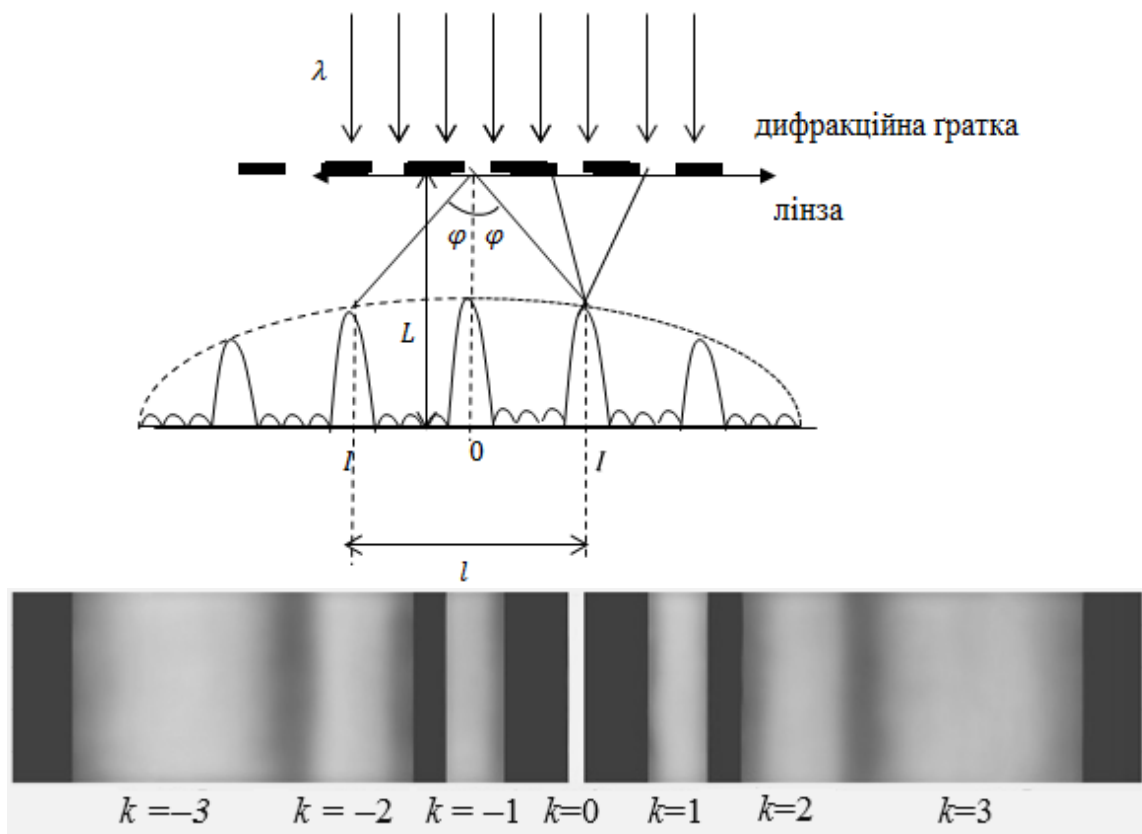


Рис. 3.17. Розподіл освітленості у фокальній площині

вигляді смуги білого світла. По обидва боки від нього розташовуватимуться спектри відповідних порядків. У кожному спектрі максимуми коротших довжин хвиль знаходяться ближче до нульового максимуму. Максимуми для довших хвиль далі від нього. На цьому засноване використання дифракційних решіток у спектроскопії, де необхідні розкладання у спектр та вимірювання довжини хвилі.

Основними характеристиками дифракційних ґрат, що визначають якість спектру, є дисперсія і роздільна здатність.

Кутова дисперсія D_φ визначає кутову відстань $d\varphi$ між спектральними лініями λ і $\lambda + d\lambda$, тобто

$$D_\varphi = d\varphi/d\lambda.$$

Ця величина виражається в рад/нм і визначає ширину спектру. Вираз для D_φ можна отримати, якщо продиференціювати (1) по λ при $k = \text{const}$

$$D_\varphi = \frac{k}{d \cos \varphi}. \quad (2)$$

Лінійна дисперсія D_l визначає лінійну відстань dl у фокальній площині лінзи між лініями спектру λ і $\lambda + d\lambda$, тобто

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda}.$$

Для малих кутів $d\varphi$ можна dl визначити як $dl = F d\varphi$, де F – фокусна відстань лінзи 2 (рис. 3.16). Тоді

$$D_l = F D_\varphi. \quad (3)$$

Здатність ґратки розділяти близькі спектральні лінії $\lambda_1 = \lambda$ і $\lambda_2 = \lambda + d\lambda$ визначається не тільки кутовою відстанню $d\varphi$ між ними (2), але і їх шириною $\delta\varphi$.

Якщо дифракційні максимуми розмиті і мають значну ширину, то навіть при порівняно великій кутовій відстані між ними результуюча крива інтенсивності, що виникає при їх накладенні, аналогічна кривою одиночного дифракційного максимуму. Отже, чим яскравіше спектральні лінії, тим більше близькі лінії можна побачити роздільно. **За міру роздільної здатності приймають величину**

$$R = \lambda/d\lambda \quad (4)$$

де $d\lambda$ – найменша різниця в довжинах хвиль λ_1 і λ_2 , λ – середнє значення довжина хвилі λ_1 і λ_2 . Величину R можна розрахувати з критерію Релея: дві близькі спектральні лінії вважаються дозволеними, якщо максимум однієї з них співпадає з першим мінімумом інший (рис. 3.18), тобто $d\varphi = \delta\varphi$. З цієї рівності можна отримати вираз для роздільної здатності ґратки

$$R = k \cdot N \quad (5)$$

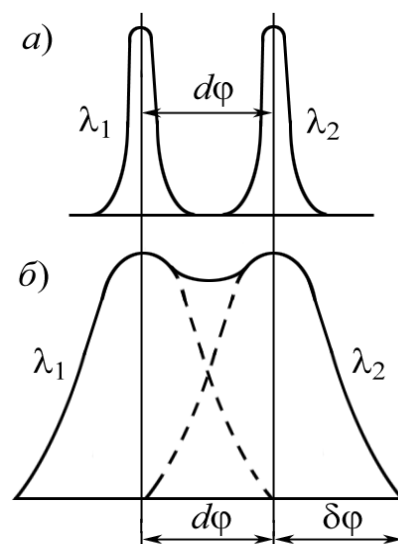


Рис. 3.18. До пояснення роздільної здатності

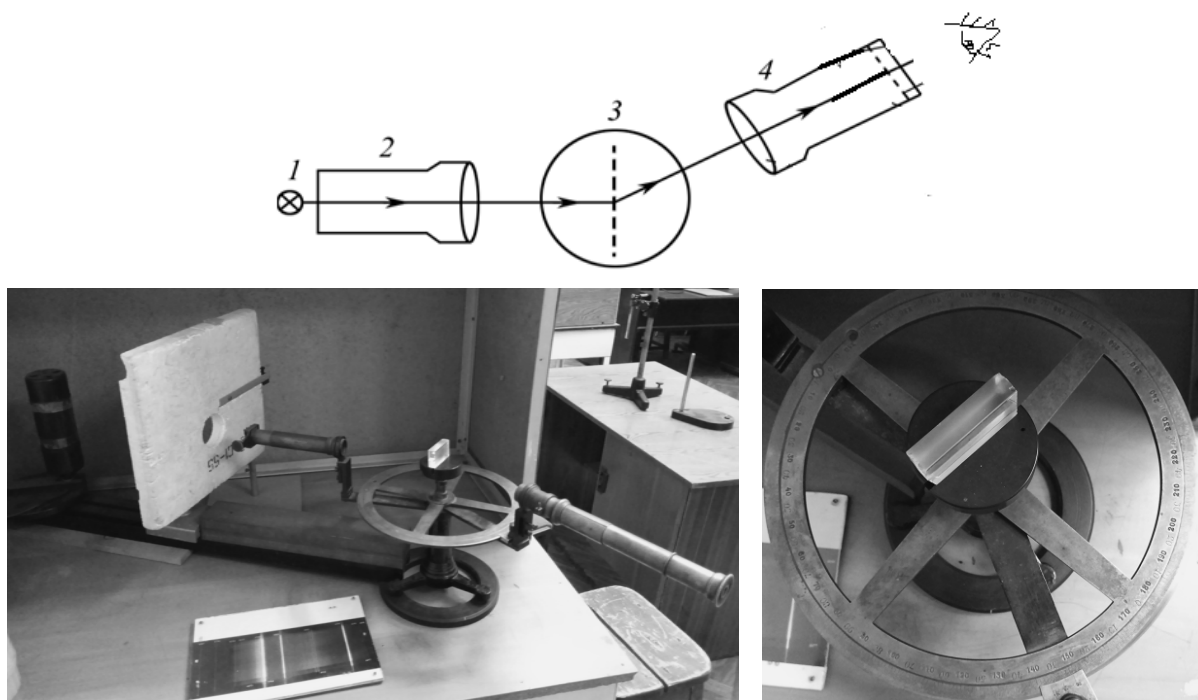


Рис. 3.19. Експериментальна установка: 1 – ртутна лампа, 2 – коліматор зі щілиною, 3 – гоніометр, 4 – зорова труба

де k – порядок максимуму; N – повне число штрихів ґратки.

Робота виконується на гоніометрі – приладі, призначеному для вимірювань кутів оптично-механічним методом.

Зорова труба закріплена на кронштейні гоніометра, який в свою чергу, може обертатися навколо осі, що проходить через центр тримача дифракційної решітки.

Порядок виконання роботи:

1. Ввімкніть ртутну лампу. Налаштуйте коліматор так, щоб регульована щілина, що знаходиться на корпусі освітлювача, знаходилася у фокальній площині збираючої лінзи. Помістіть на столик гоніометра дифракційну ґратку так, щоб її площа була перпендикулярна осі коліматора.
2. Поверніть зорову трубу і наведіть хрестоподібний вказівник в окулярі труби на білу лінію центрального максимуму (спектр нульового порядку);
3. Повертайте зорову трубу в цьому ж напрямі, проглянете і проведіть вимірювання кутів φ' для спектрів всіх порядків з одного боку від центрального максимуму. Поверніть до центрального максимуму.
4. Повертайте зорову трубу в цьому ж напрямі, проглянете і проведіть вимірювання кутів φ'' для спектрів всіх порядків з іншого боку від центрального максимуму.
5. Визначите кут дифракції $\varphi_k = |\varphi'_k - \varphi''_k|/2$ для всіх ліній спектру. Знайдіть по формулі (1) період дифракційної ґратки по кожній спектральній лінії. Пам'ятайте, що $1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$, $1\text{ мкм} = 10^{-6}\text{ м}$, $1\text{ Å} = 10^{-10}\text{ м}$. Дані занесіть в табл.
6. Розрахуйте число штрихів N в 1 мм дифракційної ґратки. Зробіть висновки.

Таблиця . Результати вимірювання

Лінія спек- тру	λ , Å	Поря- док спек- ру k	Положення труби		Кут дифракції φ_k	d , мкм
			$\varphi'_{до}$ <i>Зліва від центрального мак- симуму</i>	$\varphi''_{до}$ <i>Праворуч від центрального мак- симуму</i>		
(синій)		1				
(зелений)		1				
(жовтий)		1				
(червоний)		1				
(синій)		2				
(зелений)		2				
(жовтий)		2				
(червоний)		2				

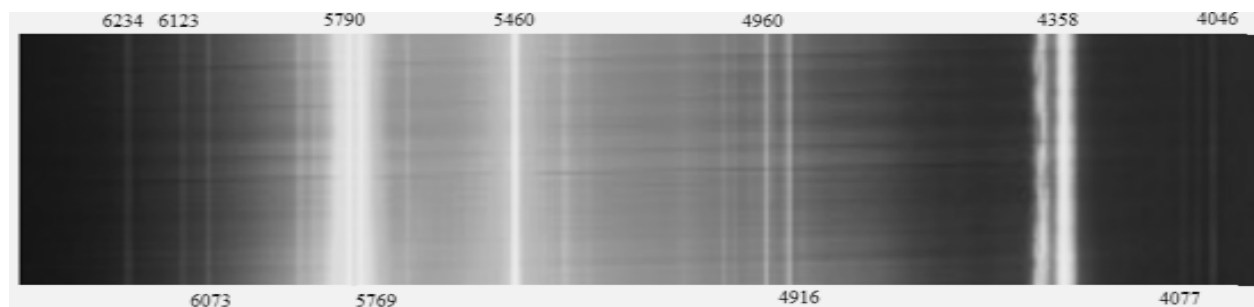


Рис. 3.20. Спектр ртуті зі значеннями довжин хвилі ліній в ангстремах (Å)

Варіанти для дистанційного виконання

Для дистанційного виконання роботи пропонується провести обробку результатів дифракції монохроматичного світла чотирьох довжин хвиль, що падає на деяку дифракційну ґратку з невідомим періодом (рис. 3.21).

Лінії відповідають лініям спектру ртуті (червоний, жовтий, зелений, синій). Відповідні значення довжин хвиль знаходимо з рис. 3.20.

Під кожним графіком надається ширина між головними максимумами y_m та відстань від лінзи до екрану. Ці значення можна використати для визначення $\sin\varphi \approx \tan\varphi = y_m/F$ (бо $y_m \ll F$).

Період ґратки розраховують по формулі (1).

Посилання на дані для кожного варіанту:

https://drive.google.com/file/d/16NkfkMc9igY7J9TgzVsOaDPfQF5_Rm7n/view?usp=sharing

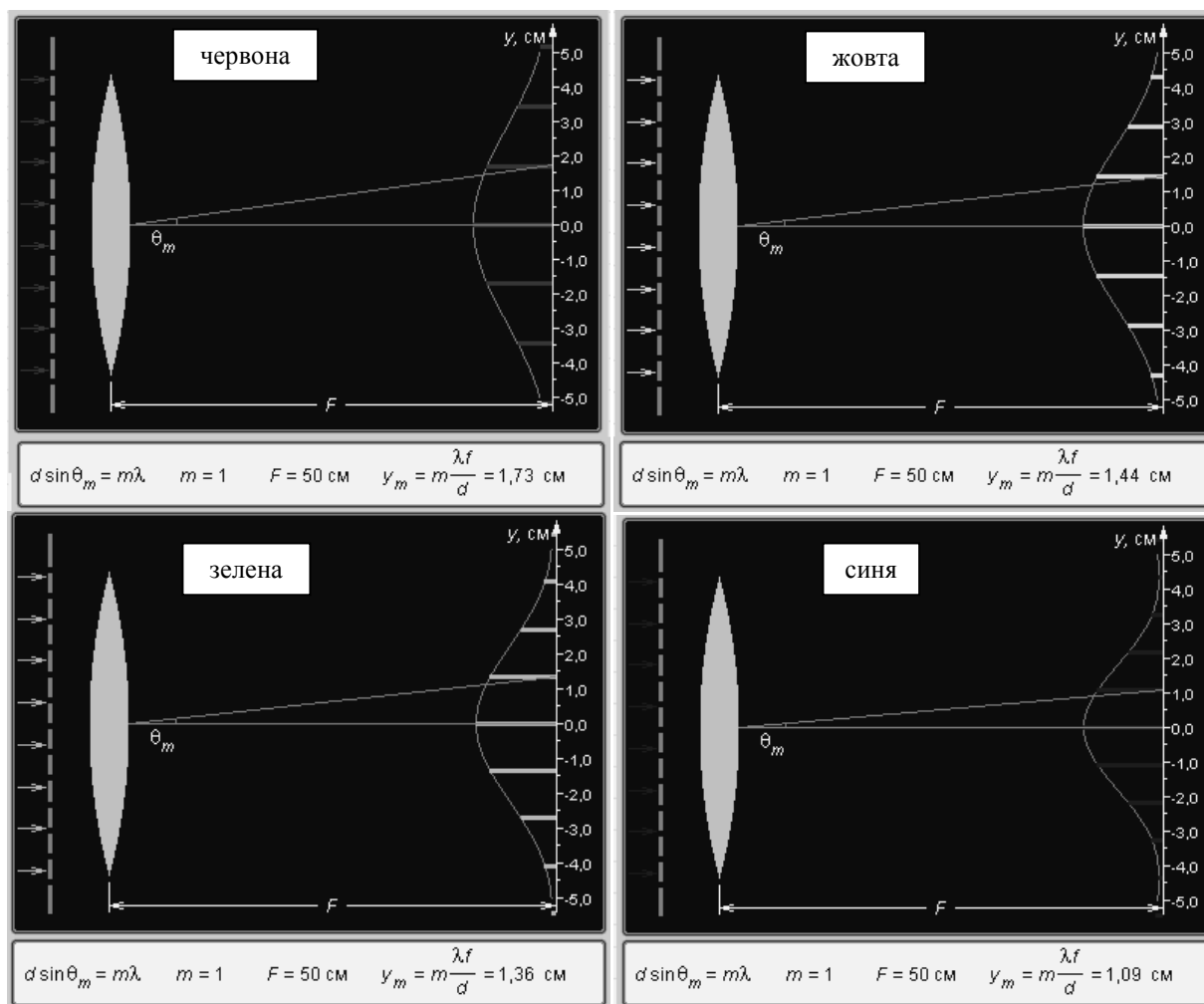


Рис. 3.21. Приклад варіанту для самостійної роботи

Контрольні питання

1. Чому дифракційні ґрати є дисперсійним приладом і як з її допомогою можна вивчати складні спектри?
2. Світло якої спектральної лінії решітки диспергує сильніше – фіолетовий чи червоний? Порівняйте спектр, отриманий за допомогою дифракційної решітки та скляної призми.
3. Дайте обґрунтування умовам головних максимумів, умовам головних мінімумів.
4. Якими способами можна визначити довжину світлової хвилі за допомогою дифракційних ґрат? Перерахуйте ці способи та наведіть приклади.
5. Яку величину називають роздільною здатністю дифракційної решітки, що вона характеризує та від яких параметрів решітки залежить?

Лабораторна робота № 3.6

Спектральний аналіз

Мета роботи: Познайомитись із явищем дисперсії світла. Побудувати градувальний графік для спектроскопа та провести спектральний аналіз невідомої речовини.

Обладнання: спектроскоп, ртутна лампа, газова лампа.

Емісійним, або атомним, спектральним аналізом називають метод дослідження елементного (якісного і кількісного) складу речовини за спектром випромінювання його атомів.

Спектри випромінювання атомів спостерігають на спеціальних оптичних приладах, поміщаючи досліджувані проби в такі джерела енергії, як газове полум'я, електрична дуга постійного чи змінного струму, високовольтна іскра тощо. При цьому відбувається випаровування та дисоціація досліджуваних речовин на атоми та іони, які і дають спектри випромінювання (емісійний спектр). Випускання світла атомами відбувається за рахунок зміни їхньої енергії. У незбудженому, тобто нормальному стані атоми мають мінімальну енергію E_0 . При підведенні енергії, наприклад, при зіткненні з електронами, що швидко летять, енергія яких достатня для збудження, атоми збуджуються, тобто переходять на більш високий енергетичний рівень.

Через дуже короткий час ($\sim 10^{-8}$ с) атом самовільно повертається в нормальний або будь-який більш низький збуджений стан. Енергія ΔE , що вивільнюється при цьому випромінюється у вигляді кванту світла:

$$\Delta E = h \cdot \nu, \quad (1)$$

де h – стала Планка.

Частота випромінювання (ν , с^{-1}) буде визначатися співвідношенням:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_{A^*} - E_A}{h} = \frac{E_{A^*}}{h} - \frac{E_A}{h}, \quad (2)$$

де E_{A^*} і E_A – енергія атома в збудженому і нормальному станах.

Сукупність випромінюваних частот пов'язані з енергетичними станами атома. Світло, випромінюване атомами, за допомогою спектрального приладу розкладається в спектр, що складається з набору окремих спектральних ліній

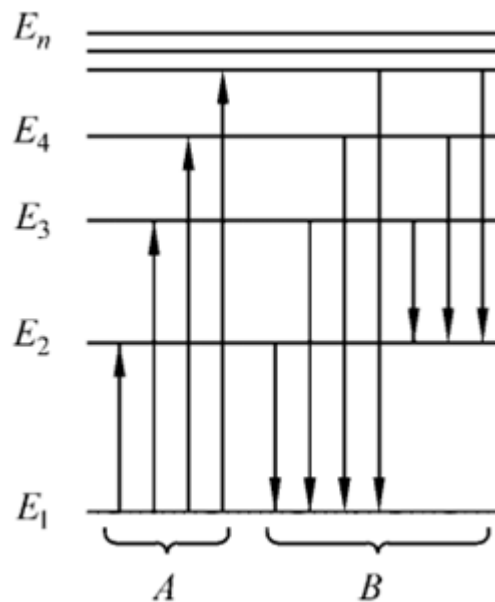


Рис. 3.22. Енергетичні рівні атома і переходи між рівнями, що супроводжуються поглинанням та випромінюванням квантів світла

(лінійчастий спектр). За характерними лініями у спектрі можна ідентифікувати елементи, що містяться в аналізованій речовині (якісний спектральний аналіз), а по відносним інтенсивностям спектральних ліній визначати концентрацію елемента в досліджуваному зразку (кількісний аналіз).

Основні вузли спектральних приладів. Кожен спектральний прилад має такі основні вузли: джерело збудження, диспергуючий елемент, пристрій, що реєструє. Крім цього, у будь-якому спектральному приладі є оптична система, призначена для одержання паралельного пучка світла, його фокусування, зміни ходу променів тощо.

Джерела збудження. Джерела збудження переводять пробу з конденсованої фази пароподібну, і збуджують речовину в пароподібній фазі. У більшості джерел збудження ці функції поєднуються. При спектральному аналізі газів потреба у першій операції відпадає. Збудження атомів відбувається головним чином при зіткненні з частинками, що швидко летять, найчастіше електронами.

Джерело збудження має забезпечувати необхідну яскравість спектра та бути досить стабільним. Найбільше застосування як джерела збудження отримали полум'я, електрична дуга та іскра.

Диспергуючий елемент. Диспергуючий елемент розкладає випромінювання у спектр. Це найважливіша частина спектрального приладу, значною мірою визначає його аналітичні можливості. Як диспергуючий елемент використовуються призми, дифракційні решітки та інтерференційні пристрої. Найбільшого поширення набули призмові та дифракційні спектральні прилади.

Призми виготовляють зі скла або кварцу, оскільки ці матеріали досить прозорі у широкій області довжин хвиль. Явище, що лежить в основі спектрального аналізу на призмах є дисперсія.

Дисперсія світла (розкладання світла) – це явище, обумовлене залежністю абсолютного показника заломлення речовини від частоти (або довжини хвилі) світла (частотна дисперсія), або, те саме, залежність фазової швидкості світла в речовині від довжини хвилі (або частоти) .

Показник заломлення середовища називається відношення швидкості руху світла у вакуумі до швидкості руху світла у цьому середовищі: $n = c/v$.

Один із найбільш наочних прикладів дисперсії – розкладання білого світла під час проходження його через призму (досвід Ньютона). Сутністю явища дисперсії є відмінність швидкостей поширення променів світла з різною довжиною хвилі в прозорому речовині – оптичному середовищі (тоді як у вакуумі швидкість світла завжди однакова, незалежно від довжини хвилі і кольору). Зазвичай (нормальна дисперсія), що більша частота світлової хвилі, то більше показник заломлення середовища для неї і тим менше швидкість хвилі:

– у світла червоного кольору швидкість поширення серед максимальна, а ступінь заломлення – мінімальна,

– у світла фіолетового кольору швидкість поширення серед мінімальна, а ступінь заломлення – максимальна.

Однак у деяких речовинах (наприклад у парах йоду) спостерігається **ефект аномальної дисперсії**, при якому сині промені заломлюються менше, ніж червоні, інші промені поглинаються речовиною і від спостереження вислизують.

Вона спостерігається практично у всіх газів на частотах поблизу ліній поглинання, однак у парів йоду вона досить зручна для спостереження в оптичному діапазоні, де вони дуже поглинають світло.

Реєструючі пристрої (приймачі світла). Як приймачі світла використовують око, фотопластинки та фотоелементи.

Можливості ока як вимірювального приладу дуже обмежені, тому що око чутливе до світла в області спектру приблизно від 400 до 700 нм. Різницю чи відношення світлових потоків очі оцінюють дуже приблизно. З достатньою точністю око встановлює лише рівність інтенсивностей світлових потоків одного кольору.

Якісний спектральний аналіз. Основою якісного спектрального аналізу є властивість атомів кожного хімічного елемента випромінювати характерний лінійний спектр. Завдання якісного спектрального аналізу зводиться до пошуку ліній обумовленого елемента у спектрі проби. Однак загальна кількість ліній у спектрі багатьох елементів дуже велика і досягає кількох сотень і тисяч (наприклад, у урану відомо понад 5000 ліній). Немає необхідності визначати довжини хвиль усіх спектральних ліній у спектрі проби. Для цілей якісного аналізу необхідно встановити наявність чи відсутності у спектрі так званих аналітичних або останніх ліній.

При зменшенні вмісту елемента в пробі інтенсивність ліній цього елемента в спектрі проби буде зменшуватися, деякі лінії зникнуть, і число ліній зменшиться. При якійсь дуже малій концентрації залишиться лише кілька ліній, які зникають останніми. Це і є останні лінії, якими зазвичай проводиться якісний аналіз. Останні лінії добре вивчені, їх довжини хвиль та інтенсивності можна знайти у спеціальних таблицях та атласах спектральних ліній. Розшифровують спектри та визначають довжину хвилі спектральних ліній за допомогою спектрів порівняння, найчастіше спектра ртуті або заліза, що має характерні групи ліній у різних областях довжин хвиль.

При проведенні якісного спектрального аналізу часто користуються спеціальними планшетами, на яких нанесені ділянки спектра ртуті або заліза та аналітичні лінії елементів із зазначенням довжин хвиль. Поєднуючи зображення спектра проби з лініями планшета, можна швидко отримати попередню інформацію про якісний склад зразка.

Спектральним аналізом якісно можна визначити понад 80 елементів.

Експериментальне устаткування. Світло від джерела S виходить з коліматора (дві лінзи L_1 і L_2) виходить паралельним пучком променів, які потрапляють на призму P . Призму спектроскопа встановлюють у такому положенні, щоб заломлені промені йшли практично паралельно площині, на якій вставлена призма. Світло потрапляє в окуляр, який фокусує їх у фокусній площині, де і отримують зображення спектра. У полі зору окуляра видно вказівну стрілку, яку можна навести на будь-яку лінію спектра за допомогою барабана, що повертає зорову трубу. На шкалі барабана є поділки, які дозволяють зафіксувати положення будь-якої лінії спектра.

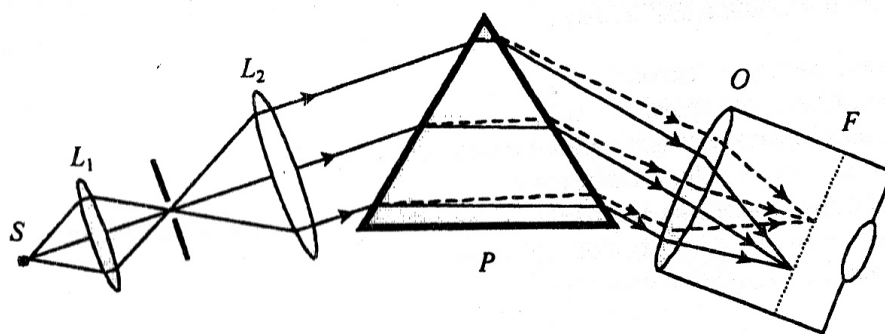


Рис. 3.23. Експериментальна установка для спектрального аналізу

Порядок виконання роботи

1. Перед спектроскопом розташовують ртутну лампу. Вмикають блок живлення лампи та направляють пучок променів на щілину спектроскопа. Через окуляр спостерігають за лінійним спектром ртуті. Наводять вказівну стрілку на кожну лінію спектра ртуті і на шкалі барабана фіксують поділку. Довжини хвиль ліній ртуті знаходять із таблиць чи рис. 3.24. Будують графік градування, тобто залежність довжини хвилі від значень на барабані.
2. Перед щілиною розташовують замість ртутної лампи іншу газорозрядну лампу з невідомим газом. Включають блок її живлення та спостерігають за спектром. Наводять по черзі на кожну лінію та фіксують відповідні поділки на барабані. За градувальним графіком визначають довжини хвиль цих ліній. Користуючись каталогом визначають невідомий газ.

Завдання у режимі дистанційного навчання

Варіант 1. Визначення невідомого газу

Будують градувальний графік (довжина хвилі світла від горизонтальної координати по першому рис. 3.25 (тільки пари ртуті)). Координату лінії на рисунку можна визначати в пікселях або мм. Для цього краще збільшити масштаб малюнка. Масштаб залишати однаковим для обох малюнків.

Знайти на іншому рисунку невідомі лінії. Визначити відповідні координати для невідомих ліній. По градувальному графіку визначити невідомі лінії. Використовуючи таблиці визначити невідомий елемент.

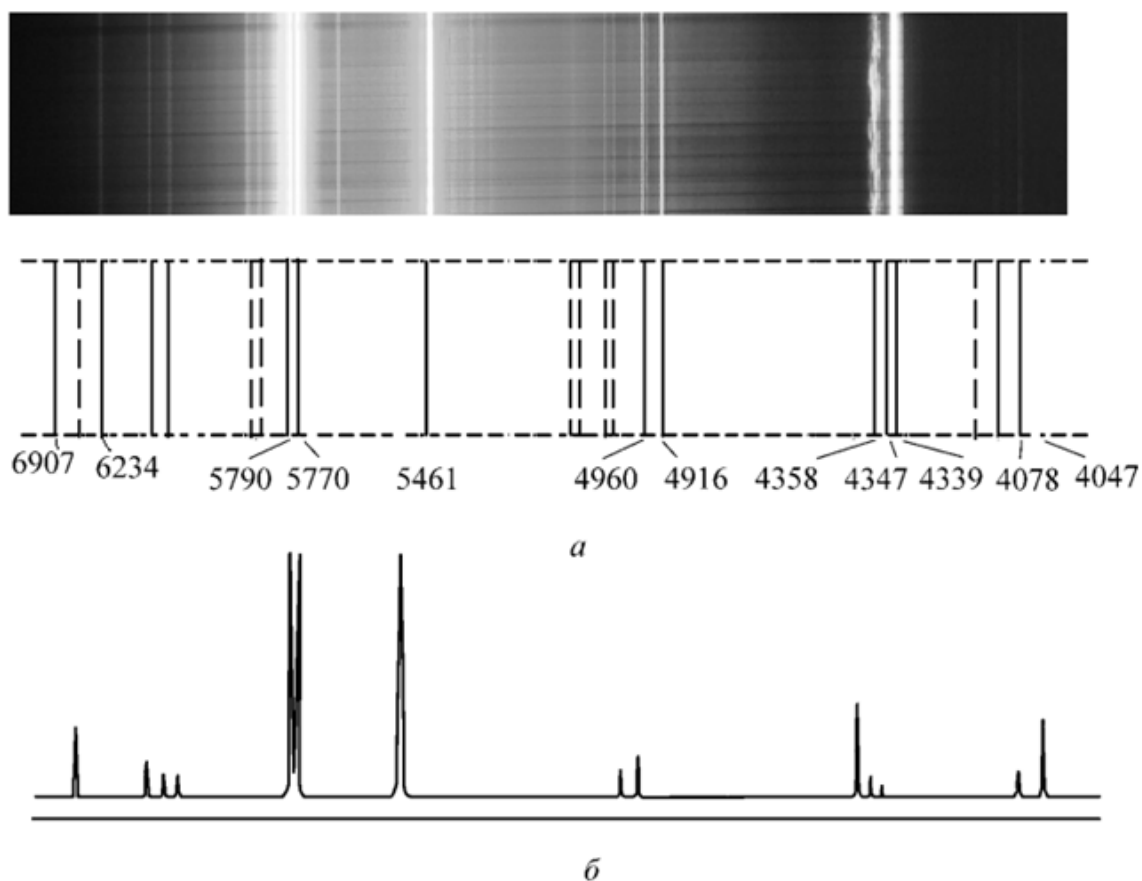


Рис. 3.24. Система спектральних ліній випромінювання ртуті і відповідний розподіл інтенсивності світла в спектрі

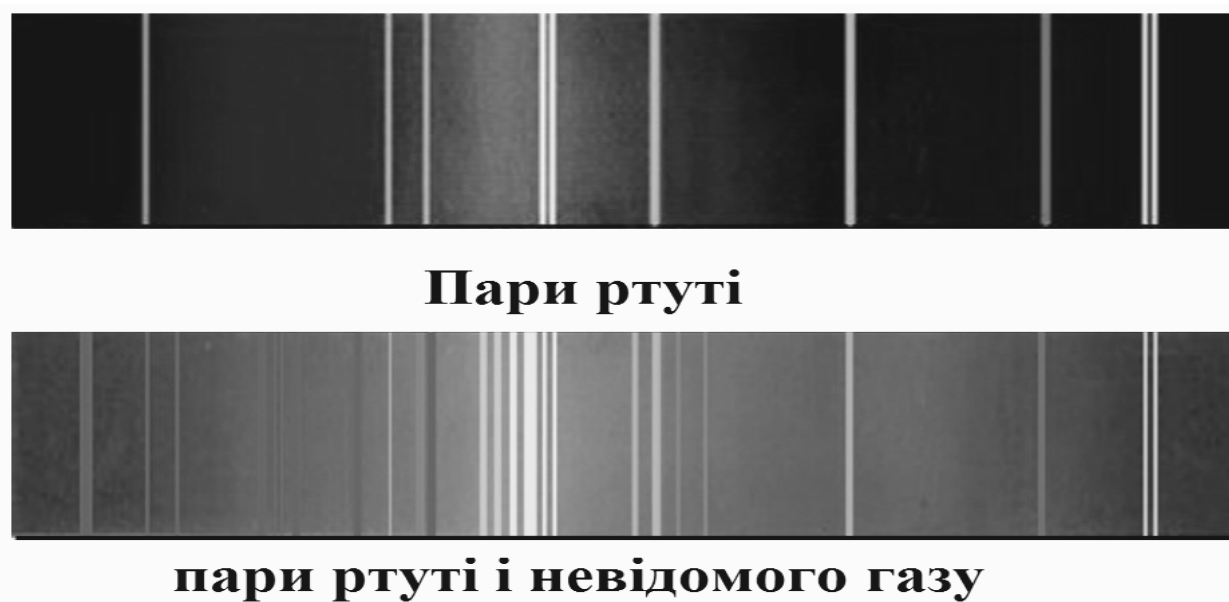


Рис. 3.25. Варіант для самостійного спектрального аналізу

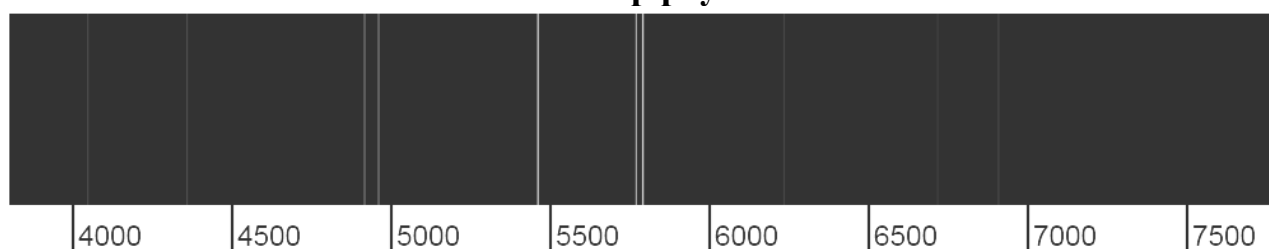
Таблиця. Спектри випромінювання газів λ , нм

Азот	Аргон	Водень	Гелій	Кисень	Ртуть	Неон
575,4	394,9	410,17	388,85	520	404,7	453,78
580,3	404,4	434,04	402,62	530	407,8	470,44
585,3	415,9	434,05	412,08	полоса	435,8	471,53
590,4	416,4	486,128	438,7	555	491,6	475,3
595,7	418,2	486,136	447,1	564	546,1	482,7
601,2	419,0	656,271	471,3	полоса	577	488,5
632,1	419,1	656,285	492,2		579	495,7
639,3	420,1		501,57		612,3	534,1
646,7	425,1		587,56		623,2	540,06
654,3	425,9		667,81		690,7	585,25
662,2	426,6		706,52			588,19
670,3	427,2					603,0
678,7	430,0					607,4
	433,4					614,31
	433,5					616,4
						621,7
						626,65
						633,4
						638,3
						640,22
						650,5
						659,9
						692,9

Варіант 2. Визначення складу ґрунту

Будують градувальний графік (довжина хвилі світла від горизонтальної координати по першому рис. (пари ртуті). Координату лінії на рисунку можна визначати в пікселях або мм. Для цього краще збільшити масштаб малюнка. Масштаб залишати однаковим для обох малюнків.

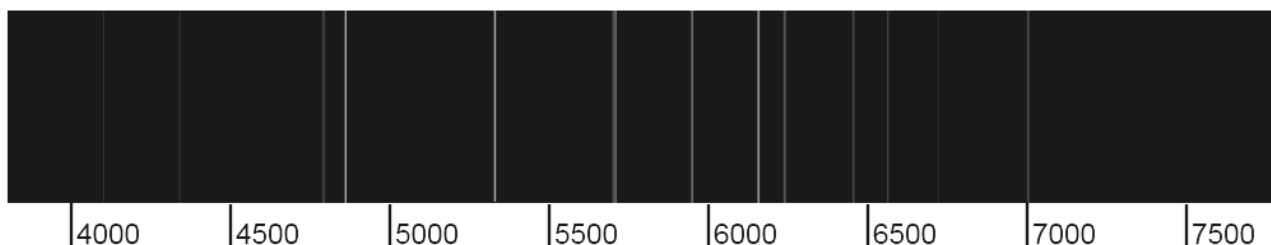
Знайти на іншому рисунку невідомі лінії. Визначити відповідні координати для невідомих ліній. По градуировочному графіку визначити невідомі лінії. Використовуючи таблиці визначити невідомий елемент.

Спектр ртуті

Ґрунт (екватор) 15 ліній



Ґрунт (полюс) 13 ліній



Довжини хвиль в ангстремах (10^{-10} м)

Ртуть(Hg)	Кремній (Si)	Алюміній(Al)	Залізо (Fe)	Кисень(O)
4046	4792	3961	4143	5330
4360	5708	4255	4271	6158
4916	5949	5109	4325	6455
4960	6155	5557	4404	7002
5461	6237	6696	4957	
5770	6721	6906	5167	
5791	7005	7084	6411	
6234				
6716				
6907				
Водень (H)	Магній(Mg)	Кальцій(Ca)	Азот(N)	Сірка(S)
4101	4351	4226	5752	4152
4340	4571	5588	6440	4587
4861	4702	5857	6484	4694
6562	5137	6162	6645	6052
	5528	6439		6757
	5711	6717		

Контрольні питання

1. На чому базується спектральний аналіз?
2. Що називається дисперсією світла? Що називається показником заломлення світла? Як веде біле світло при проходженні через скляну призму?
3. Чому спектр нагрітих тіл є суцільним? Чому спектри атомарних газів є лінійними?
4. Яким співвідношенням описуються довжини хвиль у лінійних спектрах атомів?
5. Навіщо у роботі використовується ртутна лампа?

Лабораторна робота № 3.7

Визначення лінійних розмірів малих тіл за допомогою лазера

Мета роботи: Познайомитися з принципом роботи лазера, і з його допомогою дослідити явище дифракції світла на мікроскопічних частинках та визначити їх розмір.

Обладнання: лазер, екран, скляна пластинка з частинками лікоподію, лінійка.

Оптичні квантові генератори, які дають випромінювання в оптичному діапазоні, називаються **лазерами**. Принцип їх роботи базується на генерації і підсиленні світла за допомогою вимушеного індукованого випромінювання. **Індуковане випромінювання** – це таке випромінювання електромагнітних хвиль, яке виникає, якщо атом переходить із збудженого стану в основний від дією зовнішнього фотона. Така взаємодія фотона зі збудженим атомом можлива, якщо енергія фотона дорівнює різниці рівнів енергій атома в збудженому й основному станах. В цьому випадку після взаємодії фотона з атомом, від атома будуть розповсюджуватися уже два фотони: той, що вимушує атом випромінюватися і той, що випромінюється атомом (рис.3.26).

Утворене при цьому вимушене випромінювання має таку масу частоту й фазу, що і стимулююче, і розповсюджується в тому ж напрямку. Тобто індуковане випромінювання є когерентним тому, що примушує збуджений атом випромінювати.

При взаємодії фотонів із речовиною поряд із вимушеним випромінюванням іде процес поглинання фотонів, при якому атоми приходять з основного стану в збуджений.

В нормальному стані не збуджених атомів у речовині значно більше, чим збуджених, тому при взаємодії фотонів із речовиною переважає процес поглинання останніх, і підсилення світла немає. Для того, щоб процес вимушеного випромінювання переважав над поглинанням, необхідно щоб концентрація атомів речовини на верхніх енергетичних рівнях, що відповідають збудженому стану, була більша чим на нижніх. Такий стан називається **інверсійною заселеністю**. Інтенсивність світла, що проходить через середовище з інверсійною заселеністю атомів зростає $I > I_0$ на відміну від нормального стану, для якого згі-



Рис. 3.26 Спонтанне та індуковане випромінювання атомів

дно з законом Бугера:

$$I = I_0 \exp(-\chi l),$$

інтенсивність зменшується $I < I_0$. Тут χ – коефіцієнт поглинання, l – товщина шару речовини, через яку проходить світло.

Розглянемо будову та принцип дії гелій-неонового лазера. Основним його елементом є розрядна трубка, що заповнена сумішшю газів гелій й неону. Парціальний тиск гелію – 1 мм. рт. ст., неону – 0,1 мм. рт. ст. Атоми неону є випромінюючими (робочими) атомами, атоми гелію – допоміжними, що необхідні для створення інверсійної заселеності. На рис. 3.27 показані енергетичні рівні атомів неону та гелію. При електричному розряді в трубці збуджуються атоми гелію і переходять в стан 2.

При взаємодії з атомами неону, атоми гелію передають їм свою енергію і переходять в збуджений стан 3 (рис. 3.27). Системи, що накачують збудження атомів називаються системами накачки. Оскільки час перебування атомів на рівні 3 порівняно малий, вони досить швидко спонтанно переходять на ближній рівень 2. Рівень 2 являється метастабільним, час життя на ньому великий. За умови, що рівень 2 є метастабільним, у процесі дії накачки атоми будуть накопичуватися саме на таких рівнях. Як результат цього, досягається інверсійна заселеність рівнів 2 відносно рівня 1. В середовищі з інверсійною заселеністю рівнів індукований перехід між рівнями 2 і 1 дозволяє підсилити світловий потік, якщо його частота відповідає умові:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

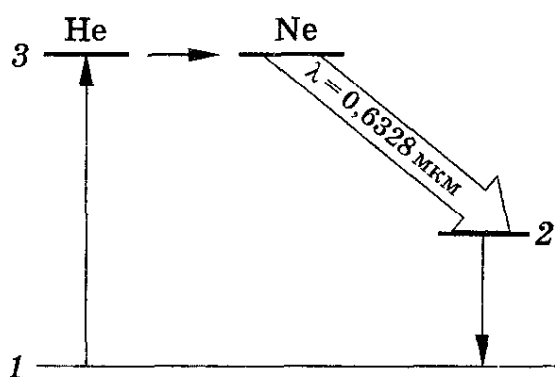


Рис. 3.27. Система рівнів в гелій-неоновому лазері

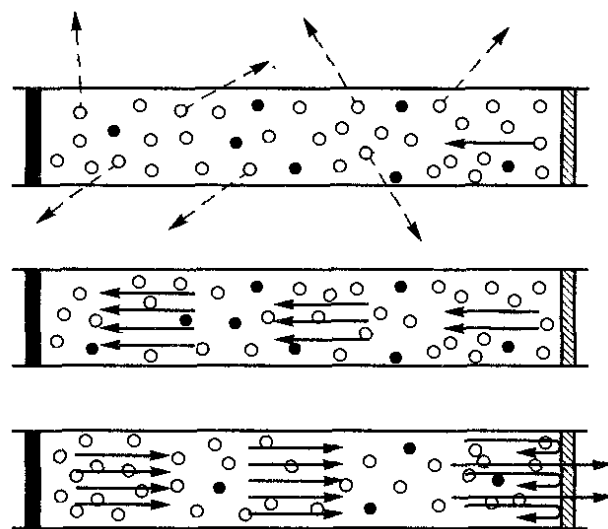


Рис. 3.28. Індуковане випромінювання ○ – збуджені стани атомів; ● – атоми в основному стані; пунктирні стрілки – спонтанне випромінювання у різних напрямках; суцільна стрілка – квант, що рухається вздовж осі лазера і викликає вимушене випромінювання збуджених атомів

Для створення індукованого випромінювання необхідно щоб випущений атомами фотон багаторазово проходив через активне середовище. Оптичним резонатором зазвичай служить пара паралельних дзеркал на загальній оптичній осі, між якими міститься активне середовище (кристал або кювета з газом). Як правило, дзеркала виготовляються так, що від одного з них випромінювання повністю відбивається, а друге напівпрозоре. Фотони, що рухаються під кутами до осі кристала або кювети, виходять із активного середовища через її бічну поверхню. Ті ж з фотонів, які рушають уздовж осі, багаторазово відіб'ються від протилежних торців, щоразу викликаючи вимушене випромінювання вторинних фотонів, які, у свою чергу, викличуть вимушене випромінювання, і т. д. Так як фотони, що виникли при вимушеному випромінюванні, рухаються в тому ж напрямку, що і первинні, то потік фотонів наростає лавиноподібно. Багаторазово посилений потік фотонів виходить через напівпрозоре дзеркало, створюючи строго спрямований світловий пучок із високими когерентними властивостями.

З трубки світло виходить через так звані вікна Брюстера, розташовані так, щоб світло, яке розповсюджується вздовж трубки, падає на них під кутом Брюстера. Завдяки ним світло поляризується, і при проходженні через них не відбивається, тобто повністю проходить через них без втрат. В результаті чого з лазера виходить потужний когерентний, у високій степені монохроматичний поляризований пучок світла. Цей пучок практично складається з паралельних променів.

Порядок виконання роботи:

1. На шляху лазерного променя розміщують скляну пластинку з нанесеним моно шаром частинок лікоподію радіуса r . На екрані (рис. 3.29) можна спостерігати явище дифракції, яке являє собою суму дифракційних картин від окремих частинок. Ця картина має вигляд концентричних кілець, розташованих навколо центрального кола.
2. Пронумерувати всі кільця починаючи від центрального (0 – центральний, 1 – перше темне кільце, 2 – перше світле кільце, 3 – друге темне кільце і т.д.).
3. З дифракційної теорії Гюйгенса-Френеля на круглих перешкодах умовою отримання **мінімумів** (темні кільця) є

$$r \sin \varphi_1 = 0.61\lambda, \quad r \sin \varphi_3 = 1.12\lambda, \quad r \sin \varphi_5 = 1.62\lambda \quad (1)$$

Умовою для максимумів (світлі кільця) є

$$r \sin \varphi_0 = 0, \quad r \sin \varphi_2 = 0.81\lambda, \quad r \sin \varphi_4 = 1.33\lambda. \quad (2)$$

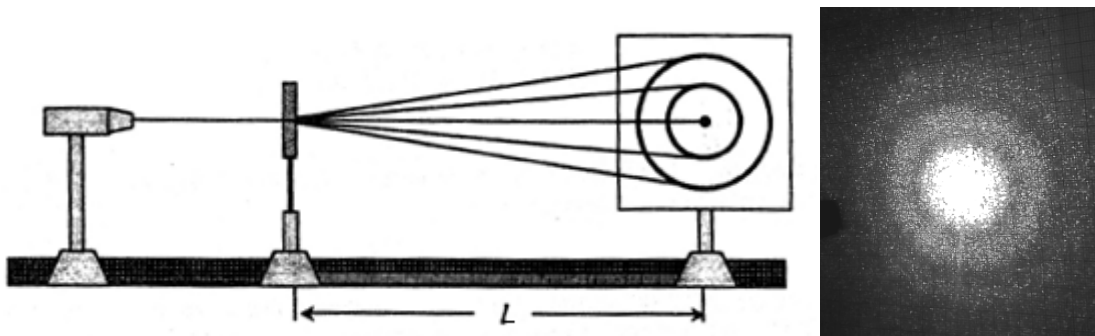


Рис. 3.29. Експериментальна установка

Аналізуючи дифракційну картину, можна знайти радіуси мілких частинок, на яких відбувається дифракція. Для цього необхідно визначити радіуси кільця (зручніше виміряти діаметри посередині лінії кільця) та розрахувати значення синуса кута відхилення променів

$$\sin \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2}} \quad \text{або} \quad \sin \varphi \approx \frac{R}{L}, \quad \text{якщо } R \ll L$$

4. Використовуючи формули (1) та (2) розрахувати всі значення радіусу частинок. Знайти середнє значення.

Завдання у режимі дистанційного навчання

Пропонується розрахувати розмір кульки, на який падає лазерне випромінювання з певною довжиною хвилі, використовуючи формули (1) та (2). В наявності є дифракційна картина (темні та світлі кільця), яка утворюється на екрані на заданій відстані L від кульки (рис. 3.30). Використовуючи масштаб малюнка (пропонується збільшити його перед початком вимірювання), визначити радіуси світлих і темних кілець (відмічати середину лінії кільця лінійкою чи в пікселях). Краще вимірювати діаметр кільця, а потім, поділивши на 2, радіус.

Посилання на дані для кожного варіанту:

https://drive.google.com/file/d/1SPCOecXxln_7s2FExlB24-C7j8rQZGF/view?usp=sharing

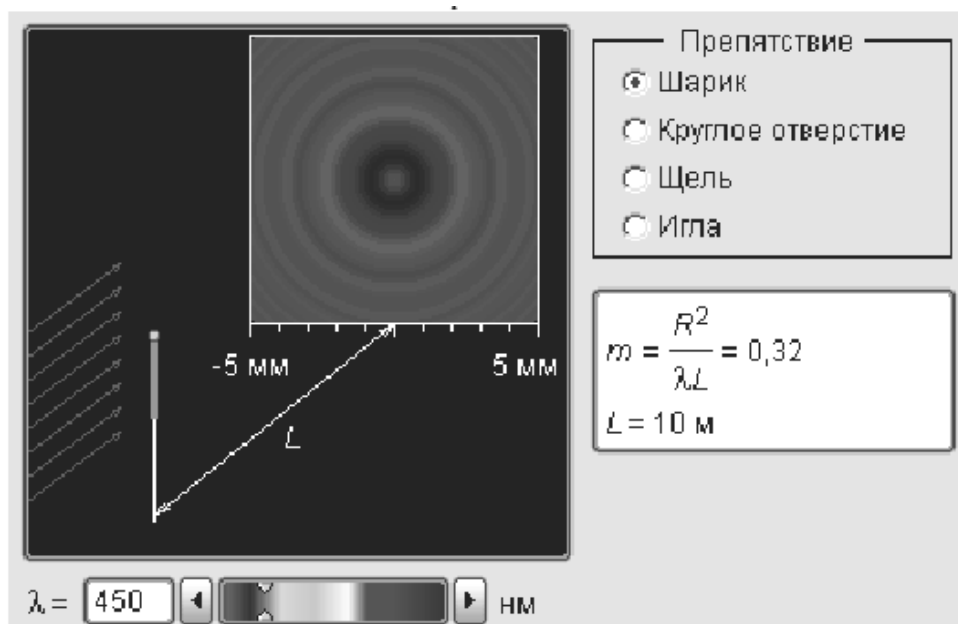


Рис. 3.30. Приклад завдання для самостійної роботи

Контрольні питання

1. Опишіть механізм виникнення спонтанного та індукованого випромінювання атомів. Що таке інверсна заселеність рівнів?
2. Яке призначення гелію та неону в газовому лазері?
3. За рахунок чого досягається підсилення світла в лазері?
4. Яким чином поляризують світло в лазері.
5. Чому виникають темні та світлі кільця при потраплянні світла на мілкі частинки?

Лабораторна робота № 3.8

Вивчення радіусу кривизни лінзи за допомогою кілець Ньютона

Мета роботи: Визначити радіус кривизни лінзи за допомогою кілець Ньютона.

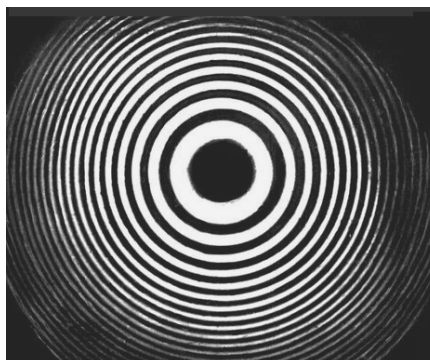
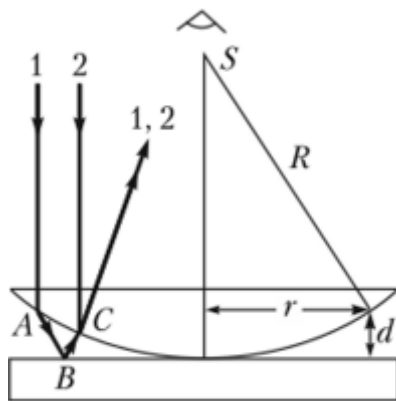
Обладнання: скляна лінза, змонтована з плоскопаралельною пластиною, біноклярний мікроскоп, освітлювач, світлофільтр.

Світло від лампи розжарення освітлювача після проходження світлофільтра та об'єктива падає вертикально на лінзу, відбивається і спостерігається через окуляр. В результаті можна спостерігати кільця Ньютона у відбитому світлі при нормальному падінні променів.

Розглянемо хід променів на рис. 3.31. Промінь світла падає зверху. В точці А світло частково відбивається, а частково проходить далі. У точці В світло також частково відбивається. Світловий промінь поділяється на два промені, які можуть інтерферувати. Спостереження проводяться поблизу точки В, де повітряний проміжок дуже тонкий. Радіус R кривизни лінзи досить великий, тому можна вважати, що відбиті промені поширюються вверх в одному напрямі. Якщо оптична різниця шляхів цих променів дорівнює цілому числу довжин хвиль $\Delta = k\lambda$, то в точці С спостерігається підсилення світла (максимум), а якщо $\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, то, відповідно, послаблення (мінімум). Геометричним місцем точок, для яких виконується умова максимуму чи мінімуму, буде коло, тому, дивлячись зверху, ми побачимо темні та світлі кільця. Радіус деякого кільця на рис. 2 дорівнює r .

Оптична різниця шляху світлових променів утворюється у повітряному проміжку ВС. Позначимо його товщину d . Другий промінь проходить повітряний проміжок двічі, тому оптична різниця шляху дорівнює $\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$. Доданок

$\frac{\lambda}{2}$ виникає внаслідок того, що другий промінь відбивається від оптично більш густого середовища, при цьому його фаза змінюється на протилежну. Прирівнюючи умову мінімуму (темні кільця) та оптичну різницю шляху, отримаємо:



3.31. Схема отримання кілець Ньютона в відбитому світлі

товщина повітряного зазору для темних кілець повинна бути $d = k\lambda / 2$.

Запишемо теорему Піфагора для трикутника на рис. 3.31.

$$R^2 = r^2 + (R - d)^2.$$

З огляду на малість величини d^2 в результаті маємо $r^2 = 2Rd$, а підставляючи вираз для товщини повітряного стовпа маємо

$$r^2 = Rk\lambda. \quad (1)$$

Радіус кривизни лінзи знаходимо за формулою $R = \frac{r^2}{k\lambda}$.

Радіуси кілець вимірюють в поділках окулярної шкали. Для переведу цих значень в систему СІ величину радіуса треба помножити на ціну поділки окулярної шкали.

Залежність квадратів радіусів кілець від їх порядкового номера має лінійний характер. Для знаходження радіуса кривизни запишемо формулу (1) для двох кілець із номерами m та n і знайдемо їх різницю:

$$r_m^2 - r_n^2 = R\lambda(m - n)$$

або для радіуса кривизни лінзи

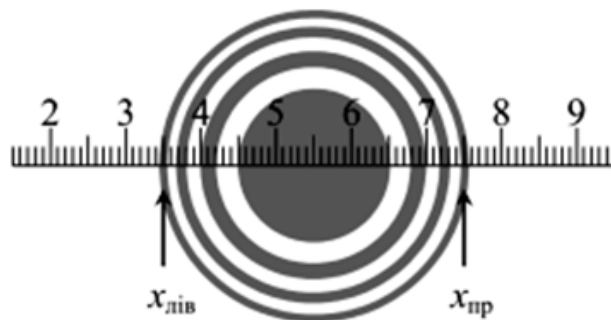
$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{\lambda(m - n)}. \quad (2)$$

Формула (2) дає можливість знаходити радіус кривизни. Слід зазначити, що для світлих кілець треба використовувати умову максимуму $\Delta = k\lambda$. Нумерація темних кілець починається з нуля (темна центральна точка або круг має нульовий номер, перше темне кільце має перший номер, друге кільце – другий і так далі). Нумерація світлих кілець починається з одиниці.

Порядок виконання роботи:

1. Встановити під освітлювач мікроскопа світлофільтр. Розмістити на предметному столику мікроскопа лінзу на скляній пластинці. Ввімкнути освітлювач мікроскопа. Повертаючи оправу окуляра, досягти різкого зображення окулярної шкали.
2. Переміщуючи лінзу, змінюючи збільшення мікроскопа та фокусуючи зображення кілець, досягти різкого зображення кілець Ньютона у зручному для вимірювань масштабі. Окулярна шкала при цьому повинна бути розташована вздовж діаметра кілець.
3. Виміряти зліва і справа від центрального темного кола координати точок перетину п'яти-семи темних кілець з окулярною шкалою та п'яти – семи світлих кілець. Обчислити радіуси кілець у поділках окулярної шкали за формулою

$$r_k = \frac{x_{k.пр} - x_{k.лів}}{2}.$$



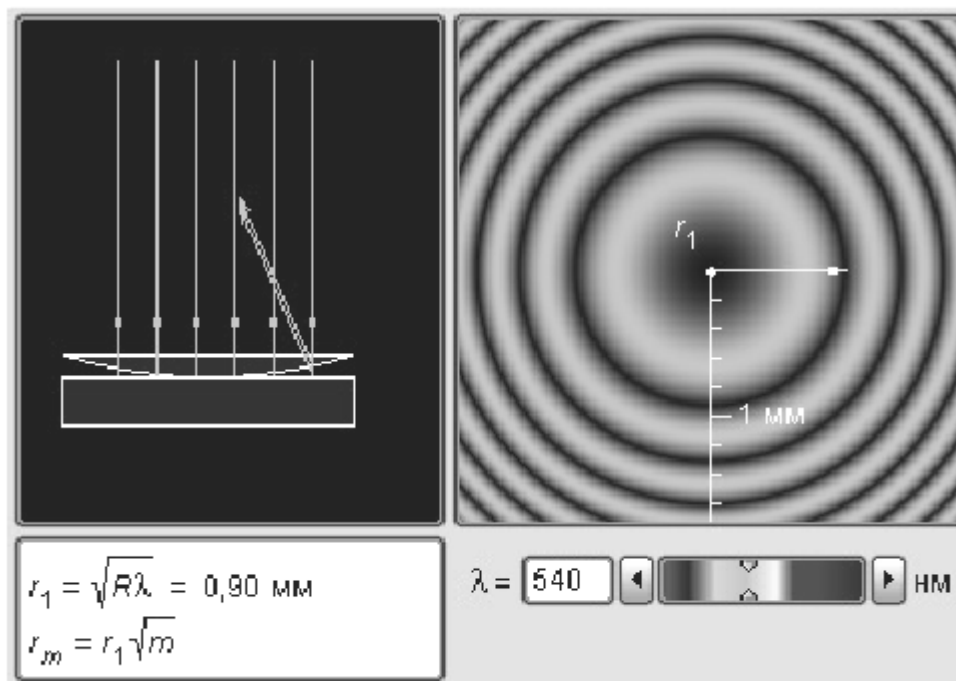
4. Використовуючи значення ціни поділки окулярної лінійки, визначити радіуси темних і світлих кілець в см.
- 5 Розрахуйте радіус кривизни лінзи за формулою (2), використовуючи окремо результати для світлих і темних кілець.

Завдання у режимі дистанційного навчання

Пропонується визначити радіус кривизни лінзи, для якої в відбитому світлі спостерігається запропонована інтерференційна картина (кільця Ньютона) для деякого монохроматичного світла (рис. 3.32). Використовуючи масштаб малюнка (пропонується збільшити його перед початком вимірювання лінійкою чи в пікселях), визначити радіуси світлих і темних кілець (відмічати середину лінії кільця).

Посилання на дані для кожного варіанту:

https://drive.google.com/file/d/1VdqCmvkVxyVxBb2yNykn_tnCkHgVaMat/view?usp=sharing



3.32. Приклад завдання для самостійної роботи

Контрольні питання

1. Покажіть, які промені інтерферують у відбитому та прохідному світлі.
2. Чим відрізняються кільця Ньютона у відбитому та прохідному світлі?
3. Якими будуть кільця Ньютона при освітленні білим світлом?
4. Як зміниться вигляд кілець Ньютона, якщо простір між лінзою та пластинкою заповнити водою?
5. Чому інтерференція спостерігається лише в тонких плівках? Які умови спостереження максимумів та мінімумів інтенсивності світла?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика: лабораторний практикум: навч посібник./ *В. М. Барановський, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук, В. П. Дущенко, М. І. Шут*/ – К.: Вища шк., 1992. – 509 с.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. *В. И. Ивероновой* – М.: Изд-во «Наука», 1967. – 354 с.
3. Физический практикум. Электричество и оптика / под ред. *В. И. Ивероновой* – М.: Изд-во «Наука», 1968. – 816 с.
4. Практикум по общей физике / под ред. *В. Ф. Ноздрева*. Учеб. Пособие. – М., Просвещение, 1971. – 311 с.
5. Лабораторный практикум по общей физике / учеб.пособие/ под. ред. *Гершензона, Н. Н. Малова*. – М.: Просвещение, 1985. – 351 с.
6. Общая физика: руководство по лабораторному практикуму: учеб. Пособие / Под ред. *И. Б. Крынецкого и Б. А. Струкова*. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 599с.
7. *Савельев И. В.* Курс общей физики: учебное пособие для студ. втузов: ВЗТ – 3-е изд., исправл. – М.: Наука Т1: Механика; Молекулярная физика, 1987 – 432 с.
8. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т.І. Механика. – М.: Наука, 1989. – 576 с.
9. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т.ІІ. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – 592 с.
10. *Матвеев А. Н.* Механика и теория относительности. М.: Мир и Образование.– 3-е изд.. – 2003. – 432 с.
11. *Матвеев А. Н.* Молекулярная физика. М.: Высшая школа. – 1981. – 400 с.
12. *Трофимова Т. И.* Курс физики: учеб. пособие для вузов – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2006. – 560 с.
13. *Стрелков С. В.* Механика. – М.: Наука, 1975. – 560 с.
14. *Кикоин А. К., Кикоин И. К.* Молекулярная физика. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
15. *Дефлаф А. А., Яворский Б. М.* Справочник по физике /Для инженеров и студентов вузов/ М., Издательство “Наука”, издание третье, 1965.
16. *Савельев И. В.* Курс общей физики: учебное пособие для студ. втузов: ВЗТ – 3-е изд., исправл. – М.: Наука Т3: Электричество, 1987 – 432 с.
17. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т.3. Электричество. – М.: Наука, 1989. – 576 с.
18. *Матвеев А. Н.* Электричество и магнетизм.– М.: Высш. Школа, 1983. – 463 с.
19. *Калашиников С. Г.* Электричество: Учебн. пособие. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.
20. *Тамм И. Г.* Основы теории электричества: учеб. Пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 504 с.

Навчальне видання

Черненко Олександр Сергійович

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ
В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ**

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

до лабораторних робіт
з курсу загальної фізики
(для студентів нефізичних спеціальностей)

В авторській редакції

Підп. до друку 23.12.2022. Формат 60x84/16.
Ум.-друк. арк. 6,01. Наклад 15 пр.
Зам. № 2538.

Видавець і виготовлювач
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.
65082, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12, Україна
Тел.: (048) 723 28 39, e-mail: druk@onu.edu.ua