

Міністерство освіти і науки України
ДВНЗ „Криворізький національний університет”
Криворізький педагогічний інститут

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ
З КУРСУ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ
для студентів природничих спеціальностей

Кривий Ріг – 2014

УДК 372.853

ББК 22.3я7

Лабораторні роботи з курсу загальної фізики для студентів природничих спеціальностей : [методичні рекомендації] / укл. В. М. Кадченко, В. П. Ржепецький, М. А. Слюсаренко. – Кривий Ріг : ДВНЗ «КНУ» КПІ, 2014. – 51 с.

Укладачі: Кадченко В.М. – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання,
Ржепецький В.П. – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання,
Слюсаренко М. А. – канд. пед. наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання

Рецензент: Несмашний Є. О. – доктор техн. наук, професор, зав кафедри фізики Криворізького національного університету

Затверджено на засіданні кафедри фізики
та методики її навчання
Протокол № 10 від 22.05.2014 р.

*Затверджено радою фізико-математичного факультету
ДВНЗ „КНУ” КПІ.
Протокол № 9 від 22.05.2014 р.*

ББК 22.3я7

© КНУ, 2014

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки призначені для студентів природничих спеціальностей Криворізького державного педагогічного університету. Вони містять інструкції до 9 лабораторних робіт з різних розділів загального курсу фізики.

Фізика є фундаментом природничої освіти, філософії природознавства та науково-технічного прогресу. Метою лабораторного практикуму є:

- Формувати і розвивати в студентів наукові знання та вміння, необхідні для розуміння явищ природи, процесів, що відбуваються в природі і побуті.
- Сформувати вміння систематизувати результати спостережень явищ природи
- Надати студентам практичні вміння використовувати вимірювальні прилади.
- Навчити студентів виконувати вимірювання основних фізичних величин, ознайомити з характеристиками різноманітних фізичних приладів та їх застосуванням для досліджень законів природи.
- Навчити оцінювати похибки вимірювання при виконанні лабораторних робіт.

В ході виконання робіт студенти засвоюють вміння застосовувати теоретичні знання в експериментальній роботі. Тому недоцільно приступати до виконання лабораторної роботи, не засвоївши теоретичні відомості, не маючи уявлення про прилади, що використовуються, та про хід роботи.

Отже перед тим як приступити до виконання роботи, слід ознайомитись з інструкцією і записати в робочий зошит:

- номер і назву лабораторної роботи;
- мету роботи;
- перелік приладів, що будуть використовуватись;
- короткий конспект теоретичного обґрунтування методу та схему установки;
- таблицю для запису результатів вимірювань і обчислень.

Якщо під час підготовки до роботи виникли питання теоретичного характеру, то слід звернутися до підручників, список яких наведено в кінці посібника, або до викладача за консультацією.

Виконуючи роботу, слід одразу ж записувати в робочий зошит результати вимірювань. Не рекомендується виконувати навіть найпростіші розрахунки усно, не записавши результат вимірювання. Якщо під час записів буде допущена помилка, то ці записи допоможуть її знайти. Не користуйтеся „чернетками”, виконуйте всі розрахунки в робочому зошиті.

Результати експериментів зручно подавати у вигляді таблиць. На початку кожного стовпця напишіть назву чи символ відповідної величини та вкажіть одиницю її вимірювання.

В кінці заняття результати вимірювань і обчислень слід подати викладачеві на перевірку.

Обробка і аналіз одержаних результатів та відповіді на контрольні запитання складають зміст домашнього завдання. Графіки, побудовані в ході виконання роботи, бажано виконувати на міліметровому папері та вклеювати у звіт. Під час захисту лабораторної роботи студент повинен пред'явити повністю оформлений звіт і відповіді на контрольні запитання.

Обробка результатів експериментальних вимірювань

1. Похибки вимірювань

Результати будь-яких вимірювань, як би ретельно і на якому б науковому рівні вони не проводились, завжди містять деякі похибки.

Вимірюванням називають знаходження значень фізичної величини дослідним шляхом з допомогою спеціальних технічних засобів [5]. В найпростішому випадку **виміряти** яку-небудь фізичну величину означає **порівняти її з іншою однорідною фізичною величиною, взятою за одиницю вимірювання**.

За способом знаходження числового значення фізичної величини вимірювання ділять на **прямі, непрямі, сукупні та спільні** [3].

Під час **прямих** вимірювань шукане значення величини знаходять безпосередньо з досліду – прямим порівнянням вимірюваної величини з **мірами** (наприклад, вимірювання довжини лінійкою, вимірювання маси на рівноплечих терезах), або з допомогою вимірювального приладу, проградуєваного в одиницях вимірювання (наприклад, вимірювання температури термометром, вимірювання сили струму амперметром).

При **непрямих** вимірюваннях шукане значення величини A знаходять з допомогою обчислень, використовуючи результати прямих вимірювань інших фізичних величин, з якими величина A зв'язана відомою функціональною залежністю (формулою):

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Наприклад, густину тіла можна обчислити, використавши результати прямих вимірювань його маси і об'єму $\left(\rho = \frac{m}{V}\right)$, опір провідника можна знайти з закону Ома, якщо відомі результати прямих вимірювань сили струму в провіднику і напруги на його кінцях $\left(R = \frac{U}{I}\right)$.

В залежності від вибору методу вимірювань значення деяких фізичних величин можна визначити шляхом як прямих, так і непрямих вимірювань. Наприклад, густину рідини можна виміряти ареометром, а опір провідника визначити омметром.

Сукупні та **спільні** вимірювання дають можливість знайти значення величин x_1, x_2, \dots, x_n , які не можна спостерігати безпосередньо, за результатами вимірювань інших величин y_1, y_2, \dots, y_m , які є їх функціями:

$$y_j = \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_n), j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

Після прямих вимірювань значень величин y_j результати цих вимірювань підставляють в систему (2), розв'язок якої дозволить знайти значення величин x_1, x_2, \dots, x_n . Очевидно, що для розв'язання системи (2) необхідно виконання умови $m \geq n$.

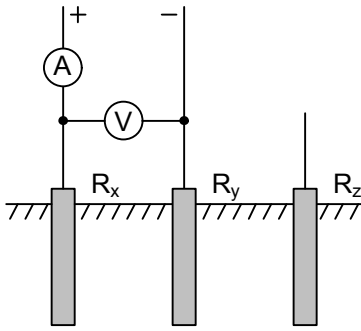


Рис. 1

При **сукупних** вимірюваннях безпосередньо вимірюють значення різних комбінацій кількох однойменних величин, кожен з яких зокрема виміряти неможливо. Наприклад, при вимірюванні опору заземлення (рис. 1) попарно вимірюють опори трьох заземлень – одного основного (робочого) R_x і двох допоміжних R_y і R_z :

$$R_1 = R_x + R_y; \quad R_2 = R_x + R_z; \quad R_3 = R_y + R_z.$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, знаходять опори R_x , R_y і R_z .

При **спільних** вимірюваннях знаходять залежність між декількома неоднорідними величинами. Наприклад, треба знайти залежність опору провідника від температури, яка наближено описується формулою:

$$R = R_0(1 + \alpha t^0), \quad (3)$$

де R_0 - опір при температурі 0^0 С, α - температурний коефіцієнт опору. Щоб знайти R_0 і α , слід знайти два значення опору R_1 і R_2 при двох значеннях температури t_1^0 і t_2^0 , а потім розв'язати систему рівнянь:

$$\begin{cases} R = R_0(1 + \alpha t_1^0) \\ R = R_0(1 + \alpha t_2^0) \end{cases} \quad (4)$$

За результатами спільних вимірювань в багатьох випадках будують графіки залежностей між величинами.

Недосконалість вимірювальних приладів і наших органів відчуттів, а також дія багатьох факторів, що спотворюють вимірювання, приводять до того, що результат кожного вимірювання фізичної величини A_0 , не співпадає з її істинним значенням A_{icm} . Різницю між результатом вимірювання та істинним значенням шуканої величини називають **абсолютною похибкою вимірювання**:

$$\Delta A = |A_{icm} - A_0| \quad (5)$$

Оскільки A_{icm} в більшості випадків ми не знаємо, то точно визначити похибку вимірювань не можна. Можна лише наближено вказати інтервал можливих значень шуканої величини, всередині якого розташоване її істинне значення:

$$A_0 - \Delta A < A_{icm} < A_0 + \Delta A \quad (6)$$

або:

$$A_{icm} = A_0 \pm \Delta A \quad (7)$$

Практично **абсолютною похибкою вимірювань** називають саме величину ΔA в рівняннях (6) чи (7).

Якість результатів вимірювання зручніше характеризувати не абсолютною похибкою ΔA , а її відношенням до дійсного значення шуканої величини A_0 ; це відношення називають **відносною похибкою** і звичайно виражають в процентах:

$$E = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\% \quad (8)$$

Відносну похибку також називають *точністю*.

Похибки вимірювань ділять на три типи: *систематичні, випадкові* та *промахи*.

Систематичними похибками вимірювань називають похибки, які при багатократному вимірюванні однієї і тієї ж величини залишаються сталими, або змінюються за певним законом. Систематичні похибки вимірювань включають в себе *методичні* та *інструментальні похибки*.

Методичні похибки викликані недоліками методу вимірювань, недосконалістю теорії фізичного явища чи неточністю розрахункової формули. Для зменшення цих похибок слід вдосконалювати методи вимірювань.

Інструментальні похибки, або *похибки приладу* викликані недосконалістю конструкції та неточністю виготовлення вимірювальних приладів (наприклад, невелика різниця в довжинах плеч важільних терезів, невідповідність центра шкали стрілочного приладу вісі обертання стрілки, та ін.). Зменшують інструментальні похибки, використовуючи більш досконалі і точні прилади. Однак повністю усунути інструментальну похибку неможливо.

Випадковими похибками називають похибки, абсолютне значення і знак яких змінюються при багатократних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Випадкові похибки викликаються багатьма факторами, що не піддаються обліку. Повністю позбавитися від цих похибок теж неможливо, але їх можна зменшити шляхом багатократного повторення вимірювань. При цьому має місце часткова компенсація випадкових відхилень результатів вимірювань в сторону збільшення і в сторону зменшення. Розрахунок випадкових похибок здійснюють методами теорії ймовірностей і математичної статистики.

Промач – це похибка, що суттєво перевищує ту, яку ми чекаємо при даних умовах вимірювання. Промач може бути зроблений внаслідок невірного запису показів приладу, помилки експериментатора при використанні приладу, несправності апаратури для вимірювання. Промачи виявляють, повторюючи вимірювання в інших умовах, або аналізуючи результати (якщо тільки одне вимірювання значно відрізняється від інших, то, цілком можливо, це вимірювання є промахом). Якщо промах виявлено, то його слід виключити з результатів, і, в разі необхідності, повторити вимірювання.

2. Обчислення похибок при прямих вимірюваннях.

Припустимо спочатку, що систематичні похибки відсутні і всі похибки можна вважати випадковими. В цьому випадку під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини ми одержимо результати, що трохи відрізняються один від одного:

$$A_1, A_2, A_3, \dots, A_i, \dots, A_n.$$

Якщо під час повторних вимірювань будуть одержані зовсім однакові числові значення, то це вкаже на недостатню чутливість вимірювального

приладу (тобто значну похибку приладу). Результати, що значно відрізняються один від одного, також свідчать про неточність вимірювань і необхідність вдосконалення методики вимірювань [3].

Під час обробки одержаних результатів виникають два питання:

1) **Як одержати з цих n значень найкращу оцінку істинного значення шуканої величини?**

2) **Чому дорівнює похибка вимірювань?**

Відповіді на ці питання дає теорія імовірності (див., наприклад, [1,2]). Наведемо їх без доведення, обмежившись лише якісним поясненням.

Найкращою оцінкою значення величини, що вимірюється, є **середнє арифметичне** результатів вимірювань:

$$A = \bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (9)$$

Для оцінки похибки вимірювань знайдемо відхилення кожного з вимірювань від середнього значення: $\Delta A_i = A_i - \bar{A}$. Серед ΔA_i будуть зустрічатись як додатні, так і від'ємні числа.

Стандартною або **середньою квадратичною похибкою окремого вимірювання** називають величину:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_i^2}{n-1}} \quad (10)$$

Знайдене середнє значення \bar{A} є кращою оцінкою A , ніж будь-яке з A_i . **Середня квадратична похибка середнього**

$$S_{\bar{A}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_i^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

Саме цю похибку ми й будемо обчислювати під час обробки результатів вимірювань.

Вирази (10) і (11) справедливі при $n > 30$. При малому числі дослідів n для одержання тієї ж довірчої імовірності (див. далі) слід збільшити довірчий інтервал, помноживши $S_{\bar{A}}$ на деякий коефіцієнт t_{α} , який називають **коефіцієнтом Стьюдента** [3]. Значення цих коефіцієнтів наведено в додатку (табл. 3). Результат вимірювання записують у виді

$$A = \bar{A} \pm \Delta A, \quad (12)$$

де:

$$\Delta A = \Delta A_{\text{вн}} = t_{\alpha} S_{\bar{A}}.$$

Абсолютна похибка ΔA округляється до двох значущих цифр, якщо перша з них одиниця чи двійка, і до однієї значущої цифри у всіх інших випадках. В кінцевому результаті вимірювання \bar{A} останньою значущою цифрою повинна бути цифра того ж розряду, що і в абсолютній похибці. В

проміжних результатах обчислень пишуть ще одну лишню цифру, що дає можливість точніше округлити кінцевий результат.

Інтервал значень величини A , рівний $(\bar{A} - \Delta A, \bar{A} + \Delta A)$, називають **довірчим інтервалом**, а імовірність того, що істинне значення величини, яка вимірюється, попаде в довірчий інтервал, називають **довірчою імовірністю α** (або **надійністю результату**).

При великих значеннях n середня квадратична похибка окремого вимірювання позначається σ і називається **стандартним відхиленням**. Для довірчого інтервалу $(\bar{A} - \sigma, \bar{A} + \sigma)$ надійність результату $\alpha = 0,68$; для $(\bar{A} - 2\sigma, \bar{A} + 2\sigma) - \alpha = 0,95$; для $(\bar{A} - 3\sigma, \bar{A} + 3\sigma) - \alpha = 0,997$.

Як видно з виразу (11), збільшення числа вимірювань приводить до зменшення випадкової похибки вимірювань. Проте похибка вимірювання залежить ще й від систематичних похибок, якими ми до цього часу нехтували. Скільки вимірювань ми не виконали б невірною зробленою лінійкою, точний результат ми не одержимо. Але ж будь-яка лінійка виготовлена не цілком точно!

Яку ж кількість вимірювань слід виконати під час проведення експерименту? **Ніколи не слід обмежуватись однократним вимірюванням**. Завжди необхідно зробити повторне контрольне вимірювання. Якщо результати вимірювань співпали, то на цьому, як правило, можна зупинитись. Якщо ж між результатами є відмінності, то вимірювання слід виконати ще 2...3 рази, щоб зрозуміти, в чому причина: в тому, що одне з вимірювань було виконано невірною, чи в тому, що результати вимірювань відрізняються через випадкові похибки. В першому випадку слід просто відкинути невірне вимірювання, а в другому спробувати розібратись в причині відмінності результатів. Якщо ця причина може бути ліквідована шляхом регулювання приладу (змащення частин, в яких виникає тертя, усунення люфту і т. ін.), то це обов'язково слід зробити. Якщо ж усунути причину розходження результатів не вдається, то слід здійснити цілу серію повторних вимірювань, щоб зробити випадкову похибку достатньо малою (меншою систематичної чи меншою, ніж допустима похибка при необхідній в даній роботі точності вимірювань).

Прилади найчастіше нормуються по приведеній похибці, вираженій в процентах від верхньої межі вимірювань. Ця похибка називається **класом точності** і має значення: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Похибка приладу:

$$\Delta A_{\text{прил}} = \frac{k}{100} A_{\text{max}}, \quad (13)$$

де k – клас точності приладу, A_{max} – верхня межа його вимірювання. Оскільки похибка приладу визначає максимально можливе значення похибки, а похибки вимірювань характеризують середньоквадратичною похибкою, то, щоб одержати середньоквадратичну похибку приладу слід $\Delta A_{\text{прил}}$ поділити на 2:

$$\Delta A_{\text{сист}} = \frac{1}{2} \Delta A_{\text{прил}} \quad (14)$$

Якщо клас точності приладу не вказано, то вважають, що **систематична**

похибка дорівнює половині ціни найменшої поділки шкали приладу.

В загальному випадку при наявності як випадкових, так і систематичних похибок, похибка вимірювання величини A

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta A_{\text{вип}})^2 + (\Delta A_{\text{сист}})^2} \quad (15)$$

і визначається з точністю біля 20 %. Тому, якщо випадкова і систематична похибки відрізняються більш, ніж у два рази, то можна вважати, що ΔA дорівнює більшій з них. Нехай, наприклад, $\Delta A_{\text{вип}} = 0,5 \Delta A_{\text{сист}}$; тоді:

$$\Delta A = \sqrt{(0,5 \Delta A_{\text{сист}})^2 + (\Delta A_{\text{сист}})^2} = \sqrt{1,25 (\Delta A_{\text{сист}})^2} = 1,12 \Delta A_{\text{сист}} \approx \Delta A_{\text{сист}}$$

Іноді результат одного вимірювання (чи однієї серії вимірювань) значно відрізняється від інших. В цьому випадку експериментатор повинен вирішити, чи є цей аномальний результат вимірювання наслідком грубої помилки (тобто промахом) і з цієї причини його слід відкинути, чи цей результат повинен враховуватись разом з іншими. Відповідь на це питання дати не так просто; проблеми відкидання даних викладені, наприклад, в [1] та [2], ми ж обмежимося наступною рекомендацією. Обчисліть стандартне відхилення $S_{\bar{A}}$ (11) з врахуванням всіх значень величини, що вимірюється, потім сумнівний результат A_k порівняйте зі значенням $3S_{\bar{A}}$; якщо $A_k > \bar{A} + 3S_{\bar{A}}$, чи $A_k < \bar{A} - 3S_{\bar{A}}$, то цей результат слід відкинути. Після цього необхідно виконати перерахунок похибки $3S_{\bar{A}}$. Відкидання даних виконується тільки один раз.

Отже, під час **прямих** вимірювань необхідно:

1. Результати кожного вимірювання записати в таблицю.
2. Обчислити середнє арифметичне з n вимірювань: $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$.
3. Обчислити середньоквадратичну похибку: $S_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}$.
4. Якщо серед результатів вимірювань є один (або два), що значно відрізняється від інших, то слід перевірити, чи не є це вимірювання промахом.
5. Задати значення довірчої імовірності α і за табл. 3 визначити коефіцієнт Стьюдента.
6. Обчислити випадкову похибку вимірювань $\Delta A_{\text{вип}} = t_{\alpha} \cdot S_A$ і порівняти її з систематичною $\Delta A_{\text{сист}} = \frac{1}{2} \Delta A_{\text{прил}}$. Якщо ці похибки сумірні за значенням, то похибка вимірювання величини A дорівнює: $\Delta A = \sqrt{t_{\alpha}^2 S_A^2 + \left(\frac{t_{\infty}}{2}\right)^2 \Delta A_{\text{прил}}^2}$, де t_{∞} – коефіцієнт Стьюдента для $n = \infty$.
7. Записати результат вимірювань у вигляді: $A = \bar{A} \pm \Delta A$ ($\alpha = 0,95$)
8. Обчислити відносну похибку вимірювань: $E = \frac{\Delta A}{A} 100\%$

3. Обчислення похибки при непрямих вимірюваннях

Як згадувалось вище, при *непрямих* вимірюваннях шукане значення величини A знаходять з допомогою обчислень, використовуючи результати прямих вимірювань інших фізичних величин, з якими величина A зв'язана відомою функціональною залежністю (формулою):

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Для кожної серії прямих вимірювань величин, що визначають шукану величину, виконайте обробку, як описано вище. Довірча імовірність α задається однаковою для всіх величин. Потім обчисліть середнє значення шуканої величини:

$$\bar{A} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n).$$

Використавши таблиці 1 і 2 додатку, знайдіть вирази для абсолютної та відносної похибки вимірювань. В більшості інструкцій такі вирази наведено.

Обчисліть відносну і абсолютну похибки вимірювань і запишіть кінцевий результат у виді:

$$A = \bar{A} \pm \Delta A (\alpha = 0,95).$$

Для спрощення обробки результатів при виконанні лабораторних робіт можна рекомендувати спочатку обчислювати відносну похибку по спрощеній формулі

$$E = |\partial \ln f(x_1, x_2, \dots, x_n)|,$$

а потім обчислювати абсолютну похибку $\Delta A = E \cdot \bar{A}$.

Наведемо як приклад порядок розрахунку питомого опору провідника:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}.$$

поперечного перерізу $S = \frac{\pi D^2}{4}$, де діаметр дроту D вимірюють мікрометром а довжину l – лінійкою.

Розрахункова формула: $\rho = \frac{\pi D^2 U}{4 \cdot I \cdot l}$. Прологарифмуємо її та знайдемо диференціал: $\ln \rho = \ln \pi + 2 \ln D + \ln U - \ln 4 - \ln I - \ln l$;

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{2dD}{d} + \frac{dU}{U} - \frac{dI}{I} - \frac{dl}{l}.$$

Змінюємо знаки диференціалу d на знаки похибки Δ і додаємо по модулю:

$$E = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{2\Delta D}{d} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta l}{l}. \quad (16)$$

Можна показати [2], що відносна похибка, одержана за формулою (16), буде не меншою, ніж одержана при квадратичному додаванні (формула в табл. 2). Користуючись наведеним прикладом, для кожної конкретної лабораторної роботи можна одержати спрощені формули для розрахунку похибки вимірювань.

Таблиця 1.
Визначення похибки функції однієї змінної

№ п/п	Вид функції $A = f(x)$	Абсолютна похибка ΔA	Відносна похибка $E = \frac{\Delta A}{A}$
1	$C \cdot x, C = const$	$C \cdot \Delta x$	$\frac{\Delta x}{x}$
2	x^n	$n \cdot x^{-(n-1)} \Delta x$	$n \cdot \frac{\Delta x}{x}$
3	$\sqrt[n]{x}$	$\frac{1}{n} \cdot \frac{\sqrt[n]{x}}{x} \cdot \Delta x$	$\frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta x}{x}$
4	$e^{\frac{x}{C}}, C = const$	$e^{\frac{x}{C}} \cdot \frac{\Delta x}{C} *$	$\frac{\Delta x}{C}$
5	$B^{\frac{x}{C}}, C = const, B = const$	$B^{\frac{x}{C}} \cdot \ln B \cdot \frac{\Delta x}{C}$	$\ln B \cdot \frac{\Delta x}{C}$
6	$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{\ln x \cdot x}$
7	$\sin \alpha$	$\cos \alpha \cdot \Delta \alpha **$	$ctg \alpha \cdot \Delta \alpha **$
8	$\cos \alpha$	$\sin \alpha \cdot \Delta \alpha **$	$tg \alpha \cdot \Delta \alpha **$
9	$tg \alpha$	$\frac{\Delta \alpha}{\cos^2 \alpha} **$	$\frac{2 \Delta \alpha}{\sin 2 \alpha} **$
10	$ctg \alpha$	$\frac{\Delta \alpha}{\sin^2 \alpha} **$	$\frac{2 \Delta \alpha}{\sin 2 \alpha} **$

* Для досить великих значень C ($\bar{x} \ll |C|$).

** $\Delta \alpha$ вимірюється в *рад*.

Таблиця 2.
Визначення похибки функції декількох змінних

№ п/п	Вид функції $A = f(a, b, c)$	Абсолютна похибка ΔA	Відносна похибка $E = \frac{\Delta A}{A}$
1	$Pa \pm Qb$ ($P, Q - const$)	$\sqrt{P^2 \Delta a^2 + Q^2 \Delta b^2}$	$\frac{\sqrt{P^2 \Delta a^2 + Q^2 \Delta b^2}}{Pa \pm Qb}$
2	$a \cdot b$	$\sqrt{\bar{b}^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 \Delta b^2}$	$\sqrt{\frac{\Delta a^2}{\bar{a}^2} + \frac{\Delta b^2}{\bar{b}^2}}$
3	$\frac{a}{b}$	$\frac{\sqrt{\bar{b}^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 \Delta b^2}}{\bar{b}^2}$	$\sqrt{\frac{\Delta a^2}{\bar{a}^2} + \frac{\Delta b^2}{\bar{b}^2}}$

4	$a^\alpha \cdot b^\beta \cdot c^\gamma$ ($\alpha, \beta, \gamma - const$)	–	$\sqrt{\alpha^2 \frac{\Delta a^2}{a^2} + \beta^2 \frac{\Delta b^2}{b^2} + \gamma^2 \frac{\Delta c^2}{c^2}}$
5	$\frac{a}{a \pm b}$	$\frac{\sqrt{\bar{b}^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 \Delta b^2}}{(\bar{a} \pm \bar{b})^2}$	$\frac{\sqrt{\bar{b}^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 \Delta b^2}}{\bar{a} \cdot (\bar{a} \pm \bar{b})}$
6	$a \cdot b + c$	$\sqrt{\bar{b}^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 \Delta b^2 + \Delta c^2}$	$\frac{\sqrt{\bar{b}^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 \Delta b^2 + \Delta c^2}}{\bar{a} \cdot \bar{b} + \bar{c}}$
7	$a \cdot (b + c)$	$\sqrt{(\bar{b} + \bar{c})^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 (\Delta b^2 + \Delta c^2)}$	$\frac{\sqrt{(\bar{b} + \bar{c})^2 \Delta a^2 + \bar{a}^2 (\Delta b^2 + \Delta c^2)}}{\bar{a} \cdot (\bar{b} + \bar{c})}$

Таблиця 3. Коефіцієнти Стьюдента

n	Довірча імовірність α			
	0,5	0,7	0,95	0,999
2	1,00	2,0	12,7	636,6
3	0,82	1,3	4,3	31,6
4	0,77	1,3	3,2	12,9
5	0,74	1,2	2,8	8,6
6	0,73	1,2	2,6	6,9
7	0,72	1,1	2,4	6,0
8	0,71	1,1	2,4	5,4
9	0,71	1,1	2,3	5,0
10	0,70	1,1	2,3	4,8
15	0,69	1,1	2,1	4,1
20	0,69	1,1	2,1	3,9
40	0,68	1,1	2,0	3,6
60	0,68	1,0	2,0	3,5
120	0,68	1,0	2,0	3,4
∞	0,67	1,0	2,0	3,3

Література

1. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. – Л.: Наука, 1985.
2. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
3. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений: Справ. пособие. – Киев: Техника, 1987. – 128 с.
4. Лабораторный практикум по общей физике. / Под ред. Е.М.Гершензона и Н.Н.Малова. – М.: Просвещение, 1985.
5. Чертов А.Г. Единицы физических величин. – М.: Высш. шк., 1977. – 287 с.
6. Нижник В.Г. Вимірювання фізичних величин та обчислення похибок. - Київ: Рад. шк., 1979. – 104 с.

ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

Мета роботи: Навчитись вимірювати: а) лінійні розміри тіл штангенциркулем та мікрометром; б) масу тіл зважуванням; в) об'єм тіла неправильної форми з допомогою мензурки. Навчитись обчислювати похибки вимірювань.

Прилади та матеріали: Штангенциркуль, мікрометр, терези технічні з набором важків, мензурка, набір тіл правильної геометричної форми, тіла неправильної геометричної форми, серветка.

Теоретичні відомості

1. Вимірювання лінійних розмірів штангенциркулем.

Для вимірювання довжин з точністю біля 1 мм використовують *лінійку (масштаб)* з довжиною поділки (яку називають *ціною поділки*) 1 мм. Підвищити точність вимірювань можна, доповнивши масштаб *нонісом*.

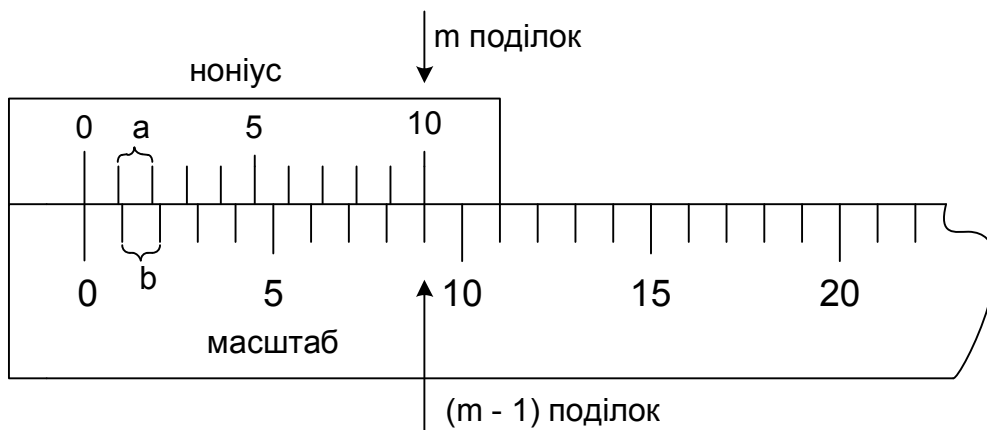


Рис. 1

Лінійний ноніус – це невелика лінійка, що ковзає вздовж масштабу. На цій лінійці нанесено маленьку шкалу, що містить m поділок (див. рис. 1; найчастіше $m = 10$). Довжина всіх m поділок ноніуса дорівнює довжині $(m-1)$ поділок основного масштабу, тобто:

$$ma = (m - 1)b, \tag{1}$$

де a – ціна поділки ноніуса, b – ціна поділки масштабу.

З (1) одержуємо:

$$(b - a) = \frac{b}{m} \tag{2}$$

Відношення $\frac{b}{m}$ називають *точністю ноніуса*.

Розглянемо процес вимірювання з допомогою лінійного ноніуса.

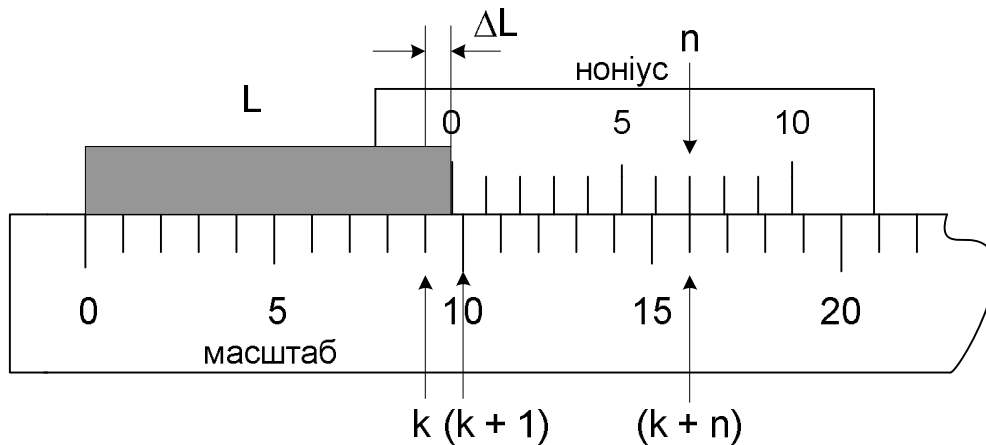


Рис. 2

Нехай L – відрізок, що вимірюється (рис. 2). Сумістимо з початком відрізка L нульову поділку основного масштабу. При цьому кінець відрізка нехай виявиться між поділками k і $(k+1)$ масштабу. Тоді можна записати:

$$L = kb + \Delta L, \quad (3)$$

де ΔL – невідома доля k – ої поділки масштабу.

Прикладемо тепер до кінця відрізка L ноніус таким чином, щоб нуль ноніуса співпав з кінцем цього відрізка. Оскільки поділки ноніуса не дорівнюють поділкам масштабу, то обов'язково на ноніусі знайдеться така поділка n , яка буде найближче підходити до відповідної $(k+n)$ – ої поділки масштабу. Як видно з рис. 2:

$$\Delta L = nb - na = n(b - a) = n \frac{b}{m} \quad (4)$$

Вся довжина:

$$L = kb + n \frac{b}{m} \quad (5)$$

Таким чином, **довжина відрізка, що вимірюється з допомогою ноніуса, дорівнює числу цілих поділок масштабу плюс точність ноніуса, помножена на номер поділки ноніуса, яка співпадає з деякою поділкою масштабу.**

Похибка, що може виникнути при такому способі відліку, зумовлюється неточним співпаданням n – ої поділки ноніуса з $(k+n)$ – тою поділкою масштабу і значення її не може бути більшим від $\frac{1}{2} \frac{b}{m}$.

Отже, **похибка ноніуса дорівнює половині його точності.**

Лінійний ноніус використовують в **штангенциркулях** (рис. 3). Предмет, що вимірюється, розташовується між ніжками A і B штангенциркуля (тобто між нульовими поділками масштабної лінійки M і ноніуса N) Для вимірювання внутрішніх розмірів тіл (наприклад, діаметра отвору) використовують частини FF обох ніжок.

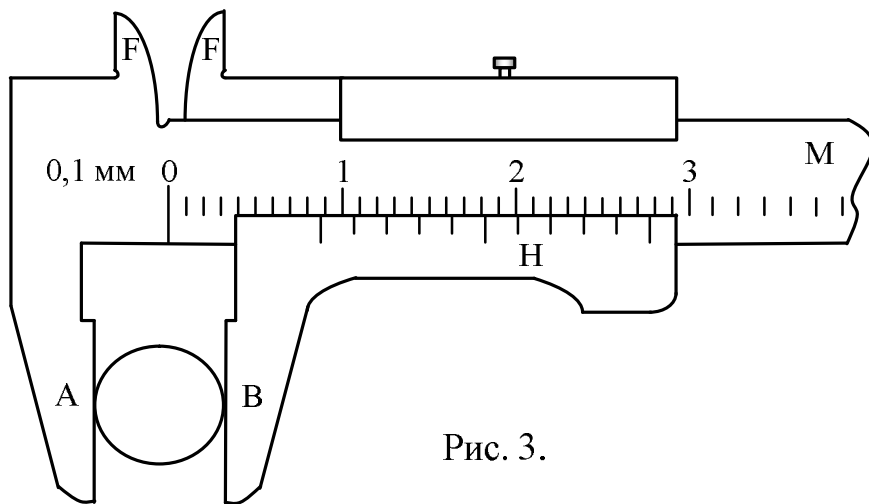


Рис. 3.

Затискаючи предмет між ніжками штангенциркуля, не прикладайте значних зусиль: деформація тіла і ніжок штангенциркуля приводять до неправильних результатів. Під час вимірювання тіл прямокутної форми слідкуйте за паралельністю масштабу і стороною, що вимірюється.

2. Вимірювання лінійних розмірів мікрометром

Для вимірювання з точністю до сотих долів міліметра використовують **мікрометр** (рис. 4). Мікрометр використовують, як правило, для вимірювання невеликих лінійних розмірів – діаметра дроту, товщини пластинки і т. ін.

Під час вимірювання предмет затискається між нерухомим стержнем *A* і рухомим торцем мікрометричного гвинта *B*. Разом з мікрометричним гвинтом обертається барабан *C*, переміщуючись при цьому поступально відносно лінійної шкали *D*.

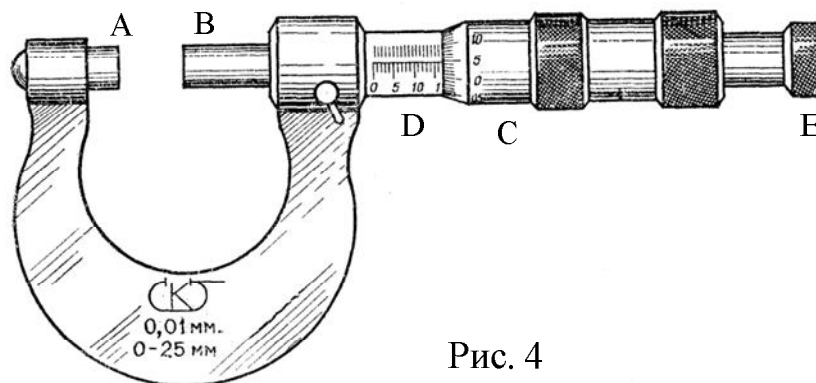


Рис. 4

Вище шкали *D* нанесені штрихи, що відповідають серединам міліметрових поділок шкали *D*. Крок мікрогвинта дорівнює $0,5$ мм, отже поступальне переміщення мікрогвинта на 1 мм відповідає двом обертам барабану. На барабані нанесена шкала, що містить 50 поділок, тобто ціна поділки шкали барабану дорівнює $0,01$ мм. Відлік числа цілих міліметрів і їх половин здійснюють по лінійній шкалі, а числа сотих долів міліметра – по шкалі барабану (навпроти поздовжньої риски лінійної шкали).

Головним джерелом помилок під час вимірювань є нерівномірність натискання гвинта на предмет, що вимірюється. В зв'язку з цим *обертання мікрометричного гвинта під час вимірювань дозволяється лише за рукоятку E*. В момент затискання рукоятка *E* продовжує обертатись з характерним потріскуванням, а барабан *C* залишається нерухомим. Спроба затиснути предмет з допомогою барабана *C* може привести до деформації предмета і до виведення з ладу самого мікрометра. Перед початком вимірювань, обертаючи рукоятку *E*, сумістіть стержні *A* і *B*. Покази мікрометра повинні бути $0,00 \pm 0,01$ мм; якщо це не так, то покази мікрометра, що відповідають нульовому значенню, слід записати і врахувати під час вимірювань.

3. Визначення маси тіла зважуванням на технічних терезах.

Технічні терези схематично зображені на рис. 5. Цифрами позначені:

- 1 – коромисло терезів;
- 2 – шальки терезів;
- 3 – стрілка – показчик;
- 4 – тягарці для регулювання;
- 5 – ручка аретира.

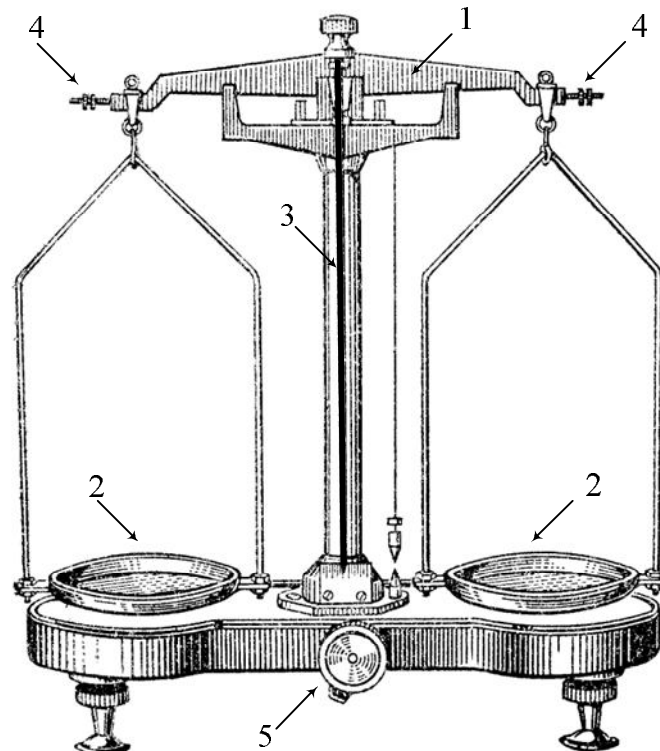


Рис. 5

Правила зважування

1. Підніміть терези з аретира рукою 5 і перевірте їх рівновагу. При відсутності рівноваги опустіть терези на аретир і переміщуйте тягарці 4, щоб

зрівноважити терези. Знову перевірте рівновагу і при необхідності повторіть вказані дії.

2. На ліву шальку терезів покладіть тіло, масу якого треба визначити, а на праву – гирьку, маса якої трохи більша, ніж маса тіла. **Терези при цьому опущені на аретир!** Підніміть терези з аретира і за відхиленням стрілки з визначте співвідношення між масами тіла і гирьки (більше – менше). Якщо маса гирьки менше, опустіть терези на аретир і повторіть зважування з гирькою більшої маси. Зважування слід починати з визначення гирьки, маса якої трохи перевищує масу тіла. Знайшовши таку гирьку, зніміть її з шальки терезів і натомість покладіть гирьку меншої маси, сусідню в наборі важків. Далі переходять до гирьок меншої маси. Пропускати гирьки в наборі не рекомендується, оскільки при цьому, можливо, доведеться повторювати зважування. Дрібні важки слід брати пінцетом. **Не забувайте кожного разу опускати терези на аретир!** Зрівноваживши тіло, підрахуйте загальну масу важків, що лежать на шальці терезів, і перенесіть важки в футляр.

3. Якщо дрібні важки відсутні, то досягнути рівноваги інколи не вдається. Припустимо, що без гирьки масою 1 г маса тіла більше суми мас важків, а з гирькою 1 г маса тіла менша суми мас важків. Тоді масу тіла вважають рівною сумі гир без гирьки 1 г плюс $0,5\text{ г}$:

$$m = (m_1 + m_2 + m_3 + \dots + 0,5\text{ г}) \pm 0,5\text{ г}.$$

Похибка визначення маси тіла дорівнює половині маси найменшого важка, використаного при зважуванні.

В більшості задач цілком достатньою є точність зважування до $0,1\text{ г}$.

4. Для коригування можливої нерівноплечості терезів рекомендується повторити зважування, поклавши тіло на праву шальку терезів, а важки – на ліву.*)

5. Не можна зважувати тіла, маса яких перевищує граничне навантаження, вказане та терезах.

6. Не можна класти на шальки терезів мокрі, брудні, гарячі тіла, насипати без використання підкладки порошки, наливати рідини.

*) Крім методу подвійного зважування, або методу Гауса, існує ще два методи, які використовуються для усунення похибки, пов'язаної з нерівністю плечей терезів: метод тарування (Бордо) та метод сталого навантаження (Менделєєва).

4. Визначення об'єму з допомогою мензурки

1. При визначенні об'єму рідини мензурку слід ставити на рівну горизонтальну поверхню.

2. Перед вимірюванням визначте ціну

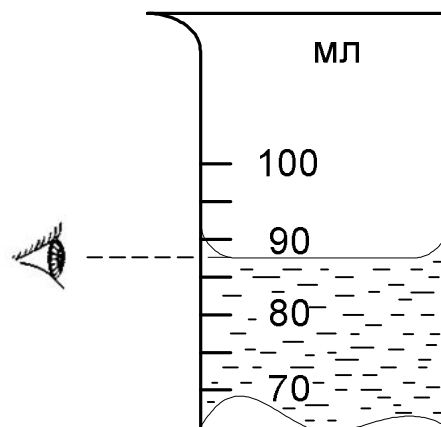


Рис. 6

поділки мензурки і запишіть її в робочий зошит.

3. Визначаючи об'єм рідини, розташовуйте око на одному рівні з поверхнею рідини. Відлік виконуйте по нижній частині меніска (рис. 6).

4. При повторних вимірюваннях об'єму тіла неправильної форми серветкою видаліть з тіла краплини рідини.

Хід роботи

Завдання 1. Визначити густину тіла правильної геометричної форми.

1. Визначте лінійні розміри тіла, обчисліть їх середні значення. При значенні лінійного розміру менше 20 мм рекомендується користуватись мікрометром.

2. Визначте масу тіла на технічних терезах.

3. Результати вимірювань зручно записувати у вигляді таблиці. Вид таблиці залежить від форми тіла, густину якого потрібно визначити. Нехай, наприклад, тіло має форму циліндра. Тоді таблиця має вид:

N_{p} n/n	$h,$ 10^{-3} м	$\Delta h,$ 10^{-3} м	$D,$ 10^{-3} м	$\Delta D,$ 10^{-3} м	$m,$ 10^{-3} кг	$\Delta m,$ 10^{-3} кг
1						
2						
3						
....						
<i>Середнє</i>						

4. Обчисліть середнє значення густини тіла.

5. Обчисліть відносну похибку вимірювань.

6. Кінцевий результат слід представити у вигляді:

$$\rho = (\rho_{cp} \pm \Delta\rho) \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (6)$$

Формула для густини тіла, що має форму циліндра, має вид:

$$\rho_{cp} = \frac{m_{cp}}{V_{cp}} = \frac{m_{cp}}{\frac{\pi D_{cp}^2}{4} h_{cp}} = \frac{4m_{cp}}{\pi D_{cp}^2 h_{cp}} \quad (7)$$

Відносна похибка для цього випадку:

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}} = \sqrt{(\Delta m / m_{cp})^2 + 2(\Delta D / D_{cp})^2 + (\Delta h / h_{cp})^2} \quad (8)$$

Завдання 2. Визначити густину тіла неправильної геометричної форми.

Завдання аналогічне попередньому, але об'єм тіла слід визначити з допомогою мензурки.

3. Контрольні запитання

1. Які системи одиниць фізичних величин ви знаєте?
2. Що називають ноніусом? Як визначити точність ноніуса?
3. В яких випадках слід користуватись штангенциркулем, а в яких – мікрометром?
4. Які правила зважування на технічних терезах?
5. Як визначити похибку вимірювань?
6. Якщо довжини плечей коромисла терезів неоднакові, то маса тіла не буде рівна масі важків. Чи можна на таких терезах правильно визначити масу тіла?
7. Як виміряти товщину листа паперу? Як визначити масу однієї краплини води? Як в цих вимірюваннях забезпечити потрібну точність результату?

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ З ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: Використавши в якості математичного маятника кульку на довгій нитці визначити прискорення вільного падіння.

Прилади і матеріали: Кулька на довгій нитці, штатив з муфтою і стержнем, секундомір, рулетка.

Теоретичні відомості

Математичним маятником називається матеріальна точка, закріплена на невагомій нерозтяжній нитці. Якщо маятник вивести з положення рівноваги і відпустити, то при малих кутах відхилення ($\alpha = 3 \div 5^\circ$) його коливання будуть гармонічними з періодом

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

де l – довжина маятника.

З формули (1) можна знайти прискорення вільного падіння:

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

Період коливань маятника визначають, вимірюючи секундоміром час t для N коливань:

$$T = \frac{t}{N} \quad (3)$$

Для виготовлення математичного маятника, як правило, використовують кульку на нитці. В цьому випадку довжина маятника – це відстань від точки підвісу до центра кульки (див. рис. 1):

$$l = l_1 + \frac{d}{2} \quad (4)$$

Відстань l можна виміряти безпосередньо рулеткою.

Хід роботи

1. Виміряйте довжину маятника l рулеткою – від точки підвісу до середини кульки. Довжина маятника повинна бути $80 \div 100$ см. Оскільки таку довжину одному вимірювати незручно, то запросіть на допомогу ще одного студента.

2. Відхиліть нитку маятника від положення рівноваги на кут $\alpha = 3 \div 5^\circ$ і відпустіть маятник. Пропустивши декілька коливань, з рахунком "нуль"

включіть секундомір. Зручно включати секундомір в момент, коли маятник перебуває в положенні максимального відхилення. Виміряйте час t для $20 - 50$ коливань.

3. Повторіть дослід ще два-три рази.

4. Обчисліть за формулою (2) прискорення вільного падіння g .

5. Результати вимірювань та обчислень зручно оформити у вигляді таблиці 1.

7. Абсолютну похибку результату Δg можна знайти як середнє арифметичне Δg_i :

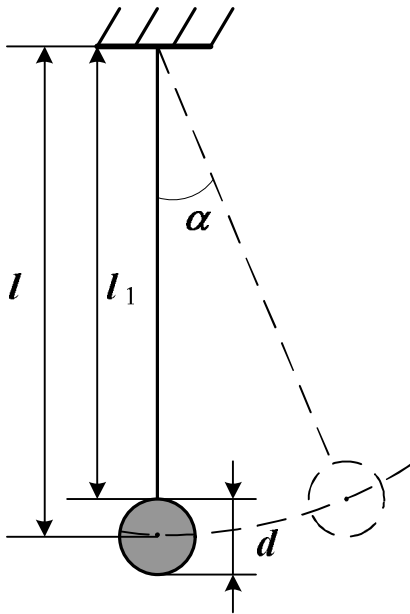


Рис. 1

$$\Delta g_{\text{сеп}} = \frac{\sum \Delta g_i}{n}, \quad (5)$$

де $\Delta g_i = |g_i - g_{\text{сеп}}|$, а n – кількість дослідів.

Δg можна також знайти як різницю між табличним значенням прискорення вільного падіння g_T і одержаним з дослідів $g_{\text{сеп}}$:

$$\Delta g = |g_{\text{сеп}} - g_T|, \quad \text{де } g_T = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Табл. 1

N_0 n/n	l	N	t	T	g	Δg	E
1							
2							
·							
·							
Середнє							

Відносна похибка:
$$E = \frac{\Delta g}{g_{\text{сер}}} \cdot 100\% \quad (6)$$

8. Відносну похибку можна оцінити також за формулою:

$$E = \left(\frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta t}{t} \right) \cdot 100\% \quad (7)$$

9. З усіх одержаних значень E слід вибрати найбільше. Результат подайте у виді:

$$g = g_{\text{сер}} \pm \Delta g \quad (8)$$

Контрольні запитання

1. Які коливання називаються гармонічними? Запишіть і поясніть рівняння гармонічного коливного руху.
2. Що називають періодом, частотою, амплітудою, фазою коливань?
3. Сформулюйте закони коливання математичного маятника.
4. Що називають прискоренням вільного падіння? Які способи визначення g ви знаєте?
5. Як залежить значення g від географічної широти?

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Мета роботи: Навчитись визначати абсолютну та відносну вологість повітря і точку роси.

Прилади і матеріали: Психрометр Асмана, дистильована вода, таблиця залежності тиску та густини насиченої водяної пари від температури, психрометрична таблиця.

Теоретичні відомості

Внаслідок неперервного випаровування води з поверхні водоймищ та рослинами атмосферне повітря завжди в своєму складі містить деяку кількість водяної пари. Вміст водяної пари в повітрі характеризують *абсолютною та відотною вологістю* повітря.

Абсолютною вологістю називають масу водяної пари, що міститься в 1 м³ повітря при даній температурі.

Інколи говорять також про *максимальну вологість*, яка вимірюється масою водяної пари, що насичує 1 м³ повітря при даній температурі.

Відносна вологість дорівнює відношенню маси водяної пари, що міститься в 1 м³ повітря, до маси водяної пари, яка б насичувала 1 м³ повітря при даній температурі.

Абсолютну вологість позначатимемо ρ_a ; одиниця її вимірювання:

$$[\rho_a] = \frac{\text{г}}{\text{м}^3};$$

Відносну вологість позначатимемо φ ; її вимірюють в процентах. За означенням:

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_n} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Оскільки парціальний тиск пари до її насичення змінюється прямо пропорційно масі пари, то *абсолютну вологість* можна характеризувати також *парціальним тиском водяної пари*; якщо цей тиск вимірювати в мм рт.ст., то числові значення ρ_a і p_a будуть майже однакові.

Відносна вологість в цьому випадку дорівнює:

$$\varphi = \frac{p_a}{p_n} \cdot 100\% , \quad (2)$$

де p_n – тиск насиченої водяної пари при температурі повітря. Значення ρ_n і p_n для різних температур наведено в табл. 1.

Один із способів визначення вологості повітря – за точкою роси. Якщо повітря охолоджувати, то при деякій температурі водяна пара, що міститься в ньому, стане насиченою.

Температуру, при якій водяна пара, що є в повітрі, стає насиченою, називають точкою роси, оскільки при подальшому охолодженні повітря випаде роса.

Зрозуміло, що ρ_a і p_a будуть дорівнювати ρ_n і p_n при температурі, рівній точці роси t_p^0 :

$$\rho_a = \rho_n(t_p^0); \quad p_a = p_n(t_p^0).$$

Знаючи температуру повітря t^0 , за таблицею 1 знаходимо відносну вологість:

$$\varphi = \frac{\rho_n(t_p^0)}{\rho_n(t^0)} \cdot 100\%, \quad \text{або} \quad \varphi = \frac{p_n(t_p^0)}{p_n(t^0)} \cdot 100\%.$$

Точку роси визначають з допомогою гігromетра Ламбрехта (див. рис. 1). Він складається з металевого циліндра 1, передня основа якого відполірована. Циліндр оточено полірованим металевим кільцем 2. Циліндр наполовину заповнюють ефіром чи спиртом 3, вставляють зверху термометр 4 і гумовою грушею 5 чи насосом продувають через циліндр повітря.

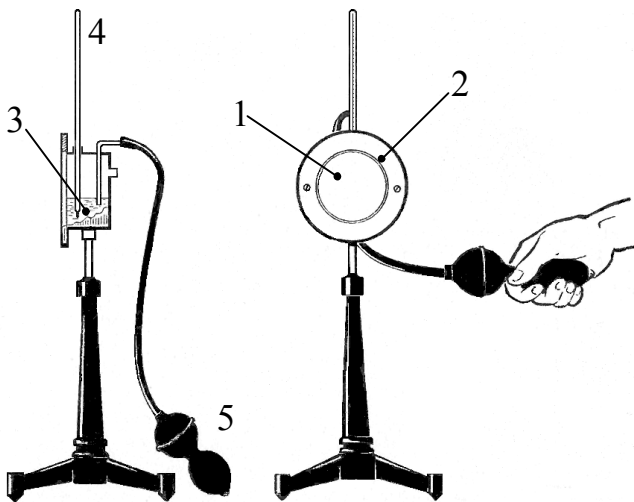


Рис. 1

Інтенсивне випаровування ефіру приводить до зниження його температури і при деякій температурі t_1^0 нижня частина основи циліндра запітніє внаслідок конденсації водяної пари, що міститься в повітрі. Після цього припиняють продувати повітря і чекають, поки при деякій температурі t_2^0 роса не зникне. Внаслідок теплової інерції приладу температури t_1^0 і t_2^0 не однакові, але мало відрізняються одна від одної. Для визначення точки роси обчислюють їх середнє арифметичне:

$$t_p^0 = \frac{t_1^0 + t_2^0}{2}.$$

Щоб повітря, яке видихає спостерігач, не попадало на гігromетр, слід відділяти гігromетр скляним екраном.

Другий спосіб вимірювання вологості – за допомогою **психрометра**.

Найпростіший психрометр (психрометр Августа) складається з двох однакових термометрів **А** і **В** (рис. 2). Термометр **А** (сухий) показує температуру повітря в кімнаті t_c^0 . Резервуар термометра **В** обтягнутий тканиною, кінець якої опущено в посудину з водою. Внаслідок випаровування води з тканини резервуар термометра **В** охолоджується і він показує температуру нижчу, ніж сухий термометр. При деякій температурі t_g^0 покази термометра **В** (вологого) не змінюються, що свідчить про настання динамічної рівноваги.

Різниця між показами сухого і вологого термометрів $t_c^0 - t_g^0$ буде тим більшою, чим менша відносна вологість повітря, і навпаки. При відносній

вологості $\varphi = 100\%$ різниця $t_c^0 - t_g^0 = 0$.

Знаючи покази сухого і вологого термометрів за психрометричною таблицею (див. табл. 2) можна визначити відносну вологість повітря. Психрометр Августа використовують для вимірювань в приміщенні, оскільки вітер буде вносити похибки при визначенні t_g^0 .

Для більш точних вимірювань і для вимірювань в польових умовах використовують **аспіраційний психрометр** або **психрометр Асмана**. Цей психрометр теж складається з двох однакових термометрів, закріплених в спеціальній оправі (рис. 3).

У верхній частині приладу міститься вентилятор, що приводиться в рух пружиною, яку закручують вручну ключем. Під час роботи вентилятора повітря проходить через трубки, в яких містяться резервуари термометрів. Резервуар одного з термометрів обгорнутий шаром батисту, який перед початком вимірювань змочують дистильованою, дощовою чи сніговою водою з допомогою спеціальної піпетки.

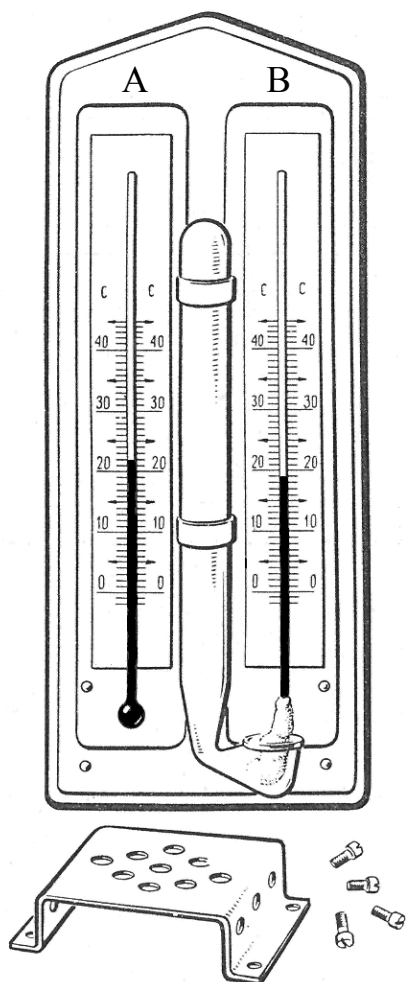


Рис. 2

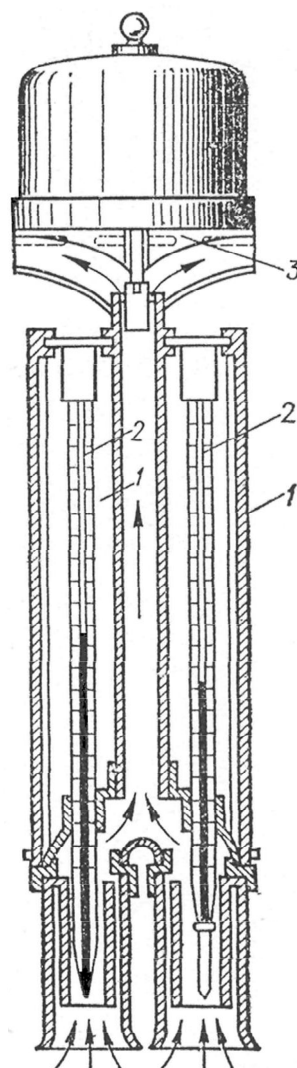


Рис. 3

Вологість повітря визначають за показами сухого і вологого термометра, як і при використанні психрометра Августа.

Записувати покази термометрів слід через 4 хв. після пуску вентилятора. Повністю закручена пружина забезпечує 8÷10 хв. роботи.

Хід роботи

Завдання 1. Визначення вологості повітря психрометром Асмана

1. З допомогою спеціальної піпетки змочіть батист на резервуарі "вологого" термометра.
2. Заведіть пружину вентилятора майже до упора. Обережно! Не прикладайте значних зусиль, щоб не зірвати пружину.
3. Підвісьте психрометр на штатив у вертикальному положенні.
4. На четвертій хвилині після пуску вентилятора запишіть покази термометрів.
5. За допомогою психрометричної таблиці (табл. 2) визначте відносну вологість повітря.
6. З допомогою табл. 1. визначте абсолютну вологість повітря.
7. Повторіть вимірювання ще двічі в інших місцях приміщення.
8. Результати вимірювань і обчислень запишіть в табл. 4.
9. Оцініть похибку вимірювання. Порівняйте одержані результати з результатами завдання 1.

Табл. 4

№	t_c^0	t_e^0	Δt	$\varphi, \%$	$\rho_n(t_c)$	ρ_a
1						
2						
3						
Середнє						

Контрольні запитання

1. Що називають абсолютною і відотною вологістю повітря?
2. Що називають точкою роси? Як за даними завдання 2 визначити точку роси?
3. Які способи визначення вологості повітря ви знаєте?
4. Який принцип будови психрометра Асмана?
5. Якою буде різниця показів термометрів психрометра при відносній вологості 100%?
6. Навіщо потрібно знати вологість повітря?

Таблиця 1. Тиск і густина насиченої водяної пари при різних температурах (p – тиск в Па; ρ_n – густина насиченої пари в г/м³)

$t, ^\circ\text{C}$	p	ρ_n	$t, ^\circ\text{C}$	p	ρ_n	$t, ^\circ\text{C}$	p	ρ_n
0	611	4,84	18	2064	15,4	36	5941	41,8
1	657	5,22	19	2197	16,3	37	6276	44,0
2	705	5,60	20	2365	17,3	38	6625	46,3
3	759	5,98	21	2487	18,3	39	6991	48,7
4	813	6,40	22	2644	19,4	40	7375	51,2
5	872	6,48	23	2893	20,6	45	9583	65,4
6	935	7,3	24	2984	21,8	50	12332	83,0
7	1001	7,8	25	3168	23,0	55	15732	104,3
8	1073	8,3	26	3361	24,4	60	19918	130
9	1148	8,8	27	3565	25,8	65	24998	161
10	1228	9,4	28	3780	27,2	70	31157	198
11	1312	10,0	29	4005	28,7	75	38543	242
12	1403	10,7	30	4242	30,8	80	47343	293
13	1497	11,4	31	4493	32,1	85	57808	354
14	1599	12,1	32	4754	33,9	90	70100	424
15	1705	12,8	33	5030	35,7	95	84513	506
16	1817	13,6	34	5320	37,6	100	101325	598
17	1937	14,5	35	5624	39,6			

Таблиця 2. Психрометрична таблиця відносної вологості повітря

Покази сухого термометра, $^\circ\text{C}$	Різниця показів сухого і вологого термометрів, $^\circ\text{C}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11					
1	100	83	65	48	32	16					
2	100	84	68	51	35	20					
3	100	84	69	54	39	24	10				
4	100	85	70	56	42	28	14				
5	100	86	72	58	45	32	19	6			
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
7	100	87	74	61	49	37	26	14			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	
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	45	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
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОТИ ПЛАВЛЕННЯ ЛЬОДУ

Мета роботи: Використовуючи рівняння теплового балансу, навчитись визначати питому теплоту плавлення льоду

Прилади і матеріали: калориметр, термометр, посудина з теплою водою, лід, мензурка, терези.

Теоретичні відомості

Питому теплоту плавлення льоду можна визначити з допомогою калориметра. Якщо у внутрішній стакан калориметра, маса якого m_k , налити воду, маса якої m_l а температура t_l , і опустити в неї шматок льоду масою m_2 при температурі $t_2 = 0$, то після того, як увесь лід розтане, встановиться температура t_3 . Рівняння теплового балансу в цьому випадку має вигляд:

$$cm_l(t_l - t_3) + c_k m_k(t_l - t_3) = m_2 \lambda + cm_2(t_3 - t_2), \quad (1)$$

де c – питома теплоємність води;

c_k – питома теплоємність речовини, з якої виготовлено стакан калориметра (алюміній);

λ – питома теплота плавлення льоду.

З рівняння (1) легко одержати:

$$\lambda = \frac{cm_l(t_l - t_3) + c_k m_k(t_l - t_3) - cm_2(t_3 - t_2)}{m_2}, \quad (2)$$

Хід роботи

1. Приготуйте 100 ÷ 150 г льоду. (Шматочок льоду розміром з сірникову коробку має масу приблизно 30 г).

2. Зважте на терезах внутрішній стакан калориметра. Поставте внутрішній стакан в зовнішній.

3. Відміряйте мензуркою 150 см³ теплої води і вилийте її у внутрішній стакан калориметра.

4. Опустіть у воду термометр і почекайте 1-2 хв., поки встановиться теплова рівновага між водою і внутрішнім стаканом калориметра. Запишіть температуру води в калориметрі t_1 .

5. Висушіть фільтрувальним папером або ганчіркою шматочки льоду і опустіть лід в калориметр. Маса льоду для одного досліду повинна дорівнювати приблизно 40 – 50 г.

6. Обережно термометром перемішуйте воду з льодом в калориметрі. Як тільки лід розтане, виміряйте температуру води в калориметрі t_3 .

7. Вилийте воду з стакана калориметра у мензурку. За збільшенням об'єму води знайдіть масу m_2 льоду, що розтанув.

8. За рівнянням (2) обчисліть питому теплоту плавлення льоду. Результати вимірювань і обчислень занесіть у таблицю 1.

9. Обчисліть відносну і абсолютну похибку вимірювань.

Аналіз формули (2) показує, що з найбільшою похибкою визначається маса льоду. Оскільки цю масу визначають як різницю двох вимірювань об'єму мензуркою, то абсолютна похибка визначається ціною поділки мензурки. Абсолютна похибка різниці температур ($t_1 - t_3$) дорівнює також ціні поділки термометра. Наближено можна вважати, що відносна похибка визначення питомої теплоти плавлення дорівнює сумі відносних похибок визначення маси льоду і різниці температур.

10. Порівняйте одержане значення питомої теплоти плавлення льоду λ з табличним значенням λ_T .

Табл. 1

№ n/n	m_k кг	c_k $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	m_l кг	c $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	t_1 $^{\circ}\text{C}$	t_3 $^{\circ}\text{C}$	m_2 кг	λ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	E %
1.									
2.									

Контрольні запитання

1. Що називають питомою (молярною) теплоємністю? В яких одиницях вона вимірюється?

2. Що називають питомою теплотою плавлення?

3. Накресліть графік залежності температури кристалічного твердого тіла від часу нагрівання.
4. Роботу можна виконувати швидко і повільно. В якому випадку похибка вимірювань буде менше? Чому?

Табличні значення теплових властивостей деяких речовин:

Питома теплоємність алюмінію $0,88 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Питома теплоємність води $4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Питома теплота плавлення льоду $330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Лабораторна робота № 5

ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ, НАПРУГИ ТА ОПОРУ

Мета роботи: Навчитись користуватись універсальним приладом типу DT830B (чи аналогічним) для вимірювання напруг, сил струмів та опорів. Виконати вимірювання напруги та сили струму в простих електричних колах. Перевірити значення запропонованих викладачем опорів та порівняти їх з номіналом, вказаним на корпусі резистора.

Прилади і матеріали: Універсальний електровимірювальний прилад з цифровою індикацією (мультиметр DT830B або аналогічний), джерело змінної та постійної напруги В-24М, реостат, вимикач, обмежувач опір, набір резисторів різних номіналів, з'єднувальні провідники.

Опис приладу

Цифровий мультиметр типу DT830B (рис. 1) призначений для вимірювання постійної та змінної напруги, сили постійного струму, опору провідників, перевірки діодів та транзисторів.

В центрі передньої панелі приладу розташована кругла ручка перемикача. Цифри на панелі навколо перемикача згруповані в зони, позначені буквами. Позначення "V $\overline{\text{---}}$ " означає зону вимірювання напруги постійного струму, "V \sim " – зону вимірювання напруги змінного струму, "A $\overline{\text{---}}$ " – зону вимірювання сили постійного струму, " Ω " – зону вимірювання опору. Самі цифри означають максимальне значення вимірюваної величини. Наприклад, цифра 200 означає

"200 В" або "200 Ом". Якщо поруч стоїть буква "m", то це означає "200 мВ" чи "200 мА"; буква "μ" означає "200 мкА", буква "k" – "200 кОм".



Рис. 1



Рис. 2

До ділянки електричного кола мультиметр приєднується за допомогою двох провідників чорного та червоного кольору, які вставляються у відповідного кольору гнізда на передній панелі (червоне гніздо з написом "VΩmA". Провідники закінчуються металевими стержнями з ізолюваними ручками; ці стержні називають щупами. При вимірюваннях щупи слід тримати за ізолювані ручки. На стержні щупів в окремих випадках зручно надівати затискачі типу "крокодил". Для вимірювання великих струмів (до 10 А) використовується окреме гніздо червоного кольору з написом "10A DC". Роботу мультиметра забезпечує гальванічний елемент, тому, закінчивши вимірювання, слід обов'язково вимкнути живлення приладу, для чого поставити перемикач в положення "OFF".

Якщо мультиметр увімкнений, але не підключений до ділянки кола, а перемикач перебуває в положенні "A" чи "V", то на цифровому індикаторі висвічуються нулі. Якщо перемикач перевести в положення "Ω" (мультиметр не підключений до ділянки кола), то на індикаторі висвічується цифра "1". Цифра "1" з'являється на індикаторі також у випадку, коли значення вимірюваної величини більше встановленої межі вимірювання.

Починати вимірювання рекомендується з найбільшої межі вимірювання, переходячи до меншої в разі необхідності.

Джерелом живлення мультиметра є батарея типу «Крона». Якщо при переведенні перемикача в одне з робочих положень індикатор не світиться, або на екрані з'являється зображення батареї, то її необхідно замінити. Для заміни батареї треба викрутити два гвинта на задній кришці приладу і відкрити її (рис. 2). Поруч з батареєю знаходиться запобіжник, розрахований на струм 200 мА. Якщо мультиметр не вимірює струм, то найбільш імовірно – згорів запобіжник і його треба замінити. Перед заміною батареї чи запобіжника мультиметр треба вимкнути і від'єднати щупи від електричних кіл.

Абсолютні похибки приладу наведено нижче.

Постійний струм: $\Delta U = 0,5\%$ від $U + 2 D$, $\Delta I = 1\%$ від $I + 2 D$.

Змінний струм: $\Delta U = 1,2\%$ від $U + 10 D$.

Опір: $\Delta R = 0,8\%$ від $R + 2 D$, де D – одиниця найменшого розряду.

Наприклад, при вимірюванні напруги постійного струму покази вольтметра $U = 2,79$ В, межа вимірювання 20 В. Одиниця найменшого розряду 0,01 В. $\Delta U = 0,005 \cdot 2,79$ В + $2 \cdot 0,01$ В = $0,03395$ В $\approx 0,03$ В.

Результат вимірювання слід записати у виді: $U = (2,79 \pm 0,03)$ В.

При вимірюванні опору $R = 8,1$ Ом, межа 200 Ом, одиниця найменшого розряду – 0,1 Ом. $\Delta R = 0,008 \cdot 8,1$ Ом + $2 \cdot 0,1$ Ом = $0,2648$ Ом $\approx 0,3$ Ом.

Результат вимірювання опору: $R = (8,1 \pm 0,3)$ Ом.

Хід роботи

1. Уважно вивчіть передню панель мультиметра. При виникненні запитань зверніться до опису приладу або до викладача.
2. Увімкніть мультиметр перемикачем, прослідкуйте за зміною індикації при переході з однієї межі на іншу.
3. Залиште перемикач в положенні " Ω 2000k". Приєднайте щупи мультиметра до одного з резисторів (див. рис. 3) і запишіть значення його опору в зошит. Виберіть межу вимірювання, яка дає найбільшу точність. Порівняйте одержане з вимірювань значення опору з номіналом, вказаним на корпусі резистора. Врахуйте, що опір резистора вказується з похибкою 10 % (для окремих резисторів – 5 % чи навіть 1 %). Зробіть висновок.
4. Пункт 3 виконайте для всіх резисторів, що є в наборі. Закінчивши вимірювання, вимкніть прилад (OFF).
5. Підключіть до лабораторної мережі з напругою 220 В джерело змінного та постійного струму В-24М.
Будьте обережні! Напруга мережі 220 В небезпечна!
6. Перемикач мультиметра поставте в положення " $V\sim$ " 200 В.
Будьте уважні: неправильне положення перемикача може привести до псування приладу!
7. Увімкніть В-24М тумблером "Сеть" і поверніть ручку регулятора напруги В-24М за годинниковою стрілкою приблизно на середину шкали. На короткий час приєднайте щупи мультиметра до клем В-24М, позначених " \sim ". Нагадаємо, що щупи потрібно тримати за діелектричні ручки. Запишіть напругу змінного струму в зошит.

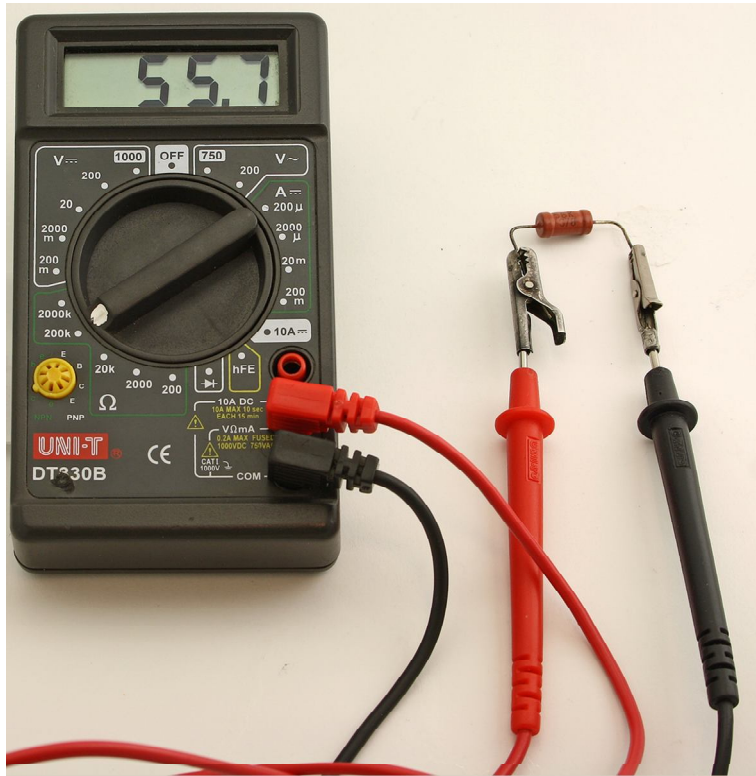


Рис. 3

8. Переведіть перемикач мультиметра в положення " $V \text{ --- }$ " 200 В. На короткий час приєднайте провідники мультиметра до клем В-24М, позначених "– +" (чорний "–", червоний "+"). Запишіть в зошит значення напруги постійного струму. Що буде, якщо чорний і червоний провідники поміняти місцями? Це можна зробити, прилад розрахований на таку процедуру. Закінчивши вимірювання, виключіть В-24М і мультиметр.

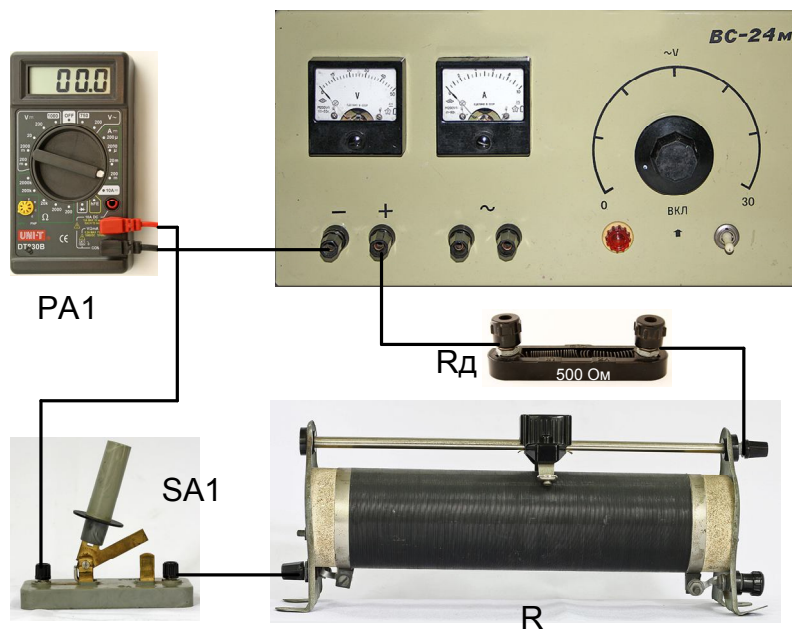


Рис. 4

9. Складіть електричне коло за схемою рис. 4. Значення додаткового опору $R_d = 200 \text{ Ом}$, максимальний опір реостату $R = 500 \text{ Ом}$. Перемикач мультиметра поставте в положення "A $\overline{\text{---}}$ 200 m". Після перевірки схеми викладачем увімкніть В-24М і замкніть ключ К. Запишіть покази мультиметра. Змінюючи опір реостату, простежте за зміною струму в колі. Закінчивши вимірювання, вимкніть прилади і розберіть електричне коло.

Контрольні запитання

1. Які фізичні величини можна вимірювати мультиметром?
2. Які максимальні значення величин дає можливість виміряти мультиметр?
3. Якщо під час вимірювання опору на межі " Ω 2000k" мультиметр показує нулі, то що це означає?
4. Іноді з'єднувальні провідники ламаються, але ізоляція не дає можливості відрізнути цілий провідник від пошкодженого. Як з допомогою мультиметра знайти пошкоджений провідник?
5. Як "продзвонити" джгут провідників, тобто у пучку провідників знайти кінці одного й того ж провідника?
6. Для чого в електричному колі потрібен реостат?

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРИСНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА К.К.Д. ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Мета роботи: Експериментально дослідити, як залежить корисна потужність і коефіцієнт корисної дії джерела струму від опору навантаження.

Прилади і матеріали: Батарея з двох гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру АА, мультиметр типу DT830В, магазин опорів Р33, додаткові опори на колодках з затискачами 1 Ом і 14 Ом, вимикач, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Повне коло складається з джерела струму, е.р.с. якого \mathcal{E} і внутрішній опір r , та зовнішнього опору R . Сила струму I в такому колі визначається законом Ома для повного кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad (1)$$

При проходженні струму частина енергії джерела витрачається в зовнішній ділянці кола, а частина – у внутрішній. Робота струму в зовнішній частині кола дорівнює $I^2 R t$, у внутрішній – $I^2 r t$.

Повна робота струму:

$$A = I^2 R t + I^2 r t. \quad (2)$$

Потужність – це фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи до часу:

$$P = \frac{A}{t}$$

Поділивши (2) на t , одержимо:

$$P = I^2 R + I^2 r = P_k + P_i. \quad (3)$$

Перший доданок $P_k = I^2 R$ визначає потужність струму в зовнішній частині кола, цю потужність називають **корисною потужністю**. Другий доданок $P_i = I^2 r$ – це потужність струму у внутрішній частині кола.

З (1) одержимо:

$$I(R + r) = \mathcal{E};$$

тепер (3) можна подати у виді:

$$P = I^2 (R + r) = I \mathcal{E}. \quad (4)$$

Коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) джерела струму називають відношення корисної потужності до повної:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P} = \frac{I^2 R}{I \cdot \mathcal{E}} = \frac{IR}{\mathcal{E}} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}. \quad (5)$$

Вираз для $P_{\text{кор}}$ перетворимо, використавши (1):

$$P_{\text{кор}} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2} \quad (6)$$

З виразу (6) видно, що $P_{\text{кор}}$ дорівнює нулю у двох випадках: при короткому замиканні ($R = 0$) і при розімкнутому колі ($R = \infty$).

Досліджуючи вираз (6) як функцію $f(R)$ на екстремум, можна показати, що корисна потужність має максимум при $R = r$; максимальне значення корисної потужності дорівнює:

$$P_{\text{кор}}^{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r} \quad (7)$$

Згідно з виразом (5), к.к.д. в цьому випадку дорівнює $\eta = 0,5$ або $\eta = 50\%$. В багатьох випадках такий к.к.д. є не вигідним. К.к.д. дорівнює 100%, якщо коло розімкнене ($R = \infty$), але при цьому $P_k = 0$. Таким чином, одержати одночасно і максимальну корисну потужність і максимальний к.к.д. неможливо.

В електроенергетиці намагаються забезпечити високий к.к.д. установок. Для цього потрібно, щоб опір зовнішньої частини кола R був більший від внутрішнього опору r джерела.

Опис схеми для вимірювання

Принципова схема установки зображена на рис. 1, монтажна – на рис. 2. Вона складається з послідовно з'єднаних джерела струму GB1, додаткових опорів R і $R1$, магазину опорів $R2$ та вимикача. Для вимірювання сили струму використано наступний прийом. В коло замість міліамперметра включений опір R , значення якого дорівнює 1 Ом. Якщо паралельно до опору R підключити мілівольтметр від мультиметра, то його покази відповідатимуть струму в міліамперах.

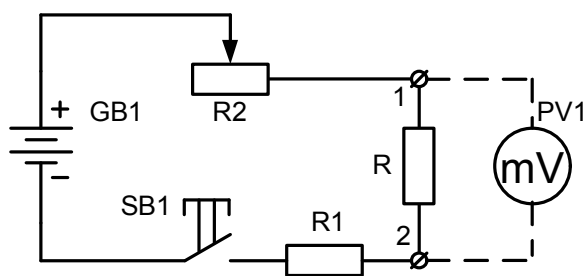


Рис. 1

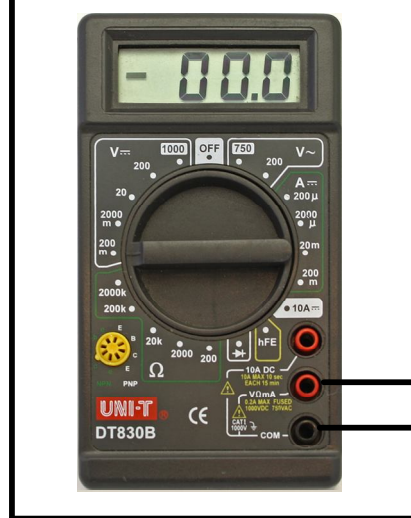


Рис. 2

Як джерело струму використовується батарея з двох з'єднаних послідовно гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру АА.

Гальванічні елементи і акумулятори мають дуже малий внутрішній опір, порівняний з опором з'єднувальних провідників. Оскільки необхідно дослідити роботу джерела струму при опорах навантаження як більших, так і менших внутрішнього опору, то в схему включено додатковий опір R1, який штучно збільшує опір гальванічного елемента. Значення опору R1 вибране таким чином, щоб сума опорів R1 і R становила певне ціле число Ом. В даній установці ця сума дорівнює 15 Ом. За допомогою магазину опорів P33 в коло вмикають опори 2, 4, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 60 Ом.

Хід роботи

- Зберіть коло за схемою рис. 1, 2.
- Уточніть у викладача і запишіть в робочий зошит значення внутрішнього опору: $r=15 \text{ Ом}$.
- Встановіть на магазині опорів опір 2 Ом. До затискачів 1 і 2 (див. рис. 1) приєднайте мультиметр, переключивши його в режим вимірювання напруги постійного струму $V \text{ ---}$ (межа вимірювання – 200 мВ).
- Натисніть кнопку *SBI* і запишіть значення струму при навантаженні 2 Ом.
- Встановіть на магазині опір 4 Ом, знову натисніть *SBI* і запишіть значення сили струму для опору 4 Ом.
- Пункт 5 повторіть для значень опорів 7, 10, 15, 20, 30, 40 і 60 Ом.
- Обчисліть для кожного значення опору навантаження R корисну потужність $P_{кор}$ і к.к.д. η :

$$P_{кор} = I^2 R; \quad \eta = \frac{I}{I + \frac{r}{R}}.$$

- Результати вимірювань і обчислень зручно подати у виді таблиці 1.

Табл. 1

$R,$ Ом	$I,$ $\cdot 10^{-3} \text{ A}$	$P_{кор},$ $\cdot 10^{-3} \text{ Вт}$	$\eta,$ $\%$
2			
4			
7 і т. д.			

- Побудуйте графіки залежностей $P_{кор}(R)$ і $\eta(R)$. Зробіть висновок.

Контрольні запитання

- Сформулюйте Закон Ома для повного кола
- В яких одиницях вимірюються робота і потужність електричного струму?
- Що називають к.к.д. джерела струму?
- З якою метою в схему включають додатковий опір? З яких міркувань вибране його значення?

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи: Познайомитись з методом тангенс-гальванометра для визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі, і визначити цю складову.

Прилади і матеріали: тангенс-гальванометр, реостат, батарея акумуляторів, міліамперметр, перемикач, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

В просторі, що оточує провідники зі струмом та постійні магніти, існує силове поле, яке називають *магнітним полем*. Це поле можна виявити, якщо внести в нього провідник зі струмом чи постійний магніт (магнітну стрілку): поле буде діяти на них з певною силою.

Дослід показує, що сила, яка діє на провідник зі струмом в магнітному полі, прямо пропорційна силі струму I , довжині провідника l і залежить від орієнтації провідника. Максимальне значення цієї сили, яку називають *силою Ампера*, дорівнює:

$$F_A^{max} = B \cdot I \cdot l \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності B характеризує магнітне поле; його називають *індукцією магнітного поля*:

$$B = \frac{F_A^{max}}{I \cdot l} \quad (2)$$

Одиницею вимірювання магнітної індукції є *тесла*:

$$[B] = \frac{H}{A \cdot m} = Tл \text{ (тесла)}.$$

Залежність сили Ампера від орієнтації провідника говорить про те, що магнітне поле має напрям, тобто індукція магнітного поля - величина векторна. За напрям магнітного поля беруть напрям сили, що діє на північний полюс магнітної стрілки. Отже, стрілка в магнітному полі завжди орієнтується вздовж вектора магнітної індукції \vec{B} (див. рис. 1).

Зображають магнітні поля з допомогою *ліній магнітної індукції*: так називають лінії, дотична до яких в кожній точці співпадає з напрямком вектора \vec{B} .

Коловий струм створює магнітне поле, напрям ліній індукції якого визначається правилом свердлика. Тому, якщо взяти коловий струм,

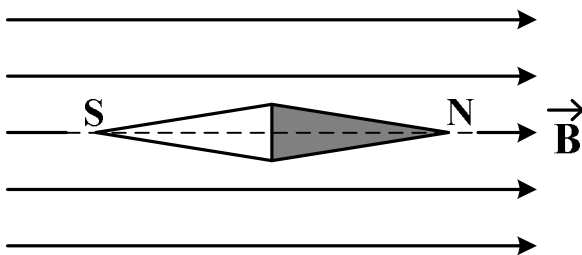


Рис. 1

розташований у вертикальній площині, встановити в його центрі маленьку магнітну стрілку, яка може обертатись у горизонтальній площині, то стрілка буде намагатись розташуватися своєю віссю перпендикулярно до площини кільця.

Індукція магнітного поля в центрі колового струму визначається з допомогою закону Біо-Савара-Лапласа:

$$B = \mu_0 \mu \frac{I \cdot n}{2R}, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна стала, значення якої дорівнює:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} = 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

μ – відносна магнітна проникність середовища,

I – сила струму,

R – радіус колового струму,

n – кількість витків котушки.

Але на магнітну стрілку, встановлену в центрі кільця, буде діяти крім магнітного поля струму, ще й магнітне поле Землі. Якщо площина колового струму співпадає з площиною магнітного меридіану, то магнітна стрілка розташується так, що її вісь утворить з площиною магнітного меридіану деякий кут α , значення якого залежатиме як від сили струму, так і від магнітного поля

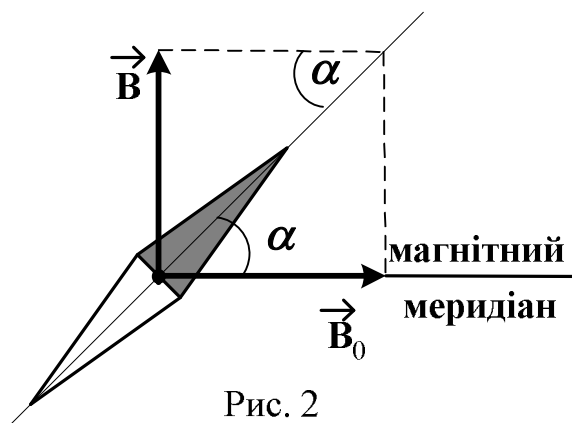


Рис. 2

Землі в даному місці. Якщо струму не буде, то стрілка встановиться в площині магнітного меридіану. Лінії індукції магнітного поля Землі не паралельні поверхні Землі, тобто вільно підвішена магнітна стрілка розташується під деяким кутом до горизонталі. Цей кут називається **кутом магнітного нахилення**. В даній роботі ми знаходимо горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі. Позначимо цю складову \vec{B}_0 . Вектор

індукції магнітного поля колового струму \vec{B} , вектор горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі \vec{B}_0 і вісь магнітної стрілки будуть розташовані так, як показано на рис. 2.

З рисунка видно, що модулі векторів \vec{B} і \vec{B}_0 зв'язані співвідношенням:

$$\frac{B}{B_0} = \text{tg} \alpha \quad (4)$$

Підставимо в (4) вираз (3):

$$\frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I \cdot n}{2R \cdot B_0} = \text{tg} \alpha, \text{ звідки:}$$

$$B_0 = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I \cdot n}{2R \cdot \text{tg} \alpha} \quad (5)$$

Опис приладу

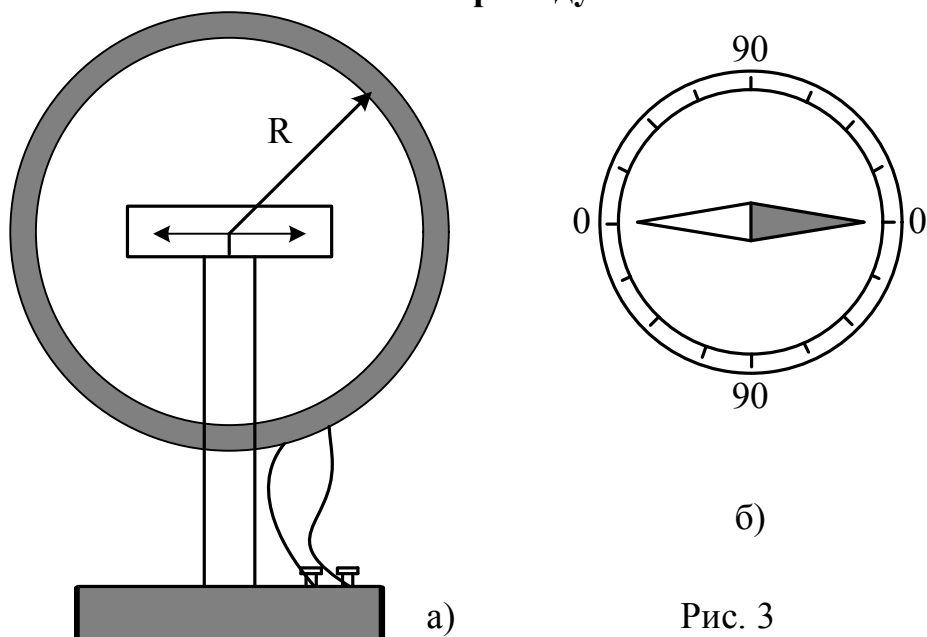


Рис. 3

Прилад, який називають "тангенс–гальванометр" (або "тангенс–бусоль"), складається з круглої рамки, на яку намотано декілька витків ізолюваного дроту (рис. 3а). Площина рамки розташована вертикально і в центрі її закріплена магнітна стрілка (рис. 3б), що може обертатись в горизонтальній площині. Стрілка оточена лімбом з поділками. Рамка приєднується до джерела струму через міліамперметр і реостат так, як показано на рис. 4.

Примітка. Під час роботи з тангенс-гальванометром необхідно слідкувати, щоб поблизу приладу не було залізних чи сталевих предметів.

Хід роботи

1. Якщо магнітна стрілка бусолі поставлена на аретир, то зніміть її з аретира, повертаючи оправу магнітної стрілки бусолі проти годинникової стрілки.
2. Дочекавшись припинення коливань магнітної стрілки, розверніть круглу рамку з дротом так, щоб її площина збігалась би з площиною магнітного меридіану, тобто з площиною стрілки.
3. Поверніть корпус бусолі так, щоб магнітна стрілка вказувала обома кінцями на позначки "0" лімба.
4. Зберіть схему згідно рис. 4. **Джерело струму можна підключити лише після перевірки схеми викладачем!**
5. Замкніть коло перемикачем Π і, пересуваючи ковзний контакт реостату, встановіть струм $30 \div 50$ мА.
6. Визначте кут відхилення α магнітної стрілки. Для цього визначте кути відхилення кінців стрілки α_1, α_2 при пропусканні струму в одному напрямі, потім – α_3, α_4 при пропусканні струму в протилежному напрямі. Напря...

струму змінюється при зміні положення перемикача Π . Знайдіть середнє арифметичне:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4}.$$

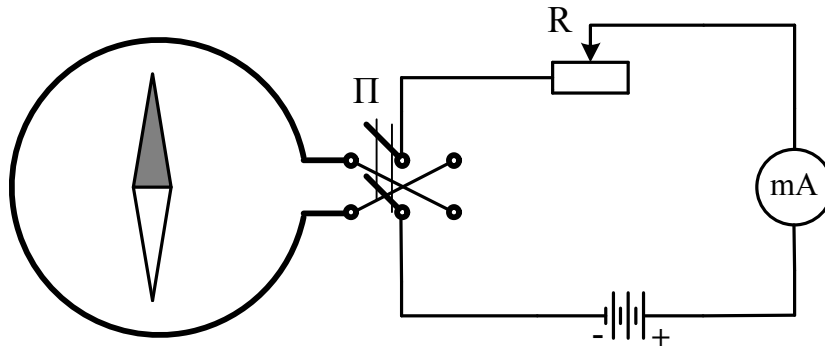


Рис. 4

7. Виміряйте діаметр круглої рамки, на яку намотано дріт, і обчисліть радіус кільця провідника зі струмом.
8. За формулою (5) обчисліть горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі B_0 .
9. Дослід повторіть не менше трьох раз при різних значеннях сили струму. Знайдіть $B_0^{сер}$.
10. Результати роботи можна оформити у вигляді таблиці 1.

Табл. 1.

N_0 n/n	n	R	I	$\bar{\alpha}$	B_0	ΔB_0
1						
2						
...						
<i>Середнє</i>			—	—		

Контрольні запитання

1. Прояви земного магнетизму.
2. Що називають "магнітним схиленням" і "магнітним нахиленням"? Як змінюється магнітне нахилення при переході від екватора до полюса?
3. Опишіть метод визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі, використаний в даній роботі.
4. В яких одиницях вимірюється індукція магнітного поля?
5. Як знайти напрям і числове значення індукції магнітного поля в центрі колового струму?

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ
СКЛА З ДОПОМОГОЮ МІКРОСКОПА

Мета роботи: Визначити показник заломлення скла за вимірюванням дійсної та оптичної товщини товстої скляної пластинки.

Прилади і матеріали: мікроскоп з індикатором малих переміщень, мікрометр, скляна пластинка з штрихами на обох поверхнях.

Теоретичні відомості

При проходженні світла через плоску межу двох прозорих речовин неоднакової оптичної густини падаючий промінь розділяється на два промені – відбитий OB і заломлений OD (рис. 1).

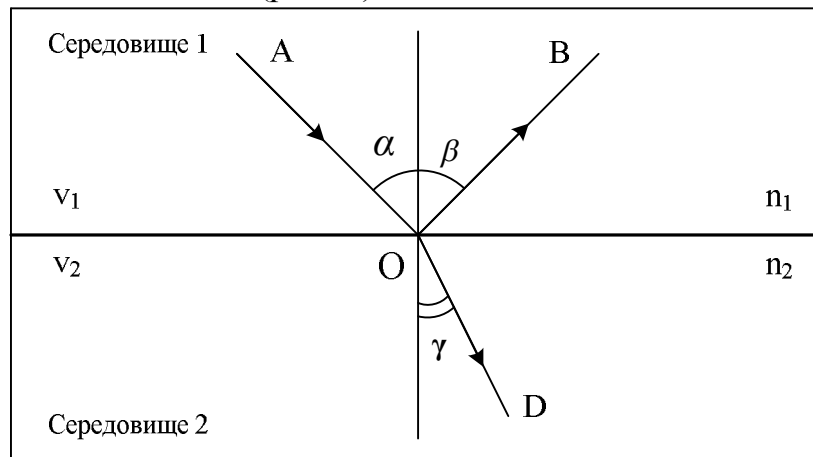


Рис. 1

Напрямок цих променів визначають закони відбивання і заломлення світла :

Промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні в точці падіння лежать в одній площині. Кут відбивання дорівнює куту падіння.

Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до поверхні в точці падіння лежать в одній площині. Відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ для даних двох середовищ – величина стала.

Це відношення називають *відносним показником заломлення другого середовища відносно першого.*

Відносний показник заломлення дорівнює відношенню швидкості світла в першому середовищі v_1 до швидкості світла в другому середовищі v_2 :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}. \quad (1)$$

Явище заломлення світла говорить про те, що світло поширюється в різних середовищах з різною швидкістю. Якщо середовище 1 – вакуум, то показник заломлення n даного середовища 2 по відношенню до вакууму називають **абсолютним показником заломлення даного середовища**; він обчислюється за формулою:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, v – фазова швидкість світла в даному середовищі 2.

Показник заломлення залежить від довжини хвилі світла і від властивостей середовища. Абсолютні показники заломлення в області прозорості речовини більші одиниці. Це означає, що швидкість поширення світла в даному середовищі завжди менша, ніж у вакуумі.

Відносний показник заломлення двох середовищ n_{21} пов'язаний з абсолютними показниками заломлення середовищ n_1 і n_2 співвідношенням:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c \cdot n_2}{c \cdot n_1} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Для визначення показника заломлення речовини існують різні методи. Одним з них є метод, в якому використовують мікроскоп. В основі методу лежить явище уявного зменшення товщини скляної пластинки внаслідок заломлення світлових променів, які проходять в склі, при розгляданні пластинки нормально до її поверхні. Схема проходження променів показана на рис. 2.

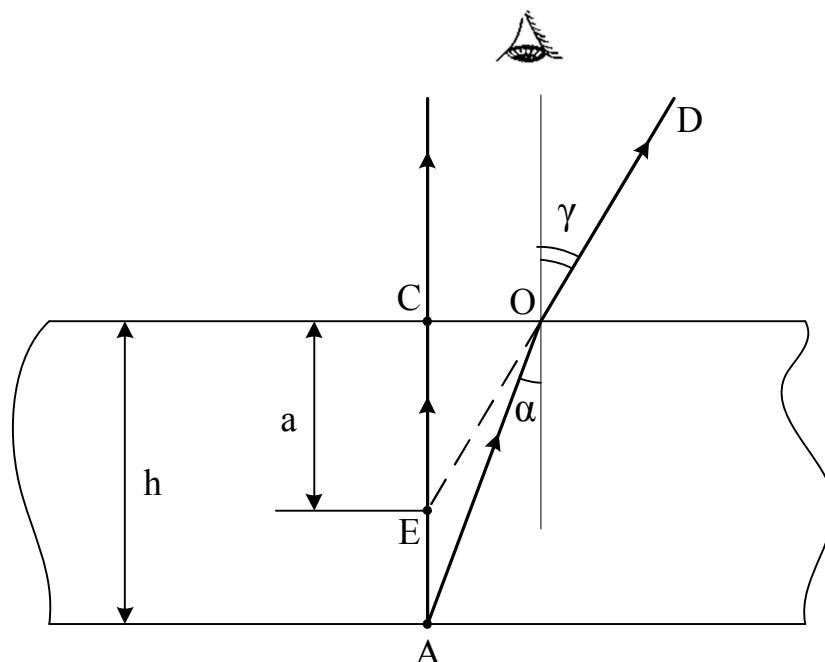


Рис. 2

З точки A , яка знаходиться на нижній поверхні скляної пластинки, виходять два промені світла AC і AO . Промінь AC падає на пластинку нормально до її поверхні і тому не зазнає заломлення. Промінь AO падає під

кутом α і заломлюється, виходячи з пластинки в точці O в напрямку до точки D .

При виході з пластинки промінь OD утворює кут заломлення γ , який більший, ніж кут падіння. Якщо дивитись на пластинку зверху, то спостерігач буде бачити точку перетину променів OD і AC не в точці A , а в точці E , тобто видима товщина пластинки $CE = a$ менша дійсної її товщини $CA = h$.

Для променів, близьких до нормалі, кути падіння і заломлення малі. В цьому випадку синуси кутів можна замінити на тангенси і за законом заломлення світла написати (розглядаючи зворотний хід променів, від D до A):

$$n_{\text{скла}} = \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (4)$$

$$\text{з } \triangle CAO : \angle CAO = \alpha; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{CO}{CA} = \frac{CO}{h},$$

$$\text{з } \triangle CEO : \angle CEO = \gamma; \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{CO}{CE} = \frac{CO}{a}.$$

Підставивши в (4) ці вирази, одержимо:

$$n_{\text{скла}} = \frac{h}{a}. \quad (5)$$

Отже, показник заломлення скла можна знайти як відношення дійсної товщини пластинки до уявної її товщини.

Хід роботи

1. Виміряйте мікрометром або індикатором дійсну товщину скляної пластинки h в тому місці, де нанесені штрихи. Вимірюючи h індикатором, закріпленим на тубусі мікроскопа, дотримуйтесь наступного порядку дій:

- 1) Піднявши тубус мікроскопа, зніміть скляну пластинку.
- 2) Опускайте тубус до тих пір, поки шток індикатора не доторкнеться столика мікроскопа. При подальшому опусканні шток почне підніматися і стрілки індикатора прийдуть в рух.
- 3) Рухаючи тубус встановіть маленьку стрілку індикатора на нуль.
- 4) Повертаючи кільце на оправі індикатора, встановіть велику стрілку на нуль.
- 5) Піднявши рукою верхню частину штока індикатора, покладіть на предметний столик мікроскопа скло (поблизу штрихів). Опустіть шток.
- 6) Запишіть покази індикатора h (маленька стрілка – мм, велика – 0,01 мм).

Вимірювання дійсної товщини скляної пластинки виконайте декілька раз. Визначте середнє значення h .

2. Підніміть тубус мікроскопу і покладіть пластинку на столик мікроскопу під об'єктив так, щоб обидва штриха перетинали оптичну вісь приладу. Шток індикатора повинен торкатись поверхні пластинки. Дивлячись в окуляр, відрегулюйте дзеркальцем освітлення поля зору мікроскопа.

3. Рухаючи тубус, отримайте в мікроскопі чітке зображення штриха, нанесеного на верхню поверхню пластинки. Запишіть покази індикатора x_1 .

4. Опускайте тубус мікроскопу до тих пір, поки не отримаєте чітке зображення штриха на нижній стороні пластинки. Знову запишіть покази індикатора x_2 . Різниця відліків індикатора дає уявну товщину пластинки a :

$$a = x_2 - x_1$$

5. За формулою (5) обчисліть показник заломлення.

6. Вимірювання уявної товщини скляної пластинки виконайте теж декілька раз. Визначте середнє значення показника заломлення скла та обчисліть похибку вимірювань.

Результат запишіть у вигляді:

$$n = \bar{n} \pm \Delta n.$$

Зауваження:

1. Похибка приладу при вимірюванні дійсної Δh_{np} і уявної Δa_{np} товщини пластинки дорівнює цінні поділки індикатора, тобто $0,01$ мм, оскільки h і a знаходиться як різниця двох вимірювань.

2. Результати вимірювань і обчислень можна оформити у вигляді таблиці 1.

Табл.1

N_0 n/n	h	Δh	x_1	x_2	$\Delta x = a$	Δa	n	Δn
1.							-	-
2.							-	-
3.							-	-
4.							-	-
5.							-	-
<i>Середнє</i>			-	-				

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закони відбивання і заломлення світла.
2. Що називають відносним показником заломлення речовини?
3. Що називають абсолютним показником заломлення речовини?
4. Від чого залежить показник заломлення речовини?
5. Коли спостерігається явище повного відбивання світла?
6. Покажіть хід променів через систему повітря - скло - повітря.
7. Чи залежить показник заломлення від товщини скляної пластинки?
8. Відстань від поверхні води до дна 1 м. Якою буде здаватись глибина водойми при погляді зверху?

ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНОЇ ФОКУСНОЇ ВІДДАЛІ ЛІНЗИ

Мета роботи: Навчитись визначати фокусну віддаль збираючої та розсіювальної лінз та обчислювати оптичну силу лінзи.

Прилади і матеріали: набір лінз, оптична лава, екран, освітлювач з фігурним отвором, який закрито матовим склом (або свічка), рулетка.

Теоретичні відомості

У формулі тонкої лінзи

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (1)$$

F – це головна фокусна віддаль лінзи, d – відстань від предмету до оптичного центру лінзи, f – відстань від оптичного центру лінзи до зображення предмету.

Точно визначити відстані d і f на практиці не можна, оскільки невідоме точне положення оптичного центру лінзи. Усунути таку проблему можна методом Гаусса-Бесселя.

Одержимо дійсне різке зображення предмету (наприклад, збільшене та перевернуте) на екрані E (див. рис. 1).

Виміряємо відстань M від предмету AB до екрану. Відмітимо на оптичній лаві положення лінзи L і пересунемо лінзу в положення L' , при якому на екрані знову одержується зображення предмету (тепер воно буде зменшене). Відстань між положеннями лінзи $LL' = a$ теж виміряємо. Оскільки d і f входять в формулу (1) симетрично, то $f' = d$, а $d' = f$. Переміщення довільної точки лінзи a дорівнює зміщенню її оптичного центру.

З рис. 1 одержуємо: $M = f + d$, $a = f - d$; звідки:

$$f = \frac{M + a}{2} \quad (2)$$

$$d = \frac{M - a}{2} \quad (3)$$

Підставивши (2) і (3) в формулу (1), після перетворень одержимо:

$$F = \frac{M^2 - a^2}{4M} \quad (4)$$

Розсіювальна лінза утворює лише уявне зображення, яке не можна одержати на екрані, тобто не можна виміряти відстань від лінзи до зображення. Тому фокусну віддаль розсіювальної лінзи можна визначити, якщо використати другу збираючу лінзу.

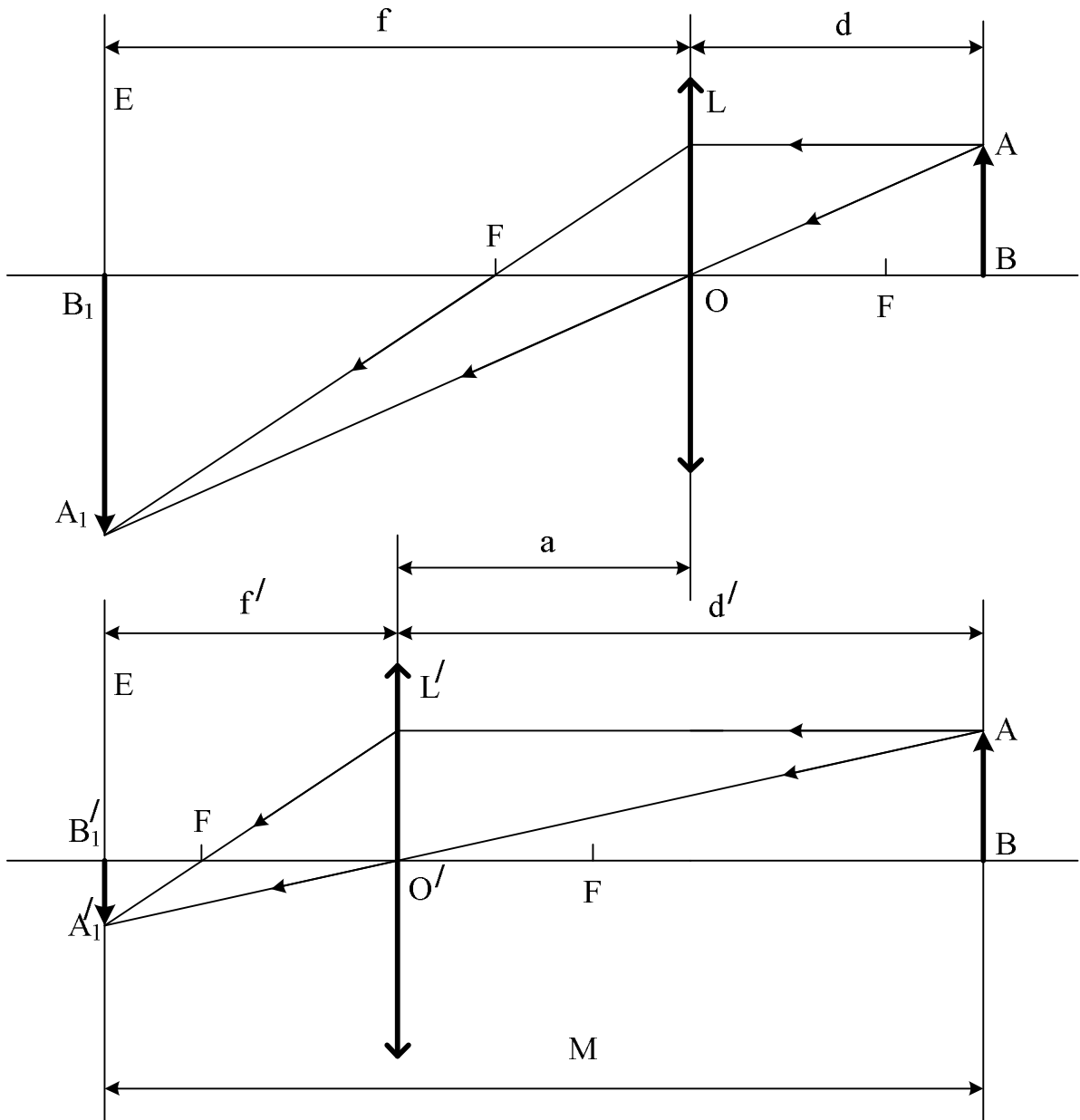


Рис. 1

На рис. 2 показано, як одержується зображення в розсіювальній лінзі. Зображення в такій лінзі буде уявним, зменшеним і прямим. Для уявного зображення $f < 0$, фокусна віддаль розсіювальної лінзи теж від'ємна.

Для знаходження фокусної віддалі такої лінзи спочатку з допомогою збираючої лінзи одержуємо дійсне зображення A_1B_1 предмета AB на екрані E_2 . Потім між збираючою лінзою і екраном ставимо розсіювальну лінзу. Дійсне зображення джерела при цьому зміщується (див. рис. 3). Нове положення зображення A_2B_2 можна знайти, переміщуючи екран. Вимірюючи d і f , за формулою лінзи (1) обчислюємо F . Використовуючи (1) слід врахувати, що в даному випадку для розсіювальної лінзи уявним є предмет A_1B_1 а зображення A_2B_2 – дійсне, тобто в (1) $d < 0$, а $f > 0$. Фокусна віддаль розсіювальної лінзи $F < 0$.

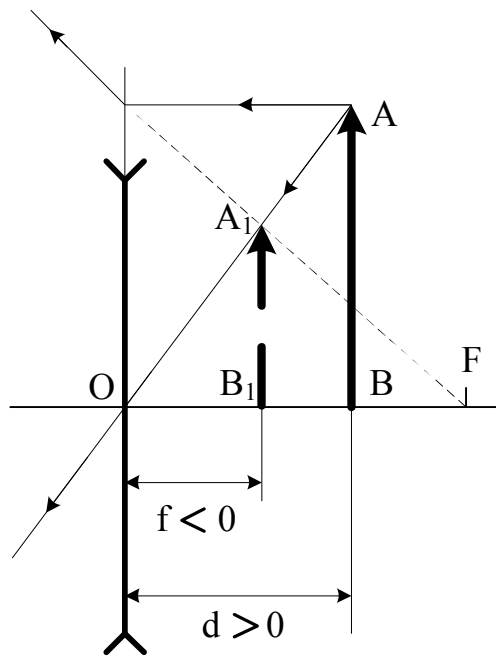


Рис. 2

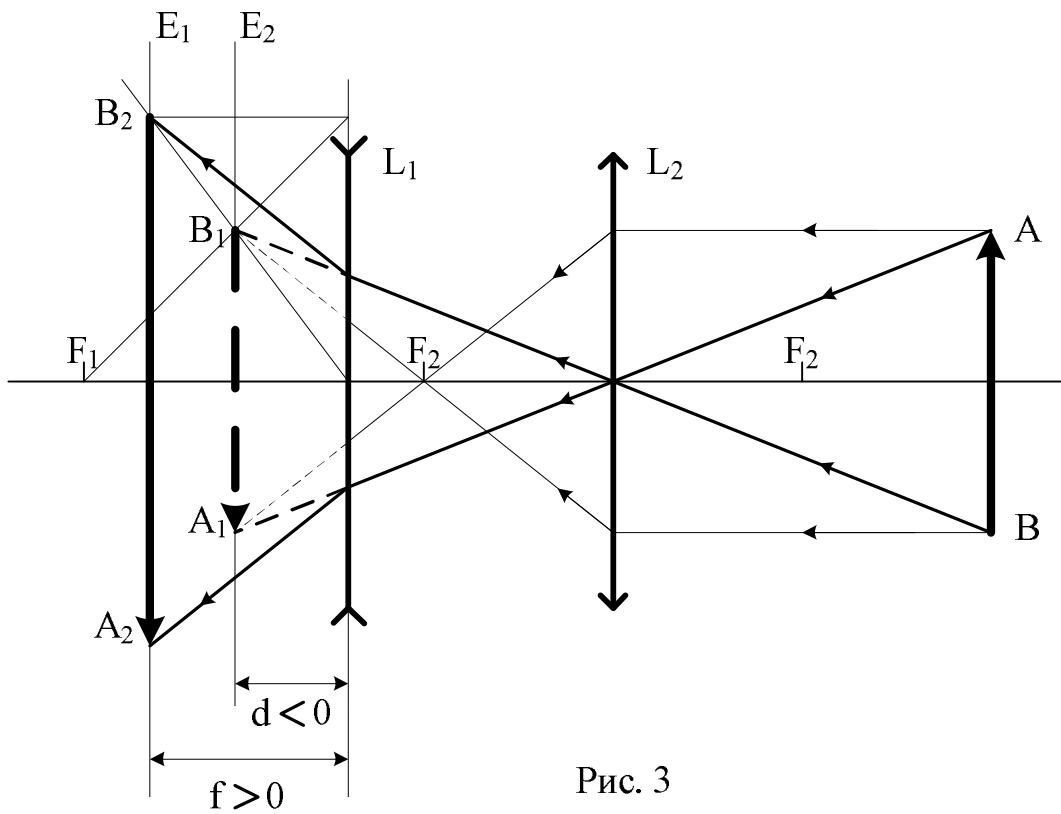


Рис. 3

Крім фокусної віддалі F лінзу характеризують також **оптичною силою**, яку позначають буквою D .

Оптична сила – це величина, обернена до фокусної віддалі:

$$D = \frac{1}{F} \quad (5)$$

Одиниця вимірювання оптичної сили – *діоптрія (дптр)*.

1 дптр – це оптична сила лінзи з фокусною віддаллю 1 м.

При визначенні оптичної сили не забудьте фокусну віддалль перевести в метри!

Хід роботи

Завдання 1. Визначення головної фокусної віддалі збираючої лінзи

1. Закріпіть досліджувану лінзу на рейтері оптичної лави.
2. Увімкніть освітлювач. Переміщуючи лінзу, одержіть на екрані різке зображення предмета (збільшене). Відмітьте положення лінзи.
3. Знову пересуньте лінзу і одержіть друге (зменшене) зображення предмету на екрані.
4. Виміряйте відстань між предметом і екраном M та зміщення лінзи a .
5. Досліди повторіть 3–5 разів. Обчисліть фокусну відстань збираючої лінзи за формулою (4) та її оптичну силу (формула (5)).
6. Дані вимірювань та обчислень можна оформити у вигляді таблиці 1.
7. Обчисліть похибку вимірювань. Для оцінки максимальної похибки можна рекомендувати використати вираз:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{2\Delta M}{M+a} + \frac{\Delta M}{M} \quad (6)$$

Табл. 1

N_{p} n/n	$M, \text{ м}$	$\Delta M, \text{ м}$	$a, \text{ м}$	$\Delta a, \text{ м}$	$F, \text{ м}$	$D, \text{ дптр}$
1						
2						
3						
Середнє						

Завдання 2. Визначення головної фокусної віддалі розсіювальної лінзи.

1. Поставте на оптичну лаву збираючу і розсіювальну лінзи згідно рис. 3 (збираюча лінза повинна бути ближче до предмету, а розсіювальна – до екрану). Відстань між лінзами приблизно дорівнює 11 см.
2. Пересуваючи одночасно обидві лінзи, треба одержати на екрані збільшене зображення предмета. Виміряйте відстань f від розсіювальної лінзи до екрану.

3. Відмітивши якомога точніше положення розсіювальної лінзи, приборіть її. Пересуваючи екран, одержіть різке зображення предмета на екрані. Виміряйте відстань d від екрану до точки, де перебувала розсіювальна лінза.

Результати вимірювань та обчислень можна оформити у вигляді табл. 2.

Табл.2

№ n/n	$d, м$	$\Delta d, м$	$f, м$	$\Delta f, м$	$F, м$	$D, \text{дптр}$
1						
2						
3						
<i>Середнє</i>						

4. Повторіть вимірювання два–три рази. Обчисліть фокусну віддаль та оптичну силу розсіювальної лінзи за формулою (1) (не забудьте, що $d < 0$, а $f > 0$).

5. Розрахуйте абсолютну і відносну похибки вимірювання. Зручніше знайти спочатку абсолютну похибку оптичної сили ΔD :

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}; \quad \Delta D = \frac{\Delta d}{d^2} + \frac{\Delta f}{f^2},$$

де Δd і Δf – абсолютні похибки вимірювань d і f .

Нижня межа фокусної відстані F буде рівна: $F' = \frac{1}{D + \Delta D};$

верхня межа:

$$F'' = \frac{1}{D - \Delta D}.$$

Значення F лежить в інтервалі $[F', F'']$

$$\Delta F = \frac{F'' - F'}{2}$$

Контрольні запитання

1. Дати означення: – лінзи, – тонкої лінзи, – оптичного центра, – оптичної сили лінзи, – фокусу лінзи.
2. Як відрізнити збираючу лінзу від розсіювальної?
3. Як можна одержати формулу тонкої лінзи?
4. За завданням викладача побудувати зображення предмета в лінзі і охарактеризувати його.

Рекомендована література

1. Грабовский Р. И. Курс физики : учеб. пособие для с/х ин-тов / Р. И. Грабовский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1974. – 552 с., ил.
2. Кучерук І. М. Загальний курс фізики : Навч. посібник – Т. 1 : Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик ; за ред. І. М. Кучерука. – К. : Техніка, 2006. – 532 с. : іл.
3. Кучерук І. М. Загальний курс фізики : Навч. посібник – Т. 2 : Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, Луцик П. П. – К. : Техніка, 2001. – 452 с. : іл..
4. Кучерук І. М. Загальний курс фізики: Навч. посібник – Т. 3.: Оптика. Квантова фізика / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук. – К. : Техніка, 2006. – 518 с.
5. Ливенцев Н. М. Курс физики / Н. М. Ливенцев. – М. : Высшая школа, 1974. – 465 с.
6. Трофимова Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1990. – 478 с.

Зміст

Передмова	3
Обробка результатів вимірювань та обчислення похибок	4
Опис лабораторних робіт	
№ 1. Вимірювання основних механічних величин	13
№ 2. Визначення прискорення вільного падіння з допомогою математичного маятника	19
№ 3. Визначення вологості повітря	22
№ 4. Визначення питомої теплоти плавлення льоду	27
№ 5. Вимірювання сили струму, напруги та опору	29
№ 6. Дослідження корисної потужності та ККД джерела постійного струму	33
№ 7. Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.	37
№ 8. Визначення показника заломлення скла за допомогою мікроскопа	41
№ 9. Визначення головної фокусної віддалі лінзи	45
Рекомендована література	50