

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА  
КАФЕДРА БІОФІЗИЧНОЇ ХІМІЇ, ФІЗИКИ І ПЕДАГОГІКИ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА»**

*Для здобувачів денної форми навчання  
спеціальностей 091 Біологія та біохімія, 101 Екологія, 102 Хімія*

Вінниця  
2023

УДК 53(076.5)

М 545

*Затверджено на засіданні вченої ради факультету хімії,  
біології і біотехнологій ДонНУ імені Василя Стуса  
(протокол № 3 від 17.11.2023 р.)*

**Укладачі:**

*Рассохіна Ю. В.*, доктор фізико-математичних наук, ст. наук. сп., професор кафедри біофізичної хімії, фізики і педагогіки ДонНУ імені Василя Стуса;

*Пишкін Р. О.*, завідувач навчальної лабораторії загальної фізики, STEM технологій викладання і педагогіки ДонНУ імені Василя Стуса.

**Рецензенти:**

*Доценко О. І.*, кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри біофізики і фізіології ДонНУ імені Василя Стуса;

*Крижановський В. Г.*, доктор технічних наук, професор кафедри прикладної математики та кібербезпеки ДонНУ імені Василя Стуса.

**М 545** Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика»: для здобувачів денної форми навчання спеціальностей 091 Біологія та біохімія, 101 Екологія, 102 Хімія / укл. Ю. В. Рассохіна, Р. О. Пишкін. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2023. 80 с.

Навчально-методичний посібник розроблений на основі програми курсу Фізика, що викладається студентам 1–2 курсів нефізичних спеціальностей. Містить методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з різних тем курсу загальної фізики, а саме механіки, молекулярної фізики, електрики, оптики. До кожної лабораторної роботи наведені коротка теорія, опис лабораторних установок, порядок виконання роботи і рекомендації щодо математичної обробки результатів вимірювання. Також у посібнику до кожної лабораторної роботи наведені питання для підготовки і захисту роботи.

**УДК 53(076.5)**

© Рассохіна Ю. В., 2023

© Пишкін Р. О., 2023

© ДонНУ імені Василя Стуса, 2023

## ЗМІСТ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Загальні положення про оформлення лабораторних робіт та розрахунків похибок .....                                       | 4  |
| Список основних фізичних констант .....                                                                                 | 7  |
| <b>Лабораторна робота № 1</b>                                                                                           |    |
| Вивчення законів кінематики і динаміки поступального руху на машині Атвуда.....                                         | 8  |
| <b>Лабораторна робота № 2</b>                                                                                           |    |
| Вивчення законів обертального руху за допомогою маятника Обербека.....                                                  | 13 |
| <b>Лабораторна робота № 3</b>                                                                                           |    |
| Пружний центральний удар куль .....                                                                                     | 18 |
| <b>Лабораторна робота № 4</b>                                                                                           |    |
| Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника .....                                      | 23 |
| <b>Лабораторна робота № 5</b>                                                                                           |    |
| Вимірювання швидкості польоту кулі за допомогою балістичного маятника....                                               | 27 |
| <b>Лабораторна робота № 6</b>                                                                                           |    |
| Вимірювання питомої теплоємності металів методом охолодження.....                                                       | 32 |
| <b>Лабораторна робота № 7</b>                                                                                           |    |
| Вивчення електростатичного поля .....                                                                                   | 38 |
| <b>Лабораторна робота № 8</b>                                                                                           |    |
| Дослідження залежності опору напівпровідника від температури та визначення ширини забороненої зони напівпровідника..... | 44 |
| <b>Лабораторна робота № 9</b>                                                                                           |    |
| Визначення радіуса кривизни лінзи та довжини світлової хвилі за допомогою кілець Ньютонів .....                         | 50 |
| <b>Лабораторна робота № 10</b>                                                                                          |    |
| Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання за допомогою дифракційної ґратки на оптичній лаві .....               | 56 |
| <b>Лабораторна робота № 11</b>                                                                                          |    |
| Отримання і дослідження поляризованого світла.....                                                                      | 62 |
| <b>Лабораторна робота № 12</b>                                                                                          |    |
| Визначення фокусних відстаней тонких лінз .....                                                                         | 69 |
| ЗВІТ з лабораторної роботи № ____ .....                                                                                 | 76 |
| Перелік джерел .....                                                                                                    | 77 |

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРО ОФОРМЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА РОЗРАХУНОК ПОХИБОК

Кожен студент повинен мати зошит, у якому записується назва лабораторної роботи, мета роботи, основні формули, фізичні величини, які безпосередньо вимірюються (таблиця) або розраховуються за формулами, відповіді на питання для допуску до виконання роботи і перебіг виконання роботи. Математичні розрахунки бажано виконувати з використанням комп'ютерних програм.

**Звіт про виконання лабораторної роботи повинен бути виконаний на окремих аркушах і містити:**

- протокол вимірювань;
- розрахунки середніх значень шуканих фізичних величин;
- розрахунки їх похибок;
- графіки функціональних залежностей досліджуваних процесів;
- аналіз отриманих експериментальних результатів роботи;
- відповіді на питання для захисту роботи.

Похибки вимірювання фізичних величин поділяються на середньоквадратичні випадкові, систематичні і повні. Випадкові похибки  $\sigma_x$  залежать від інструментів або приладів, якими вимірюється фізична величина, способів і умов вимірювання. Систематичні похибки  $\delta$  визначаються половиною найменшої поділки шкали приладу або у відсотках, які вказані на приборі. Повна похибка дорівнює  $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \frac{\delta^2}{3}}$ . Величина випадкової похибки залежить від кількості вимірів: чим більше вимірів, тим меншою буде похибка. Щоб врахувати цю залежність, вводиться коефіцієнт, який називається коефіцієнтом Ст'юдента і визначається теорією ймовірності. Існує спеціальна таблиця коефіцієнтів Ст'юдента. В лабораторних роботах вимірювання величин робиться 3–5 разів.

**Розрахунок похибки** величини  $X_i$ , яка безпосередньо вимірюється  $n$  разів. Спочатку знаходиться середнє значення величини  $\bar{X}$ ,

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1)$$

потім її середньоквадратична похибка:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

і записується результат вимірювання величини:  $X = \bar{X} \pm \sigma_x$ .

**Розрахунок середнього значення і похибки** величини  $V$ , яка безпосередньо не вимірюється і розраховується за відповідною формулою, тобто  $V$  є функцією

декількох величин  $V = f(\alpha, \ell, \omega)$ , які безпосередньо вимірюються –  $\alpha_i, \ell_i, \omega_i$ . У цьому разі спочатку знаходяться середні значення  $\bar{\alpha}, \bar{\ell}, \bar{\omega}$  за формулою (1), потім – середнє значення величини  $\bar{V} = f(\bar{\alpha}, \bar{\ell}, \bar{\omega})$ , далі розраховують похибки вимірюваних величин  $\sigma_\alpha, \sigma_\ell, \sigma_\omega$  за формулою (2). Похибка величини  $V$  знаходиться за формулою:

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial \alpha} \sigma_\alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \sigma_\ell\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \omega} \sigma_\omega\right)^2}. \quad (3)$$

Результат записується так:  $V = \bar{V} \pm \sigma_V$ .

**Розрахунок середнього значення і похибки величини, яка знаходиться за графіком  $y = f(x)$**

У деяких лабораторних роботах необхідно знайти величину, яка є коефіцієнтом пропорційності у функціональній залежності  $y_i = f(x_i)$  (наприклад, температурний коефіцієнт електричного опору провідника  $\alpha$  у функції  $R_i = R_0(1 + \alpha t_i)$ ). В такому разі використовують метод найменших квадратів. Цей метод використовують тільки у тому разі, коли функціональну залежність  $y_i = f(x_i)$  можна представити у відповідній системі координат лінійною функцією. Наприклад, функція  $z_i = z_0 e^{-kt_i}$  перетвориться в лінійну функцію, якщо взяти натуральний логарифм функції  $\ln z_i = -kt_i + \ln z_0$ , тоді в системі координат  $\ln z_i - t_i$  отримаємо пряму лінію. Порівнюючи отриманий вираз із рівнянням прямої  $y_i = kx_i + b$ , маємо:  $\ln z_i$  – це  $y_i$ ,  $t_i$  – це  $x_i$ , а  $\ln z_0$  – це  $b$ . Так, формула закону Кюри–Вейса  $\chi_i = C/(T_i - \theta)$  для магнітної сприйнятливості  $\chi_i$  перетворюється в лінійну функцію таким чином:

$$\chi_i^{-1} = C^{-1}(T_i - \theta),$$

де  $k = C$ ;  $b = \theta C^{-1}$ .

### Метод найменших квадратів

Ідея методу найменших квадратів полягає в тому, щоб знайти такі  $k$  і  $b$  прямої  $y = kx + b$  щоб її ординати  $y$  мали найменші відхилення від експериментальних значень  $y_i$ , тобто щоб сума квадратів:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2$$

була найменшою. Для цього необхідно, щоб виконувалися умови для частинних похідних функції  $\frac{\partial \varphi}{\partial k} = 0$  і  $\frac{\partial \varphi}{\partial b} = 0$ , з цих двох рівнянь знаходять невідомі коефіцієнти  $k$  і  $b$ . Нехтуючи викладками, наведемо формули для  $k$  і  $b$ :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

$$b = \bar{y} - k\bar{x}. \quad (5)$$

Для визначення похибок  $\sigma_k$ ,  $\sigma_b$  знайдених параметрів  $k$  і  $b$  прямої  $y = kx + b$  необхідно зробити таке: розрахувати  $y_{ip} = kx_i + b$ , використовуючи виміряні  $x_i$  та знайдені  $k$  і  $b$ , потім розрахувати величину  $\varphi_m$ :

$$\varphi_m = \sum_{i=1}^n (y_{ip} - y_i)^2,$$

тоді похибка параметра  $k$  знаходиться за формулою:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\varphi_m}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (6)$$

а похибка параметра  $b$  – за формулою:

$$\sigma_b = \sigma_k \sqrt{\bar{x}^2 + \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (7)$$

У процесі обробки результатів вимірювання (знаходженні похибок) виконуються арифметичні дії множення і ділення. Отже, постає питання, скільки знаків (цифр) після коми залишати. Оскільки береться найбільша похибка, то роблять так: якщо приладом вимірюється величина, наприклад, до **третього** знаку після коми, то після **кожної** арифметичної дії залишають **чотири** знаки після коми, а в кінцевому підсумку четвертий знак округлюють: якщо четвертий знак 5 і більше, третій знак збільшують на одиницю, а четвертий знак відкидають, якщо четвертий знак менше 5, то його відкидають.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ФІЗИЧНИХ КОНСТАНТ

| Фізичні константи            |                                                   |
|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Швидкість світла у вакуумі   | $c = 2.99792458 \cdot 10^8$ м/с                   |
| Прискорення вільного падіння | $g = 9.80665$ м/с <sup>2</sup>                    |
| Число Авогадро               | $N_A = 6.022045 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup> |
| Універсальна газова стала    | $R = 8.314510$ Дж /моль К                         |
| Стала Больцмана              | $k = 1.380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К                |
| Заряд електрона              | $e = 1.60217733 \cdot 10^{-19}$ Кл                |
| Маса електрона               | $m_e = 9.109534 \cdot 10^{-31}$ кг                |
| Маса протона                 | $m_p = 1.6726231 \cdot 10^{-27}$ кг               |
| Маса нейтрона                | $m_n = 1.6749286 \cdot 10^{-27}$ кг               |
| Стала Рідберга               | $R_y = 13.605693009(84)$ еВ                       |
| Радіус Бора                  | $\alpha_0 = 5.2917720859(36) \cdot 10^{-11}$ м    |
| Магнетон Бора                | $\mu_B = 927.400968(20) \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл     |
| Електрична стала             | $\epsilon_0 = 8.85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м      |
| Магнітна стала               | $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м                 |
| Стала Планка                 | $h = 6.626176 \cdot 10^{-34}$ Дж с                |

## Лабораторна робота № 1

### Вивчення законів кінематики і динаміки поступального руху на машині Атвуда

**Мета роботи:** дослідити закони рівноприскореного руху тіл.

**Прилади та приладдя:** машина Атвуда, тягарці, електронний блок.

#### Опис експериментальної установки

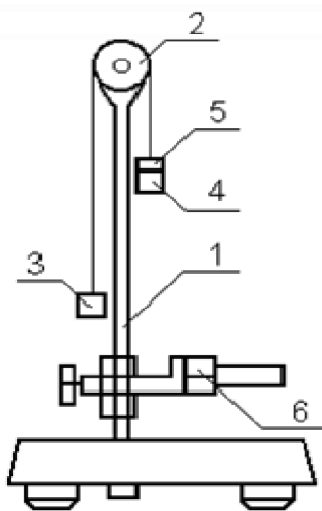


Рис. 1. Машина Атвуда

Машина Атвуда складається з укріпленого на штативі 1 блоку 2, через який перекинута нитка з підвішеними на ній однаковими вантажами 3 і 4 (рис. 1). Маса цих вантажів може бути збільшена додатковими невеликими вантажами (тягарцями) 5. Якщо на вантаж масою  $m_1$  покласти тягарець з масою  $m$ , то вся система почне рухатися рівноприскорено.

На верхньому кронштейні встановлено електромагнітне гальмо, призначене для фіксації вантажів. Верхній кронштейн можна переміщувати уздовж стійки та фіксувати у будь-якому положенні, встановлюючи такий спосіб довжину шляху рівноприскореного руху. Для визначення цього шляху на стійці є міліметрова шкала та візир.

Нижній кронштейн оснащений фотоелектричним датчиком 6 з оптичною віссю на рівні вказівника кронштейна, після перетину якої нижньою гранню вантажу, що падає, утворюється електричний сигнал, який відзначає проходження вантажами певного шляху.

На передній панелі *мілісекундоміра* розміщені такі маніпуляційні елементи:

«СЕТЬ» – вимикач мережі. Натискання цієї клавіші спричиняє включення напруги живлення і автоматичне скидання схем приладу (усі індикатори висвітлюють цифру нуль і світяться лампочки фотоелектричних датчиків).

«СБРОС» – установка нуля вимірювача. Натискання цієї клавіші спричиняє скидання схем мілісекундоміра.

«ПУСК» – керування електромагнітом. Натискання цієї клавіші вимикає електромагніт та генерує імпульс дозволу на вимірювання.

#### Коротка теорія

Фізична система складається із двох тіл, пов'язаних між собою (рис. 2). Ці тіла вважатимуться матеріальними точками. Обидва вантажі взаємодіють із Землею та ниткою. Отже, на кожен вантаж діють сила тяжіння та сила натягу нитки. Введемо спрощення: нитки вважатимемо невагомими та нерозтяжними. Якщо маса блоку є невеликою, порівняно з  $m_1$ , і тертя мале, то обертання блоку практично не вимагає застосування до нього обертового моменту, тому сили натягу нитки по обидва боки блоку рівні одна одній.

Нехтуючи масою нитки проти масою вантажів, можна з великим ступенем точності вважати, що вантажі рухаються рівноприскорено. Якщо не враховувати розтягнення нитки, то в кожний момент часу вантажі на її кінцях матимуть однакові за величиною прискорення.

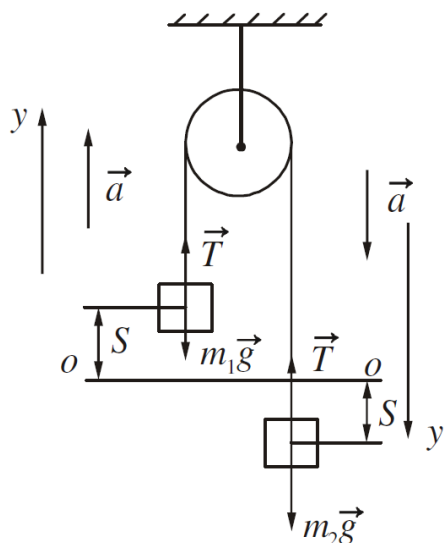


Рис. 2. Система двох тіл на блоку

Розставимо сили, що діють на кожен вантаж, вкажемо напрямок прискорення  $\vec{a}$  (рис. 2). Запишемо для кожного вантажу другий закон Ньютона:

$$-m_1g = m_1a \quad (1)$$

$$m_2g - T = m_2a \quad (2)$$

Виключаючи силу натягу  $T$ , отримаємо:

$$a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}. \quad (3)$$

Враховуючи, що  $m_2 = m_1 + m$  ( $m$  – маса тягарця) отримаємо:

$$a = \frac{m g}{2m_1 + m}. \quad (4)$$

### Порядок виконання роботи

#### Вправа 1. Дослідження закону рівноприскореного руху

**Коротка теорія.** Рівноприскореним називається рух, за якого значення прискорення з часом не змінюється. Для рівноприскореного руху залежність шляху від часу має вигляд:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Якщо  $v_0 = 0$ , то:

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

1. Перекиньте через блок **2** нитку з двома вантажами **3** і **4** і переконайтеся, що система знаходиться в положенні байдужої рівноваги.

2. Встановіть кронштейн з фотодатчиком **6** в нижній частині шкали вертикальної стійки, а фотодатчик розташуйте так, щоб правий вантаж під час руху вниз проходив в центрі робочого вікна фотодатчика (за нижнє положення вантажу береться поділка шкали, що відповідає поділці на корпусі фотодатчика і є наче

продовженням оптичної осі фотодатчика, яку перетинає рухомий вантаж). Встановіть правий вантаж у крайньому верхньому положенні.

3. Покладіть на правий вантаж одне з навантажень **5**. Натисніть на кнопку «ПУСК» блоку. Відбувається розгальмовування електромагніту, правий вантаж починає опускатися і таймер блоку починає відлік часу. Під час перетину правим вантажем оптичної осі фотодатчика відлік часу припиниться. Запишіть покази таймера, тобто час руху вантажів у протокол вимірювань.

4. Визначте за шкалою пройдений вантажем шлях як відстань від нижньої основи вантажу (у верхньому положенні) до оптичної осі фотодатчика.

5. Повторіть дослід щонайменше 5 разів, змінюючи  $S$  на 2–3 см.

6. Побудуйте графік залежності  $S = f\left(\frac{t^2}{2}\right)$ .

7. Використовуючи графік, розрахуйте експериментальне значення прискорення  $a_{\text{експ}}$  як тангенс кута нахилу графіка.

8. Обчисліть теоретичне значення прискорення  $a_{\text{теор.}}$  за формулою (4).

9. Порівняйте  $a_{\text{експ}}$  і  $a_{\text{теор.}}$ . Зробіть висновок.

### **Вправа 2.** Перевірка другого закону Ньютона

*Коротка теорія.* Відповідно до другого закону Ньютона, добуток маси  $M$  системи тіл та її прискорення  $\vec{a}$  дорівнює векторній сумі всіх сил, що діють на систему:

$$M\vec{a} = \vec{F}, \quad (5)$$

де  $M = m_1 + m_2$  – маса системи. Прискорення  $\vec{a}$  надається системі силою:

$$F = (m_2 - m_1)g. \quad (6)$$

Лінійна залежність прискорення  $a$  системи від сили  $F$  має підтвердити правильність другого закону Ньютона за умови, що маса системи не змінюється.

1. Покладіть усі тягарці на правий вантаж. Проведіть вимірювання часу  $t$  аналогічно до вправи 1 для значення різниці мас  $(m_2 - m_1)$ , що дорівнює масі усіх тягарців.

2. Зніміть з правого вантажу один з дрібних тягарців і перекладіть його на лівий вантаж. Проведіть вимірювання часу  $t$  для нового значення різниці мас  $(m_2 - m_1)$ .

3. Проведіть вимірювання часу  $t$  для різних значень різниці мас  $(m_2 - m_1)$ , комбінуючи тягарці в різних поєднаннях. Перекладаючи дрібні тягарці з одного боку в інший, отримайте 5 різних варіантів різниці мас  $(m_2 - m_1)$  у межах від 2 г до 15 г.

Занесіть вимірювання у протокол. Важливо: маса системи має бути незмінною.

4. Обчисліть значення прискорення  $a$  за результатами кожного досліду:

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

5. Розрахуйте значення сили  $F$  за формулою (6).

6. Побудуйте графік залежності прискорення від сили  $a = f(F)$ .

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Який закон перевіряється у вправі № 1? Які величини вимірюються безпосередньо?
2. Який закон перевіряється у вправі № 2? Які величини вимірюються безпосередньо?
3. Які графіки необхідно побудувати в кожній вправі?
4. Як за графіком залежності  $S = f\left(\frac{t^2}{2}\right)$  визначити прискорення  $a$ ?

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Який рух називається рівномірним? Запишіть формулу залежності шляху від часу для цього типу руху.
2. Який рух називається рівноприскореним? Запишіть формулу залежності шляху і швидкості від часу для цього типу руху.
3. Сформулюйте другий закон Ньютона. Запишіть формулу.
4. Зробіть висновок за результатами роботи.

### **Рекомендована література**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пищюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
3. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики / Львівська політехніка, 2015. 188 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 1  
«ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ КІНЕМАТИКИ І ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО  
РУХУ НА МАШИНІ АТВУДА»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

**Вправа 1**

Маса рухомого вантажу  $m$  \_\_\_\_\_ кг

Маса тягарцю  $m_1$  \_\_\_\_\_ кг

| № з/п | $S_1, м$ | $t, с$ | $t^2/2, с^2$ |
|-------|----------|--------|--------------|
| 1     |          |        |              |
| 2     |          |        |              |
| 3     |          |        |              |
| 4     |          |        |              |
| 5     |          |        |              |

**Вправа 2**

| № з/п | $S, м$ | $t, с$ | $m_1 - m_2, кг$ | $a, м/с^2$ | $F, Н$ |
|-------|--------|--------|-----------------|------------|--------|
| 1     |        |        |                 |            |        |
| 2     |        |        |                 |            |        |
| 3     |        |        |                 |            |        |
| 4     |        |        |                 |            |        |
| 5     |        |        |                 |            |        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 2

### Вивчення законів обертального руху за допомогою маятника Обербека

**Мета роботи:** експериментальна перевірка основного закону обертального руху твердого тіла.

**Прилади й обладнання:** маятник Обербека, набір вантажів, секундомір.

#### Опис експериментальної установки

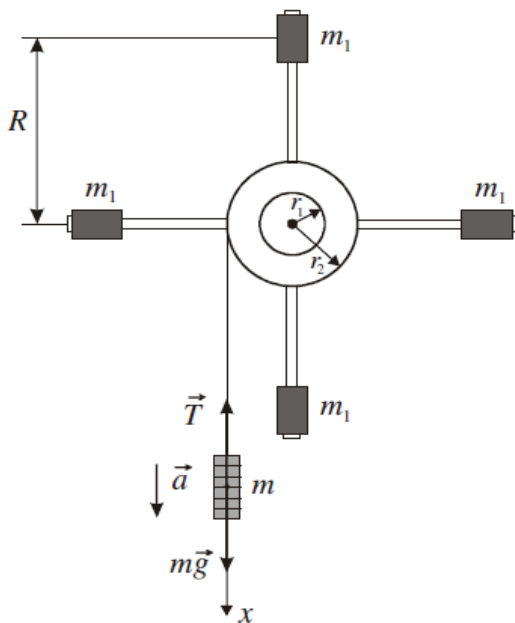


Рис. 1. Маятник Обербека

шків на шків.

Для виконання роботи використовується маятник Обербека, який схематично зображено на рис. 1. Сутність маятника Обербека — хрестовина, що складається з чотирьох стрижнів, укріплених на втулці під прямим кутом. На цю саму втулку насаджено два шківів різних радіусів ( $r_1$  і  $r_2$ ). На стрижнях розміщено вантажі масою  $m_1$  кожен. Вісь закріплена в підшипниках так, що вся система може обертатися навколо горизонтальної осі. Пересуваючи вантажі по стрижням можна змінювати момент інерції  $I$  маятника. На шківів намотується нитка, до якої прив'язаний вантаж відомої маси. Нитка натягується і створює обертаючий момент, який можна змінювати, перемотуючи нитку зі

#### Загальні положення

Обертання твердого тіла постійної маси навколо нерухомої осі описується основним рівнянням динаміки обертального руху:

$$M = I\varepsilon, \quad (1)$$

де  $M$  — момент зовнішніх сил, які діють на тіло, відносно осі обертання;

$I$  — момент інерції тіла;

$\varepsilon$  — кутове прискорення.

Момент інерції  $I_1$  всієї обертової системи відносно осі обертання складається з моменту інерції хрестовини і моменту інерції вантажів:

$$I_1 = I_0 + 4m_1R_1^2, \quad (2)$$

де  $I_0$  — момент інерції хрестовини без вантажів відносно осі обертання;

$m_1$  — маса вантажу на стрижні;

$R_1$  — відстань від осі обертання до середини вантажу  $m_1$ .

За умови зміни відстані  $R$  від осі обертання до вантажів  $m_1$  момент інерції системи зміниться і дорівнюватиме:

$$I_2 = I_0 + 4m_1 R_2^2. \quad (3)$$

Віднімемо один вираз від іншого:

$$I_2 - I_1 = 4m_1(R_1^2 - R_2^2). \quad (4)$$

Права частина рівності (4) може бути обчислена за даними  $m_1, R_1, R_2$ .

Значення  $I_2$  та  $I_1$  визначимо за допомогою основного рівняння динаміки обертального руху (1). Обертальний момент  $M$  створюється силою натягу нитки  $T$ . Він дорівнює добутку сили натягу нитки та довжини плеча. Довжиною плеча у цьому випадку є радіус шківів.

Силу натягу нитки визначимо з другого закону Ньютона. На вантаж масою  $m$  діють дві сили: сила тяжіння  $mg$  і сила натягу нитки  $T$ . Під дією цих сил він рухається униз рівноприскорено з прискоренням  $a$ . Запишемо другий закон Ньютона через проєкцію на напрямок руху:

$$mg - T = ma.$$

З цього виразу випливає, що:

$$T = m(g - a). \quad (5)$$

Обертаючий момент:

$$M = T \cdot r = m(g - a) \cdot r. \quad (6)$$

Підставляючи вираз (6) у формулу (1), знайдемо момент інерції обертової системи:

$$I = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{m \cdot (g - a) \cdot r}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Кутове і лінійне прискорення пов'язані співвідношенням:

$$a = \varepsilon \cdot r. \quad (8)$$

Вантаж  $m$  рухається рівноприскорено, тому:

$$h = \frac{at^2}{2}.$$

Звідси отримаємо вираз для прискорення:

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

Тоді:

$$\varepsilon = \frac{2h}{t^2 r}$$

Підставляючи значення  $a$  та  $\varepsilon$  у вираз (7), отримаємо:

$$I = mr^2 \left( \frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (9)$$

За формулою (9) можна обчислити  $I_1$  та  $I_2$ , потім різницю моментів інерції і перевірити рівність (4), виконання якої підтверджує справедливність основного закону динаміки обертального руху.

### Порядок виконання роботи

1. Готуючи установку до вимірювань, необхідно встановити стійку так, щоб вантаж під час опусканні не зачіпав фотоелементів. Виміряйте штангенциркулем діаметри  $d$  двоступеневого шківів. До одного з шківів прикріпіть нитку, до іншого кінця нитки підвісьте вантаж  $m$  і перекиньте нитку через верхній блок.

2. Встановіть кронштейн з фотодатчиком в нижній частині шкали вертикальної стійки і розташуйте фотодатчик так, щоб вантаж  $m$  під час руху униз проходив по центру робочого вікна фотодатчика. За нижнє положення вантажу береться відмітка шкали, що відповідає рисці на корпусі фотодатчика і є наче продовженням оптичної осі фотодатчика, яку перетинає рухомий вантаж.

3. Закріпіть вантаж  $m_1$  **посередині** стрижнів так, щоб система перебувала в стані байдужої рівноваги. Запишіть значення маси  $m_1$  вантажу на спиці, вказане на установці.

4. Виміряйте відстань  $R_1$  від осі обертання до середини вантажу  $m_1$ .

5. Запишіть значення маси  $m$  вантажу, який кріпиться до нитки, у протокол.

6. Обертаючи маятник, установіть вантаж маси  $m$  у крайньому верхньому положенні так, щоб нижня основа вантажу співпала з однією з рисок шкали вертикальної стійки. Зафіксуйте вантаж у цьому положенні. Для цього натисніть на кнопку «СЕТЬ» блоку, водночас повинен спрацювати фрикціон електромагніту.

7. Визначте за шкалою висоту  $h$  (відстань від нижньої основи вантажу в верхньому положенні до оптичної осі фотодатчика), занесіть у протокол.

8. Натисніть на кнопку «ПУСК» блоку. Відбудеться розгальмування електромагніту, вантаж почне опускатися і таймер блоку почне відлік часу. Під час перетину вантажем оптичної осі фотодатчика відлік часу припиниться. Запишіть дані таймеру, тобто час руху гирі  $t$ , у протокол вимірювань.

9. Запишіть значення  $t$  і, повернувши вантаж в верхнє положення, натисніть клавішу «СБРОС» *(тільки в такій послідовності!)*. Дослід повторити мінімум *три рази*. Знайдіть середнє значення часу падіння вантажу, занесіть у протокол.

10. Прикріпіть і намотайте нитку на малий шків. Проведіть вимірювання згідно з п. 6–9.

11. Розташуйте вантажі  $m_1$  на **кінцях** стрижнів. Виміряйте відстань  $R_2$  від осі обертання до середини вантажу  $m_1$ .

12. Виконайте вимірювання згідно з п. 6–9, намотуючи нитку спочатку на великий шків, а потім на малий.

13. Обчисліть моменти інерції  $I_1$  та  $I_2$  за формулою (9). Знайдіть середнє значення моменту інерції для кожного положення вантажів, занесіть у протокол.

14. Розрахуйте різницю моментів інерції (ліва частина формули (4)).

15. Розрахуйте праву частину формули (4), використовуючи виміряні значення  $R_1, R_2$  і відоме значення  $m_1$ .

16. Порівняйте результати, отримані в п. 14 та п. 15.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Які величини в роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується момент інерції системи. Поясніть сенс позначень.

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте основний закон динаміки обертального руху. Запишіть формулу.
2. Дайте визначення моменту інерції системи частинок відносно осі. Від яких величин залежить момент інерції твердого тіла відносно осі.
3. Сформулюйте теорему Штейнера. Запишіть формулу.
4. Який висновок можна зробити з порівняння результатів, отриманих у пунктах 14 та 15?

### **Рекомендована література**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.

3. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 2  
«ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ  
ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Маса вантажів закріплених на спиці  $m_1$  \_\_\_\_\_ кг

Маса вантажу що падає  $m$  \_\_\_\_\_ кг

Висота падіння вантажу  $h$  \_\_\_\_\_ м

Діаметр великого шківу  $d_2$  \_\_\_\_\_ м

Діаметр малого шківу  $d_1$  \_\_\_\_\_ м

| №       | $r, м$ | $R, м$ | $t_1, с$ | $t_2, с$ | $t_3, с$ | $t_{cp}, с$ | $I, кг \cdot м^2$ | Примітка                                         |
|---------|--------|--------|----------|----------|----------|-------------|-------------------|--------------------------------------------------|
| 1       |        |        |          |          |          |             |                   | Вантажі<br>знаходяться<br>посередині<br>стрижнів |
| 2       |        |        |          |          |          |             |                   |                                                  |
| середнє |        |        |          |          |          |             |                   |                                                  |
| 3       |        |        |          |          |          |             |                   | Вантажі<br>знаходяться<br>на кінцях<br>стрижнів  |
| 4       |        |        |          |          |          |             |                   |                                                  |
| середнє |        |        |          |          |          |             |                   |                                                  |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 3

### Пружний центральний удар куль

**Мета роботи:** визначити швидкість куль, які співударяються, час співударяння, середню силу співудару.

**Прилади та приладдя:** експериментальна установка для вивчення пружного центрального удару куль.

#### Опис експериментальної установки

Схема експериментальної установки показана на рис. 1.

До штатива **1** прикріплені дві кулі. Кути відхилення підвісів від вертикалі визначаються за шкалами **3**. Електромагніт **4** слугує для отримання однієї з куль у відхиленому положенні.

#### Коротка теорія

*Абсолютно пружним* називається такий удар, за якого механічна енергія тіл не переходить в інші (немеханічні) види енергії. Удар називається *центральним*, якщо кулі до удару рухаються по прямій, яка проходить через їх центри.

За абсолютно пружного удару виконуються закон збереження імпульсу і закон збереження механічної енергії. Позначимо масу першої кульки  $m_1$ , масу другої –  $m_2$ . Перша кулька до удару знаходиться в стані спокою, тобто  $v_1 = 0$ . Тоді закон збереження імпульсу і закон збереження механічної енергії матимуть такий вигляд:

$$m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (1)$$

$$\frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad (2)$$

де  $v_2$  – швидкість другої кульки до удару;  
 $u_1$  та  $u_2$  – швидкості кульок після удару.

Розв'язавши систему рівнянь (1)–(2), мож-

на визначити швидкості кульок після удару:

$$u_1 = \frac{2m_2 v_2}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}. \quad (4)$$

Якщо маси кульок однакові, то з (3) випливає, що  $u_1 = v_2$ , а з (4) випливає, що  $u_2 = 0$ .

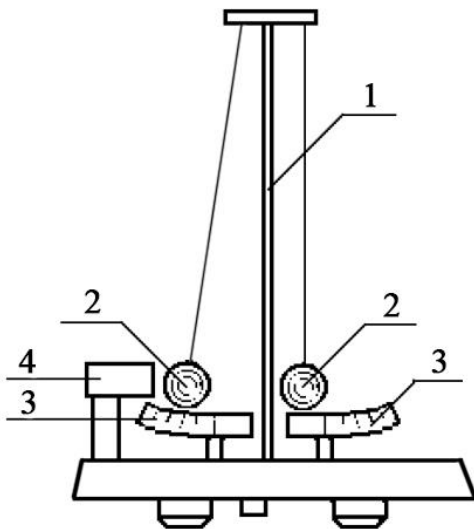


Рис. 1. Схема експериментальної установки для вивчення пружного центрального удару куль

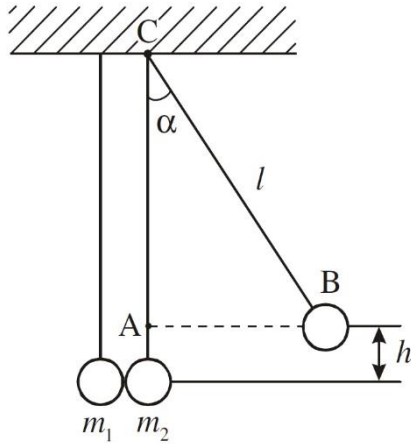


Рис. 2. Пружний удар двох куль на підвісі

Це означає, що кулі «обмінялися» швидкостями, тобто друга кулька після удару зупиняється, а перша набуває швидкості, яку мала друга до удару.

Відведемо кульку масою  $m_2$  від положення рівноваги на кут  $\alpha$  (рис. 2). За таких умов вона підніметься на висоту  $h$  і набуде потенціальної енергії:

$$W_{\text{п}} = m_2 gh. \quad (5)$$

У момент удару потенційна енергія повністю переходить у кінетичну:

$$W_{\text{к}} = \frac{m_2 v_2^2}{2}. \quad (6)$$

Згідно із законом збереження механічної енергії:

$$m_2 gh = \frac{m_2 v_2^2}{2}. \quad (7)$$

Звідси:

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (8)$$

З  $\triangle ABC$  (див. рис. 2) випливає, що:

$$\cos \alpha = \frac{l - h}{l}.$$

Тоді:

$$h = l(1 - \cos \alpha). \quad (9)$$

Підставимо (9) у співвідношення (8), отримаємо:

$$v_2 = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)}. \quad (10)$$

Для визначення сили  $\vec{F}$  співудару куль використаємо другий закон Ньютона в такому вигляді:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m_2 \Delta \vec{v}, \quad (11)$$

де  $\Delta t = t$  – час співударяння кульок;  $\Delta v$  – зміна швидкості другої кульки;  
 $\Delta v = u_2 - v_2$ .

Оскільки  $u_2 = 0$ , то:

$$F = \frac{m_2 v_2}{t}. \quad (12)$$

Масу кульки розрахуємо за її густиною і відомим радіусом:

$$m_2 = \frac{4}{3} \rho \pi r^3, \quad (13)$$

де  $r = 0.015$  м – радіус кульки;  $\rho = 7\,700$  кг/м<sup>3</sup> – густина матеріалу (сталь).

### **Порядок виконання роботи**

#### ***Вправа 1***

1. Зафіксуйте у протоколі вимірювань параметри установки.
2. На пульті блоку натисніть кнопку «СБРОС», водночас на табло індикації висвітяться нулі, на електромагніт буде подано напругу.
3. Відведіть праву кулю на кут  $\alpha = 5^\circ$  та зафіксуйте її за допомогою електромагніту, зупиніть іншу кулю, якщо вона колихається.
4. Натисніть кнопку «ПУСК», водночас відбудеться удар куль. За допомогою шкал візуально визначте кути відскоку  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ . За таймером блоку визначте час співударяння куль. Повторіть дослід 5 разів і занесіть дані у протокол.
5. Виконайте вимірювання відповідно до пунктів 2–4, відхиляючи кульку  $m_2$  на кут  $\alpha = 10^\circ$ , а потім на кут  $\alpha = 15^\circ$ .
6. Розрахуйте середній час співударяння куль для кожного кута.

#### ***Вправа 2***

1. За формулою (10) визначте швидкість кулі в момент удару для кожного кута відхилення кулі.
2. За формулою (13) розрахуйте масу кулі.
3. За формулою (12) розрахуйте середню силу співудару куль для кожного кута відхилення кулі.
4. Зробіть висновок за результатами роботи.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. У чому полягає мета роботи?
2. Які фізичні величини вимірюються безпосередньо (прямі вимірювання)?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується швидкість кулі у момент удару, поясніть зміст кожного позначення, що входять до цієї формули.

4. Запишіть формулу, за якою розраховується середня сила співудару куль, поясніть зміст кожного позначення, що входять до цієї формули.

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Який удар називається абсолютно пружним? Які закони збереження застосовуються до абсолютно пружного удару куль?
2. Сформулюйте закон збереження імпульсу та закон збереження механічної енергії.
3. Який удар називається непружним? Які закони збереження застосовуються до непружного удару куль?

### **Рекомендована література**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пищюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
3. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики / Львівська політехніка, 2015. 188 с.
4. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.
5. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 3  
«ПРУЖНИЙ ЦЕНТРАЛЬНИЙ УДАР КУЛЬ»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Параметри установки:

Довжина підвісу куль  $l =$  \_\_\_\_\_ м

Радіус кулі  $r =$  \_\_\_\_\_ м

Густина матеріалу кулі  $\rho =$  \_\_\_\_\_ кг/м<sup>3</sup>

| № з/п   | $\alpha$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $t, c$ | $\alpha$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $t, c$ | $\alpha$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $t, c$ |
|---------|----------|------------|------------|--------|----------|------------|------------|--------|----------|------------|------------|--------|
| 1       | 5°       |            |            |        | 10°      |            |            |        | 15°      |            |            |        |
| 2       |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| 3       |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| 4       |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| 5       |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| середнє |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 4

### Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника

**Мета роботи:** експериментальна перевірка закономірностей руху математичного маятника.

**Прилади й обладнання:** маятник універсальний.

#### Теоретичні відомості

Математичним маятником називають тіло малого розміру (матеріальну точку), що підвішене до нерухомої точки (осі) на невагомій нерозтяжній нитці, яке рухається, відхиляючись від положення рівноваги на малий кут у вертикальній площині під дією сили тяжіння (рис. 1). У полярних координатах рівняння руху такої системи має вигляд:

$$ml^2 \ddot{\varphi} = -mgl \cdot \sin \varphi$$

або:

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \sin \varphi = 0,$$

де  $\omega_0^2 = g/l$  і  $\omega_0 = \sqrt{g/l}$  – власна частота коливань математичного маятника.

За малих кутів відхилення маятника, для яких можна вважати, що  $\sin \varphi \approx \varphi$ , воно зводиться до рівняння гармонічних коливань:

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0. \quad (1)$$

Розв'язок цього рівняння може бути записаний у вигляді;

$$\varphi = A \cos(\omega_0 t + \delta), \quad (2)$$

де  $A$  – амплітуда коливання;  $\delta$  – початкова фаза коливання.

Отже, математичний маятник здійснює гармонічні коливання з частотою  $\omega_0 = \sqrt{g/l}$  і періодом:

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

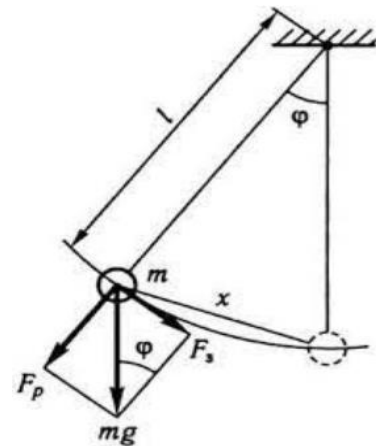


Рис. 1. Математичний маятник на підвісі і сили, що діють на матеріальну точку

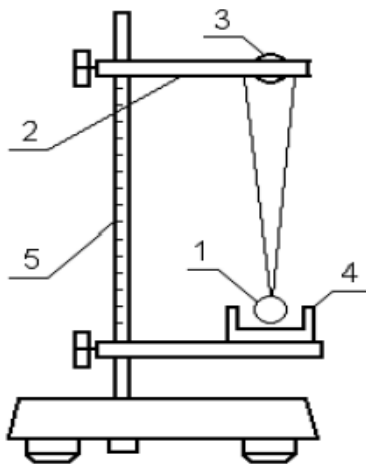


Рис. 2. Схема установки для вивчення руху математичного маятника

Схему установки представлено на рис. 2. У якості тіла математичного маятника використовується металева куля **1**, яка підвішена на двох капронових нитках до кронштейна **2**. На цьому ж кронштейні розташовано гвинт **3**, який дає змогу змінювати довжину підвісу. На нижньому кронштейні закріплено фотодатчик **4**, відстань між кронштейнами визначається за нанесеною на штатив шкалою **5**.

### Порядок виконання роботи

1. Встановіть нижній кронштейн з фотодатчиком **4** у крайнє нижнє положення шкали **5** так, щоб верхня площина кронштейна співпадала з однією з рисок шкали. Встановіть верхній кронштейн так, щоб кулька **1** математичного маятника опинилася у робочій зоні фотодатчика. Обертаючи гвинт **3**, досягніть такого положення кульки, за якого її центр буде збігатися за висотою з рискою на фотодатчику.

2. За шкалою на вертикальній стійці визначте довжину підвісу математичного маятника, зафіксуйте її у протокол.

3. Увімкніть живлення перемикачем «СЕТЬ» з дозволу викладача.

4. Приведіть математичний маятник у коливальний рух, відхиливши металеву кульку на невеликий кут (приблизно 5 градусів), після чого натисніть на кнопку «ПУСК» на блоці. За показаннями таймера визначте значення часу  $t_1$  для  $N = 50$  коливань маятника. Після цього натисніть кнопку «СТОП».

5. Визначте середнє значення періоду коливань маятника за формулою  $T_1 = t_1 / N$ , де  $t_1$  – час коливань;  $N$  – кількість коливань. Зафіксуйте дані у протокол.

6. Перемістіть угору кронштейн з фотодатчиком на два сантиметри за шкалою вертикальної стійки. Обертаючи гвинт **3**, досягніть такого положення кульки, за якого її центр буде співпадати за висотою з рискою на фотодатчику. За шкалою вертикальної стійки визначте довжину математичного маятника  $\ell_2$ , для цієї довжини виміряйте період  $T_2$ . Далі виміряйте періоди коливань  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  за п. 4–5 для  $\ell_3$ ,  $\ell_4$ ,  $\ell_5$ , зменшуючи щоразу раз довжину підвісу маятника на 2 см. Занесіть дані у протокол.

7. Розрахуйте прискорення вільного падіння двома способами: за графіком і за формулою  $g_i = \frac{4\pi^2 \ell_i}{T_i^2}$ . Для цього необхідно побудувати графік залежності квадрата періоду коливань  $T_i^2$  від довжини підвісу маятника  $\ell_i$ . Апроксимувати отриману залежність прямою лінією  $T_i^2 = k\ell_i + b$ . Знайти коефіцієнт нахилу  $k$  методом найменших квадратів як тангенс кута нахилу, а потім знайти величину прискорення вільного падіння  $g = 4\pi^2 / k$  та його похибку. Далі треба знайти величину  $g$  за формулою  $g_i = \frac{4\pi^2 \ell_i}{T_i^2}$ , похибку  $\sigma_g$  і порівняти значення  $g$ , знайдені різними методами.

8. Порівнюючи теоретичні та експериментальні значення прискорення вільного падіння, знайти відносну похибку за формулою:

$$\eta = \frac{|g_e - g_T|}{g_T} \cdot 100 \, \%.$$

9. Вимкніть обладнання після закінчення дослідів, покажіть результати викладачу.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Від чого залежить похибка вимірювання періоду коливань маятника?
2. За яких умов кульку, підвішену на нитці до кронштейна, можна вважати математичним маятником?
3. Які величини вимірюються у цій роботі?
4. Виведіть формулу для визначення похибки прискорення вільного падіння.

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Від чого залежить прискорення сили земного тяжіння?
2. Поясніть, чому на екваторі і на полюсах Землі прискорення вільного падіння мають різну величину?
3. Як зміниться рух кульки маятника, якщо підвіс (кронштейн) буде рухатися вертикально униз із прискоренням  $a \geq g$ , догори –  $a \leq g$ ?
4. Чому Земля, яка притягується Сонцем, не падає на Сонце, а довільний предмет, який притягується Землею, падає на Землю?

### **Рекомендована література**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с.
3. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
4. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 4  
«ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ  
ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

| № | $l, м$ | $N$ | $t, с$ | $T, с$ |
|---|--------|-----|--------|--------|
| 1 |        |     |        |        |
| 2 |        |     |        |        |
| 3 |        |     |        |        |
| 4 |        |     |        |        |
| 5 |        |     |        |        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

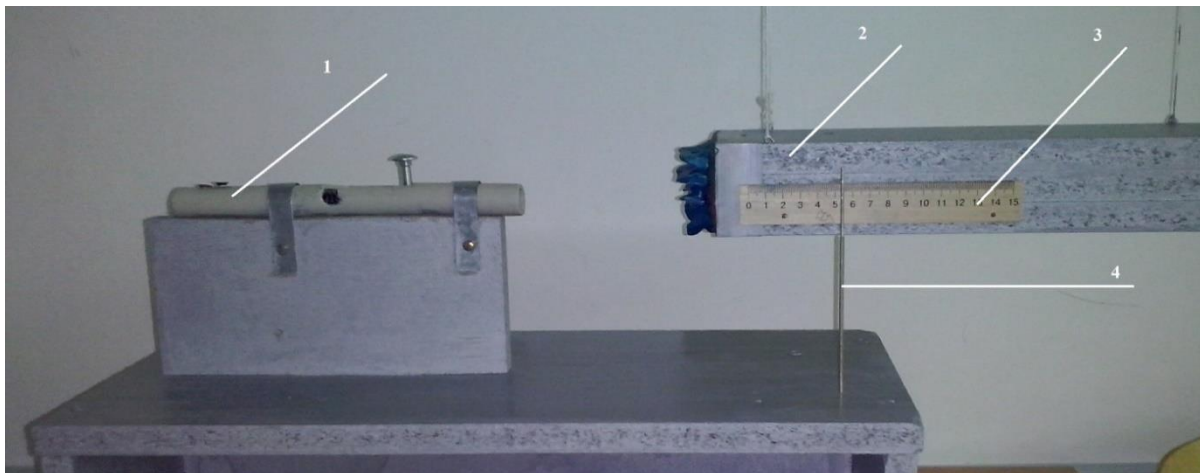
**Лабораторна робота № 5**  
**Вимірювання швидкості польоту кулі**  
**за допомогою балістичного маятника**

**Мета роботи:** засвоєння методики використання балістичного маятника для визначення швидкості польоту кулі.

**Прилади і обладнання:** балістичний маятник, пружинна гармата, набір куль різної маси, міліметрова шкала.

**Опис установки**

Балістичний маятник являє собою важке тіло, підвішене на подвійному біфілярному підвісі (рис. 1). Для визначення зміщення маятника **2** використовується закріплена на маятнику лінійка **3** і стрижень **4**. Пружинна гармата **1** потрібна для набрання швидкості кулею. Поверхня маятника, у яку влучає куля, вкрита пластиком, щоб куля застрягла в ньому і взаємодія була непружна.



*Рис. 1. Загальний вигляд установки для вимірювання швидкості польоту кулі*

**Методичні вказівки**

Маятник після потрапляння в нього кулі рухається поступально. У цьому пристрої час  $t$  зіткнення кулі з маятником малий порівняно з періодом  $T$  коливань маятника, тому систему «куля–маятник» у процесі зіткнення можна вважати замкнутою й застосувати до неї закон збереження імпульсу. Для абсолютно непружного удару закон збереження імпульсу має вигляд:

$$mv = (M + m)u, \quad (1)$$

де  $m$  – маса кулі;  $M$  – маса маятника;  $v$  – швидкість кулі перед ударом;  $u$  – швидкість маятника з кулею після удару.

Враховуючи, що  $M \gg m$ , з рівняння (1) можна отримати:

$$v = \frac{M}{m} u. \quad (2)$$

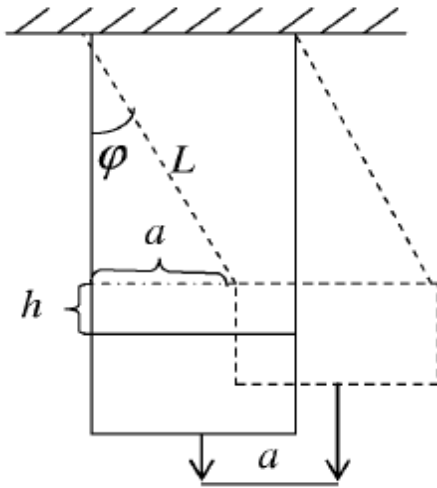


Рис. 2. Параметри руху балістичного маятника, що вимірюються

Після удару маятник відхилиться від положення рівноваги й підніметься на висоту  $h$  (рис. 2). Нехтуючи в цьому процесі тертям об повітря, із закону збереження механічної енергії отримаємо:

$$\frac{(M+m)}{2} u^2 = (M+m)gh. \quad (3)$$

Знайшовши  $u$  з (3) і підставивши у (2), знайдемо:

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2gh}. \quad (4)$$

Величину  $h$  можна визначити, вимірявши кут  $\varphi$  відхилення маятника від положення рівноваги:

$$h = 2L \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (5)$$

де  $L$  – довжина нитки. Тоді:

$$v = \frac{2M}{m} \sqrt{gL} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (6)$$

У цій роботі зручніше визначити не кут  $\varphi$ , а висоту  $h$  через горизонтальне зміщення  $a$ :

$$h = L - \sqrt{L^2 - a^2}. \quad (7)$$

Тоді формула для розрахунку швидкості кулі буде мати вигляд:

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2g(L - \sqrt{L^2 - a^2})}. \quad (8)$$

Так, для вимірювання швидкості кулі необхідно знати масу кулі  $m$ , масу маятника  $M$ , довжину підвісу маятника  $L$ , прискорення вільного падіння  $g$ , та виміряти величину зміщення маятника  $a$ .

Відносна похибка швидкості кулі буде розраховуватися за формулою:

$$\frac{\sigma_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{2g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_L}{\sqrt{L^2 - a^2}}\right)^2 + \left(\frac{a\sigma_a}{2L\sqrt{L^2 - a^2 - L^2 + a^2}}\right)^2} \quad (9)$$

### Порядок виконання роботи

1. Запишіть маси  $m$  двох куль у протокол.
2. Помістіть кулю у пружинну гармату, зробіть постріл і виміряйте горизонтальне зміщення  $a_i$  маятника.
3. Зробіть 5 пострілів, знайдіть середнє значення зсуву  $\langle a \rangle$  та його похибку. Результати вимірювань занесіть у таблицю протоколу вимірювань.
4. Визначте швидкість польоту кулі за формулою (8). Значення маси маятника візьміть  $M = 0.95 \pm 0.005$  кг й довжини нитки  $L = 1.84 \pm 0.005$  м.
5. Підрахуйте похибку  $\sigma_v$  швидкості кулі за формулою (9).
6. Для кулі іншої маси повторіть дії згідно з пунктами 1–5.
7. Після закінчення дослідів покажіть результати викладачу.

### Контрольні питання та завдання

#### *Підготовка до роботи*

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Що прийнято за основу методу вимірювання швидкості кулі в роботі?
3. Сформулюйте закони збереження імпульсу і механічної енергії.
4. Який рух твердого тіла називають поступальним?
5. З якою метою у роботі використовується пластилін?
6. Що називають замкнутою системою?
7. Чому систему «куля–маятник» можна вважати замкнутою?
8. На яких припущеннях побудована теорія досліду?
9. Викладіть перебіг роботи.

### Захист роботи

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте і доведіть закон збереження імпульсу.
2. Що таке повна механічна енергія?
3. Сформулюйте і доведіть закон збереження механічної енергії.
4. Чи може механічна енергія не зберігатися? Чому дорівнює її зміна?
5. Що таке пружний і непружний удар?
6. У якому з процесів, що відбуваються у цій роботі, виконується, а в якому – не виконується закон збереження механічної енергії?
7. Чи виконується в цій роботі закон збереження імпульсу?
8. Від чого залежить швидкість польоту кулі у цьому експерименті?

### **Рекомендована література**

1. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
3. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 5  
«ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОЛЬОТУ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ  
БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Маса маятника  $M$  \_\_\_\_\_ кг

Довжина нитки  $L$  \_\_\_\_\_ м

| № з/п                       | $m_1 =$ _____ кг | $m_2 =$ _____ кг |
|-----------------------------|------------------|------------------|
|                             | $a_1, м$         | $a_2, м$         |
| 1                           |                  |                  |
| 2                           |                  |                  |
| 3                           |                  |                  |
| 4                           |                  |                  |
| 5                           |                  |                  |
| Середнє $\langle a \rangle$ |                  |                  |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 6

### Вимірювання питомої теплоємності металів методом охолодження

**Мета роботи:** визначити питому теплоємність невідомого металу методом порівняння кінетики охолодження двох зразків, один з яких виготовлений із металу з відомою питомою теплоємністю.

**Прилади й обладнання:** установка для визначення теплоємності металів, набір зразків, секундомір.

### Теоретичні відомості

Закон Дюлонга і Пті визначає питому теплоємність твердого тіла за формулою:

$$c = \frac{3R}{M},$$

де  $c$  – питома теплоємність;  $R$  – універсальна газова стала;  $M$  – молярна маса речовини.

Закон Дюлонга і Пті справедливий при температурах вищих за *температуру Дебая*. Відкритий закон був у 1819 році.

Питома теплоємність – характеристика речовини, яка вказує кількість теплоти, необхідної для нагрівання одиниці маси речовини на 1 °С, або ж кількість теплоти, що виділяється під час охолодження одиниці маси речовини.

Для того, щоб підвищити температуру, потрібно збільшити кінетичну енергію руху кожного з атомів твердого тіла. Однак внаслідок сильної взаємодії атомів між собою, збільшення кінетичної енергії потребує рівного за величиною збільшення потенціальної енергії. Тому теплоємність твердого тіла вдвічі більша за теплоємність ідеального газу. Закон Дюлонга і Пті можна переписати для теплоємності твердого тіла у вигляді:

$$c = 3k_B N,$$

де  $c$  – теплоємність;  $k_B$  – стала Больцмана;  $N$  – кількість атомів у кристалі.

*Теплоємність* – це фізична величина, яка визначається кількістю теплоти, яку потрібно надати тілу для підвищення його температури на один градус.

Для справедливості закону Дюлонга і Пті необхідно, щоб енергії теплового руху вистачало для збудження всіх можливих типів коливань у твердому тілі. За низьких температур деякі з коливань не збуджуються. Це явище зумовлене законами квантової статистики (у цьому випадку – статистики Бозе–Ейнштейна). Тому при низьких температурах закон Дюлонга і Пті не діє.

Як було встановлено Дюлонгом і Пті, молярна теплоємність твердих одноатомних тіл майже однакова і дорівнює:

$$c_M = 3R.$$

Закон Дюлонга і Пті є дійсним для твердих одноатомних тіл, за достатньо високих температур. Для більшості тіл (зокрема для металів) такою високою температурою є вже кімнатна температура.

Процес охолодження твердого тіла з часом описують за законом Ньютона. Закон Ньютона охолодження тіла (металу) з часом записується у вигляді диференціального рівняння:

$$\frac{dT}{dt} = k(T_0 - T),$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища (довкілля, кімнати, де охолоджується тіло);  $t$  – час;  $T$  – поточна температура тіла.

Його розв’язок має вигляд:

$$T = T_0 + (T_{in} - T_0)e^{-kt}, \quad (1)$$

$T_{in}$  – початкова температура, з якої починається процес охолодження;  $(T_{in} - T_0)$  – різниця температур у початковий момент часу  $t = 0$ .

Коефіцієнт охолодження тіла  $k$ , що є у згасаючій експоненті, виражається через такі параметри:

$$k = \frac{\alpha \cdot S}{m \cdot c}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  [Вт/(м<sup>2</sup> · °K)] – коефіцієнт тепловіддачі, кількість теплоти, що віддається з 1 м<sup>2</sup> поверхні за одиницю часу за одиничного температурного натиску (є функцією процесу тепловіддачі; величина розрахункова, а не таблична, визначається експериментально);  $S$  – площа поверхні тіла, що охолоджується;  $m$  – його маса;  $c$  – питома теплоємність (яка, до речі, теж є функцією процесу).

Теоретичний графік процесу охолодження має такий вигляд:

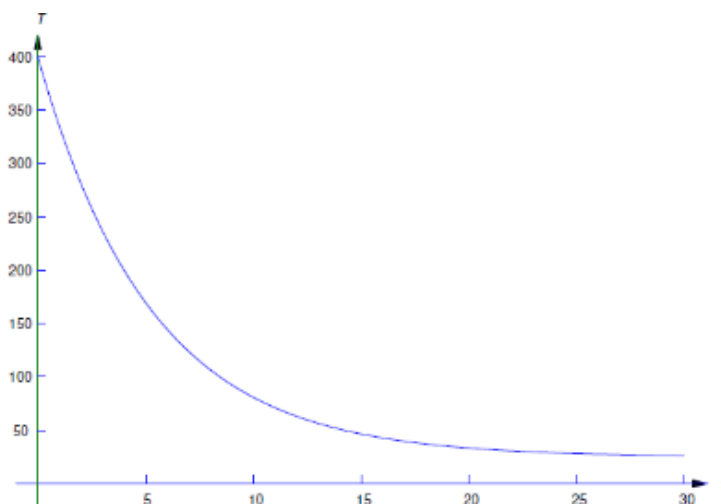


Рис. 1. Залежність температури тіла, що охолоджується, із часом

Тобто в процесі охолодження температура тіла наближається за експонентою до температури довкілля  $T_0$ .

Якщо маємо два металеві зразки однакової маси, площі, однаковими температурними коефіцієнтами тепловіддачі  $\alpha$ , але різними питомими теплоємностями  $c_{1(2)}$ , то:

$$k_1 c_1 = k_2 c_2 = \frac{\alpha \cdot S}{m} = \text{Const.} \quad (3)$$

Звідки, якщо відома питома теплоємність першого зразка, то питома теплоємність невідомого зразка буде дорівнювати:

$$c_2 = \frac{k_1}{k_2} c_1. \quad (4)$$

Коефіцієнти затухання  $k_{1(2)}$  можна знайти з експериментальних даних за охолодженням тіл із відомою і невідомою теплоємністю. З рівняння (1) випливає, що:

$$Y(t) = \ln \frac{T - T_0}{T_{in} - T_0} = -kt, \quad (5)$$

тобто функція  $Y(t)$  вже *лінійно* залежить від часу з кутовим коефіцієнтом (похідною), що дорівнює  $-k$ . Кутовий коефіцієнт визначається з таблиці експериментальних даних  $T = T(t)$ , наприклад, за методом найменших квадратів.

Отже, питому теплоємність досліджуваного металу  $c_2$  можна визначити, порівнюючи швидкість його охолодження зі швидкістю охолодження еталонного зразка. Для цього використовують спеціальну установку, зображену на рис. 2 і рис. 3.

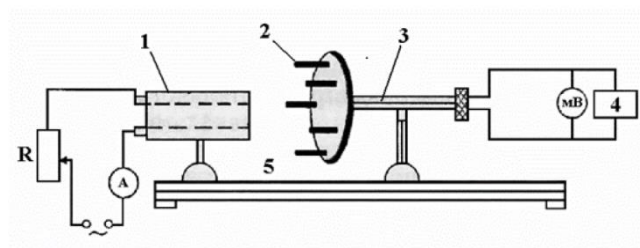


Рис. 2. Установка для визначення питомої теплоємності металів методом охолодження

У кільцевій муфельній печі **1** нагрівають зразки **2**, які містять усередині спаї термопари **3**, з'єднаної з мілівольтметром і потенціометром **4** (знаходиться у середині вимірювального блоку).

### Порядок виконання роботи

1. Увімкніть блок 1 і 2 лабораторної установки перемикачем «СЕТЬ» (з дозволу викладача!).

2. Ручкою 3 «ОБРАЗЕЦ» виставить значення 1 (перший зразок).
3. Кнопкою 5 «НАГРЕВ» увімкніть нагрів «*WARM*» муфельної печі 1.

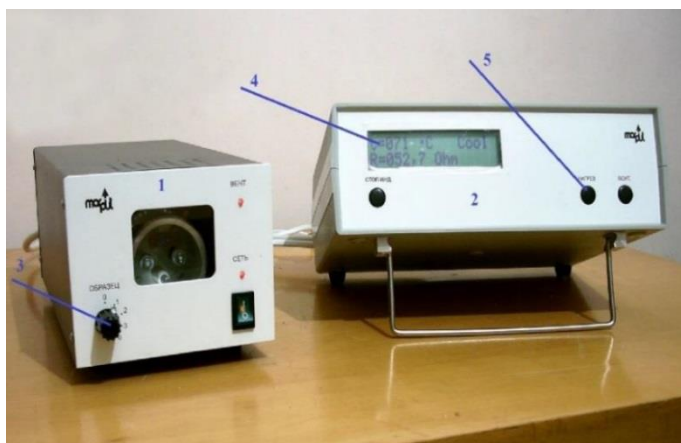


Рис. 3. Загальний вигляд установки

4. Дочекайтеся досягнення температури по індикатору 4 значення  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (водночас автоматично вимкнеться нагрів і увімкнеться охолодження «*COOL*»).

5. Із цього моменту часу, як увімкнулося охолодження, починайте відлік часу  $t$  за секундоміром, і через кожну хвилину охолодження (спочатку процесу можна вимірювати із кроком  $30\text{ c}$ ) знімаємо показники температури  $T$  за індикатором 4, до

досягнення значення  $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (кімнатна температура).

6. Значення температури  $T$  зразка та часу  $t$  за секундоміром під час охолодження запишіть у таблицю протоколу вимірювань.

7. Побудуйте графік залежності температури зразка від часу  $T = f(t)$ .

8. Аналогічні дослідження (п. 2–7) виконайте для зразка 2. Бажано починати вимірювання з однієї і тієї ж температури.

9. Перерахуйте залежність  $T(t)$  у функцію  $Y(t)$  за формулою (5). Побудуйте точкові графіки і за методом найменших квадратів знайдіть кутовий коефіцієнт  $k_{1(2)}$  для кожного зразка. Побудуйте для порівняння отриману пряму  $Y(t) = -kt$ .

10. За формулою (4) визначте  $c_2$ , взявши значення  $c_1$  з таблиці питомих теплоємностей для твердих матеріалів (для міді). Досліджувані зразки мають невеликий об'єм і близькі значення густини, тому  $m_1$  та  $m_2$  приймаємо майже рівними з однаковими поверхнями  $S$ , а також однаковими коефіцієнтами тепло-віддачі.

11. Обчисліть абсолютну і відносну похибки експерименту.

## Контрольні питання та завдання

### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Чому питома теплоємність однієї і тієї самої речовини у різних агрегатних станах різна?
2. Як визначити похибку вимірювання температури?
3. Від чого залежить швидкість охолодження тіла?
4. Яке рівняння описує процес охолодження твердого тіла?

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Що називають теплоємністю? У яких одиницях її вимірюють?
2. Сформулюйте закон Дюлонга і Пті для теплоємності. Що таке температура Дебая?
3. Сформулюйте закон Ньютона охолодження твердого тіла з часом.
4. Чому площі  $S_1$  і  $S_2$  зразків мають бути однаковими?
5. Визначте кількість теплоти, яку віддає 1 кг міді під час охолодження від температури 100 °С до 20 °С. Питому теплоємність міді взяти з довідника.

### **Рекомендована література**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.
3. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.



## Лабораторна робота № 7

### Вивчення електростатичного поля

**Мета роботи:** дослідити електростатичне поле, яке створюється зарядженими тілами, застосовуючи метод електростатичних моделей. Вивчити характеристики електростатичного поля.

**Приладдя:** лабораторна установка ФПЕ-31.

#### Теоретична частина

*Електричне поле* – матеріальне середовище, яке існує навколо заряджених тіл та проявляє себе силовою дією на заряджені тіла. Основними характеристиками електростатичного поля є напруженість  $\vec{E}$  та потенціал  $\varphi$ .

*Напруженість електричного поля  $\vec{E}$*  – векторна фізична величина, силова характеристика електричного поля, чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний позитивний заряд, який розміщено у цій точці поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Якщо величина та напрямок вектора напруженості поля в кожній точці поля однакові, то таке поле називається *однорідним*.

*Потенціал  $\varphi$*  – скалярна фізична величина, енергетична характеристика електростатичного поля, чисельно дорівнює потенціальній енергії, якою б володів одиничний позитивний заряд у цій точці поля:

$$\varphi = \frac{W_n}{q}.$$

Між напруженістю та потенціалом  $\varphi$  існує такий взаємозв'язок:

$$\vec{E} = - \text{grad } \varphi.$$

Вектор напруженості спрямований в бік зменшення потенціалу. У випадку однорідного поля:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r},$$

де  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ,  $\Delta\varphi$  – різниця потенціалів;

$\Delta r$  – відстань між поверхнями (точками  $r_1$  і  $r_2$ ,  $\Delta r = r_1 - r_2$ ) з потенціалами  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ .

Графічно електростатичні поля зображують за допомогою силових ліній та поверхонь однакового потенціалу (еквіпотенціальних поверхонь). Силові лінії перпендикулярні еквіпотенціальним поверхням.

Експериментально простіше виміряти потенціал поля, ніж його напруженість.

Під час вивчення розподілу потенціалу електростатичного поля застосовується метод зондів (метод електростатичних моделей). Сутність методу зондів полягає в тому, що в досліджувану точку поля вводиться додатковий електрод-зонд. Він зроблений так, щоб мінімально порушувати своєю присутністю досліджуване поле.

### Пристрій та принцип роботи

Установка для вивчення напруженості електричного поля складається з двох пристроїв № 1 та № 2 (рис. 1).

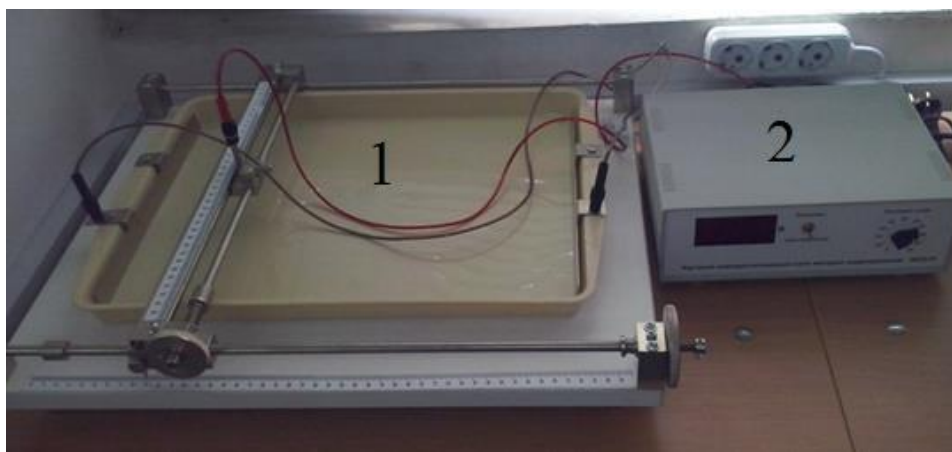


Рис. 1. Зовнішній вигляд установки

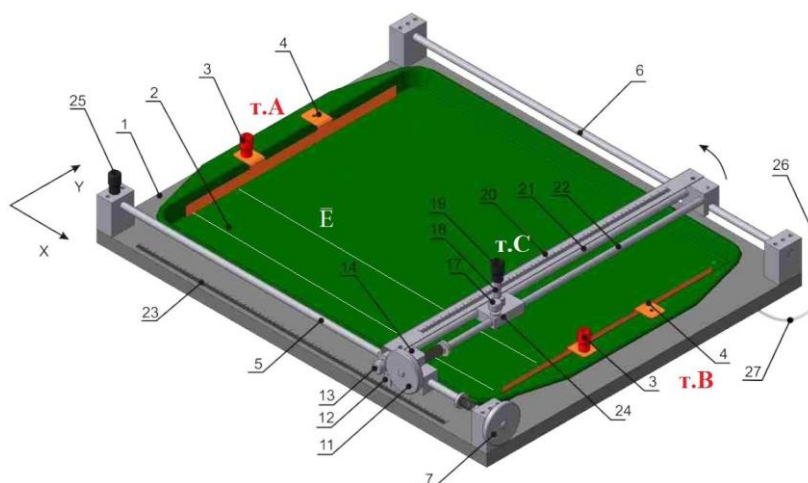


Рис. 2. Зовнішній вигляд електростатичної ванни

1 – піддон, 2 – ванна, 3 – клема, 4 – електроди, 5,6 – напрямні по осі X, 7 – штурвал для точного переміщення по ОХ, 14 – повзунок з пристроєм переміщення по ОУ, 13 – фіксуючий гвинт, 21, 22 – пристрій позиціонування по ОУ, штурвал 11 для точного позиціонування по ОУ, 24 – повзунок з зондом 18, 19 – клема, 12-вказівники відліку, 23, 20 – шкали відліку, 26, 27 – зливний шланг.

Пристрій № 1 (рис. 1) призначений для створення однорідного постійного електричного поля (електростатичне поле). Він складається з піддона **1**, на якому встановлена ванна **2** (у ванні міститься вода, рис. 2). Вода слугує середовищем, в якому створюється електростатичне поле за допомогою двох металевих електродів **4**, розміщених на протилежних сторонах ванни. На електродах встановлено клеми **3** для підключення до вимірювального пристрою. До електродів прикладається постійна різниця потенціалів:

$$\Delta\varphi_{AB} = \varphi_A - \varphi_B,$$

де  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  – потенціали електродів.

Система позиціонування зонда складається з пристрою переміщення по осі X і пристрою переміщення по осі Y. Пристрій переміщення по осі X складається з рухомої **5** і нерухомої **6** напрямних. Рухома напрямна **5** може переміщуватися на відстань приблизно 10 мм за допомогою штурвала **7** для точного позиціонування по осі X.

По рухомій напрямній **5** переміщується повзунок **14** з пристроєм переміщення по осі Y. За допомогою гвинта **13** повзунок **14** фіксується на напрямній **5**. Пристрій переміщення по осі Y також складається з рухомої **22** і нерухомої **21** напрямних. Рухома напрямна **22** також може переміщуватися на відстань приблизно 10 мм за допомогою штурвала **11** для точного позиціонування зонду по осі Y.

На передній панелі вимірювального пристрою **2** розміщені: тумблер перемикавання режиму вимірювання, перемикач опорного потенціалу, індикатор «В». У режимі «Електроди» на індикаторі «В» відображається значення напруги на електродах у вольтах. У режимі «нуль-індикатор» індикатор показує різницю між потенціалом у цій точці поля та опорним потенціалом.

Перемикач опорного потенціалу дає змогу встановити опорний потенціал рівний 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 від різниці потенціалів, що подається на електроди.

Джерело живлення підключається до мережі 220 В, 50 Гц.

Принцип дії установки полягає в дослідженні електростатичного поля методом електролітичної ванни. Відповідно до цього методу, електроди занурені у ванну, заповнену слабо провідною рідиною (водопровідна вода). Між електродами створюється різниця потенціалів і за допомогою зонда компенсаційним методом визначаються потенціали різних точок. Лінії струму і розподіл потенціалу в слабо провідній рідині будуть збігатися з силовими лініями і розподілом потенціалу в статичному полі між тими ж електродами.

За допомогою перемикача на вимірювальному пристрої встановлюють опорний потенціал. Переміщаючи зонд за допомогою системи позиціонування, досягають мінімального значення різниці між потенціалом зонду і опорним потенціалом на

нуль-індикаторі. Потенціал зонда в цьому випадку дорівнює опорному потенціалу. Координати точки відраховуються за допомогою шкал **23** і **20** і показчиків **12**.

### Порядок виконання роботи

1. Заповніть ванну водою.
2. На листі міліметрового паперу формату А3 накресліть координатні осі  $X$  та  $Y$  (якщо на листі А4, то ліпше в масштабі 1:2), та нанесіть контури електродів.
3. Увімкніть (з дозволу викладача) вимірювальний пристрій.
4. Зафіксуйте напругу на електродах (переведіть тумблер режиму вимірювання в положення «електроди»).
5. Встановіть перемикач опорного потенціалу «Потенціал зонда» на пристрої № 2 в положення 0.1, розрахуйте відповідний потенціал (наприклад: якщо перемикач опорного потенціалу «0.1», а напруга між електродами становить  $\sim 8$  В, це означає, що опорний потенціал дорівнює:  $0.1 \cdot 8 = 0.8$  В).
6. Переведіть тумблер режиму вимірювання в положення «нуль-індикатор».
7. Переміщуйте зонд спочатку по  $Ox$ , а потім по  $Oy$  у ванні за допомогою напрямних 5, 6, 21, 22 та штурвалів 7, 11 до встановлення *мінімального значення різниці потенціалів* на індикаторі (тобто значення, максимально близького до 0).
- Примітка: якщо виникають коливання поверхні води, то для стабілізації показань дочекайтесь припинення процесу коливань.*
8. Виміряйте координати положення зонда за допомогою шкал та показчиків, нанесіть їх на координатну площину.
9. Переміщуючи зонд, визначте координати ще 5 точок з таким самим значенням потенціалу.
10. Виконайте вимірювання відповідно до п. 5–7 для інших опорних потенціалів (0.3, 0.5, 0.7, 0.9).
11. Завершивши роботу, вимкніть вимірювальний пристрій за допомогою вимикача «Сеть».
12. За отриманими точками проведіть лінії рівного потенціалу. Накресліть картину силових ліній.
13. Розрахуйте п'ять значень напруженості  $E$  для різних  $\Delta r$  та  $\Delta \varphi_{12}$ .
14. Запишіть кінцевий результат для напруженості однорідного поля у вигляді:

$$E = \bar{E} \pm \Delta E$$

15. Знайдіть відносну похибку вимірювань.

## **Контрольні питання та завдання**

### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Поле електродів якої форми необхідно дослідити у цій роботі?
3. Намалюйте приблизну картину розподілу силових ліній та поверхонь однакового потенціалу (еквіпотенціальних поверхонь) електростатичного поля між двома плоскими електродами.

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Дайте визначення напруженості електростатичного поля, запишіть формулу і одиниці вимірювання.
2. Дайте визначення потенціалу, запишіть формулу для потенціалу електричного поля, вкажіть одиниці вимірювання.
3. Яке поле називається однорідним?
4. Яке взаємне розташування силових ліній та еквіпотенціальних поверхонь електростатичного поля?
5. Як за розподілом потенціалу визначити напрямки силових ліній?

### **Рекомендовані джерела**

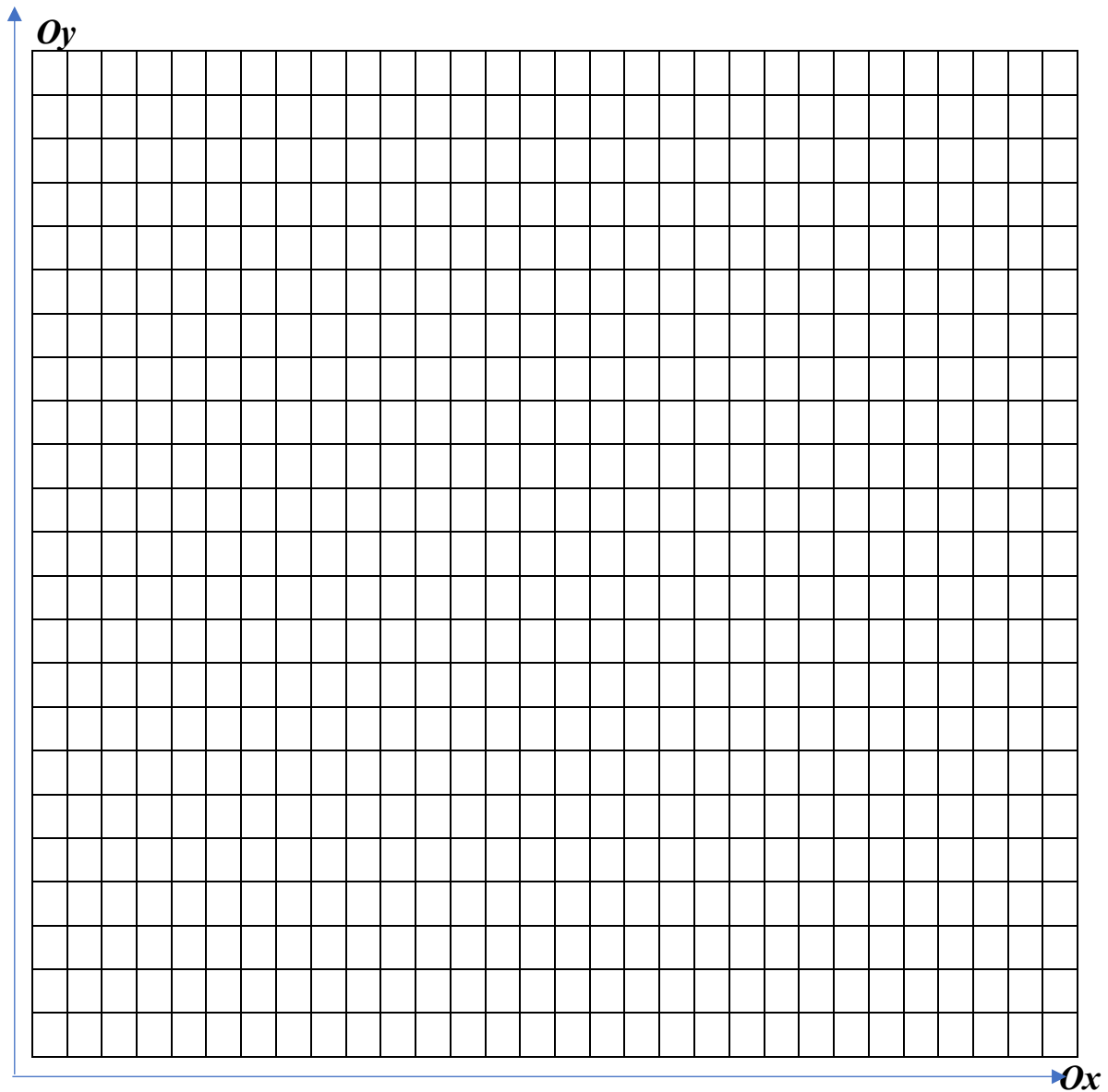
1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.
3. Русаков В. Ф. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 7  
«ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ»

*(Протоколом виконання є картина еквіпотенційних поверхонь, зроблена на міліметровому папері у масштабі ванни, в якій виконується дослід; сітка є ілюстративною)*

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_



Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 8

### Дослідження залежності опору напівпровідника від температури та визначення ширини забороненої зони напівпровідника

**Мета роботи:** дослідити залежність опору напівпровідників від температури, визначити ширину забороненої зони та температурний коефіцієнт опору досліджуваного напівпровідника.

**Прилади та приладдя:** електропіч, всередині якої встановлено досліджувані зразки, датчик температури та вимірювальний пристрій.

#### Теоретична частина

*Напівпровідники (НПП)* – широкий клас речовин, які характеризуються значеннями питомого опору, які є проміжними між питомим опором металів ( $\rho \sim 10^{-8} \div 10^{-6}$  Ом м) та діелектриків ( $\rho > 10^4$  Ом м). Характерна особливість напівпровідників (суттєва різниця з більшістю металів) – зменшення їх опору з ростом температури завдяки збільшенню кількості носіїв струму (розсіювання носіїв струму на атомах в напівпровідниках теж відбувається, але воно дає набагато менший внесок в опір напівпровідників, ніж в металах).

У широкому інтервалі температур опір напівпровідників змінюється за законом:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (1)$$

де  $\Delta E$  – ширина забороненої зони НПП;  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – термодинамічна температура.  $R_0$  – величина, яка визначається властивостями конкретного матеріалу, опір при  $0^\circ\text{C}$ , її визначити можна шляхом екстраполяції графіку залежності з рис. 2 до перетину з віссю  $Y$ , в точці перетину отримаємо значення опору  $R_0$ .

Графік залежності опору від температури НПП представлений на рис. 1.

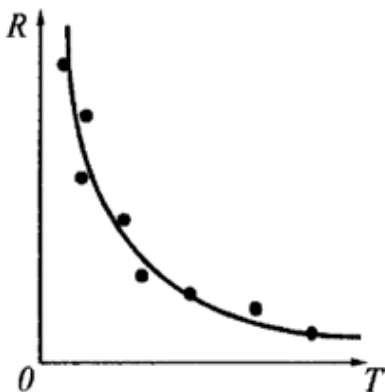


Рис. 1. Залежність опору НПП від температури

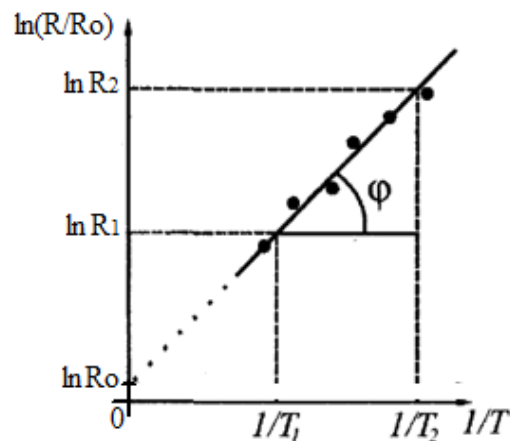


Рис. 2. Лінеаризація температурної залежності НПП

Температурну залежність  $R = f(T)$  зручно представити у координатах  $\ln \frac{R}{R_0}$  від  $1/T$ . Для цього прологарифмуємо вираз (1):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2kT} \Rightarrow \ln(R/R_0) = \frac{\Delta E}{2kT} = \frac{\beta}{T}, \quad (2)$$

$\beta$  – кутовий коефіцієнт, який визначається з графіку функції за *методом найменших квадратів*.

Графік залежності  $\ln(R/R_0) = f(1/T)$ , що показаний на рис. 2, має вигляд прямої, нахил  $\beta$  якої визначається шириною забороненої зони  $\Delta E$  напівпровідника.

Вимірюючи експериментально значення  $R$  за різних значень  $T$ , можна, використовуючи співвідношення (2), визначити ширину забороненої зони:

$$\Delta E = 2k\beta. \quad (3)$$

Зміну опору матеріалу зі зміною температури характеризують температурним коефіцієнтом опору. Температурний коефіцієнт опору – це величина, яка чисельно дорівнює відносній зміні опору провідника за зміни його температури на 1 °K:

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}. \quad (4)$$

Для напівпровідників з (1) та (4) впливає:

$$\alpha_T = - \frac{\Delta E}{2kT^2}. \quad (5)$$

З (5) впливає, що для напівпровідників  $\alpha_T < 0$ . До того ж  $\alpha_T$  зменшується за модулем зі збільшенням температури.

Залежність опору напівпровідників від температури покладена в основу роботи багатьох технічних пристроїв. Напівпровідниковий прилад, у якому використовується залежність електричного опору від температури, називається термістором (терморезистором, термоопором). Головні параметри термісторів – діапазон робочих температур і температурний коефіцієнт опору. Діапазон робочих температур більшості термісторів лежить у межах 200 ÷ 400 К.

### Опис експериментальної установки

Установка складається з електропечі, всередині якої встановлено досліджувані зразки, датчика температури та вимірювального пристрою.

На передній панелі електропечі знаходиться віконце, яке дає змогу спостерігати зразки, встановлені в електропечі. На цій же панелі розміщені наступні органи управління та індикації:

- вимикач «СЕТЬ» (призначено для увімкнення та вимикання живлення електропечі);
- перемикач «ОБРАЗЕЦ» (призначено для почергового підключення зразків до вимірювального входу вимірювача температури).

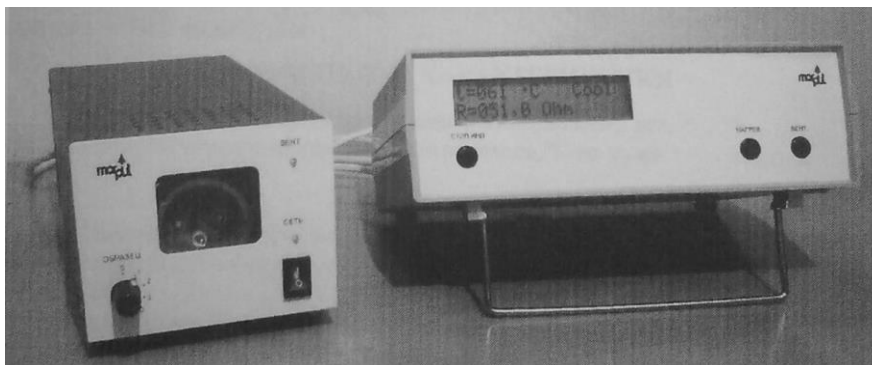


Рис. 3. Загальний вигляд установки для дослідження температурної залежності НПП

Положенням перемикача «ОБРАЗЕЦ» відповідає:

- «1» – метал;
- «2» – сплав з низьким температурним коефіцієнтом опору, (цей зразок введено в установку для демонстрації властивостей сплавів з малим температурним коефіцієнтом опору);
- «3» – напівпровідник;
- «0» – вхід вимірювача температури закорочено.

На передній панелі вимірювального пристрою розміщені наступні органи управління та індикації:

- кнопки «НАГРІВ» та «ВЕНТ.» призначені для увімкнення та вимкнення (шляхом повторного натискання) електропечі та вентилятора відповідно;
- кнопка «СТОП ІНД.» призначена для увімкнення (та вимкнення) режиму зупинки індикації значень температури та опору (під час увімкнення цього режиму покази на вимірювальних індикаторах фіксуються в тому стані, в якому вони знаходились під час натиснення кнопки «СТОП ІНД.», водночас режим роботи установки не змінюється; під час повторного натиснення відбувається вимкнення цього режиму і на індикаторах знову відображуються поточні значення вимірювальних величин);
- індикатор показує вимірювальні величини (у верхній частині – температуру  $t$  в  $^{\circ}\text{C}$ , а в нижній – опір  $R$  в Ом), а також режим роботи – «WARM» (нагрів), «COOL» (охолодження) та «FIXED» (зупинка індикації).

На задній панелі вимірювального пристрою розміщено вимикач «СЕТЬ».

### Порядок виконання роботи

1. Увімкніть (з дозволу викладача) вимірювальний пристрій та електропіч за допомогою вимикачів «СЕТЬ». Водночас на індикаторі  $R$  вимірювального пристрою буде показано значення опору обраного зразка або нулі за умови замкнутого входу (допускається індикація до значення другого молодшого розряду), а на індикаторі  $t$  – *температура оточуючого зразок середовища*.
2. На електропечі повинен світитися індикатор «СЕТЬ» і не світитися індикатор «ВЕНТ.». Дайте приборам прогрітися протягом 3–5 хв.
3. Встановіть перемикач «ОБРАЗЕЦ» в положення 3, тобто підключіть напівпровідниковий зразок до нагрівача.
4. Увімкніть нагрівання зразка, натиснувши кнопку «НАГРІВ» (водночас на індикаторі повинен відображатися режим роботи «WARM» (нагрів) та спостерігайте за індикатором температури процес нагрівання зразка).
5. Зніміть покази індикаторів температури  $t$  та опору  $R$  з кроком  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до максимальної температури  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (це межа) і занесіть результати в таблицю протоколу вимірювань. Після досягнення температури  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  автоматично увімкнеться вентиляція та вимкнеться нагрів печі.
6. Після завершення роботи вимикачами «СЕТЬ» вимкніть установку.

### Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного значення температури  $t$  розрахуйте  $T = t + 273\text{ }^{\circ}\text{K}$ , потім  $1/T$  та знайдіть  $\ln(R/R_0)$ .
2. Побудуйте графік залежності  $\ln(R/R_0) = f(1/T)$  для досліджуваного напівпровідника.
3. За формулою (3) розрахуйте ширину забороненої зони  $\Delta E$ . Значення ширини забороненої зони виразіть в електрон-вольтах ( $1\text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}$ ).
4. За формулою (5) розрахуйте температурний коефіцієнт опору  $\alpha_T$  для початкової і кінцевої температур.

### Контрольні питання та завдання

#### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. У чому полягає мета роботи?
2. Які фізичні величини у цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Які графіки потрібно побудувати за результатами роботи?
4. Запишіть формули, за якими розраховуються ширина забороненої зони і температурний коефіцієнт опору. Поясніть зміст позначень.

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Що називається електричним опором?
2. Від чого залежить опір провідника? Запишіть формулу для розрахунку температурного коефіцієнту опору  $\alpha$  металу.
3. Які речовини відносяться до напівпровідників? Як залежить електричний опір напівпровідників від температури?
4. Порівняйте залежність опору від температури напівпровідників та металів і поясніть причину різної залежності їхнього опору від температури.

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.
3. Русаков В. Ф. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
4. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 8  
«ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ НАПІВПРОВІДНИКА  
ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ  
НАПІВПРОВІДНИКА»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

*Зразок 3*

|                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $t, ^\circ C$   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R, \Omega$     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $T, K$          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $1 / T, K^{-1}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\ln(R / R_0)$  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

|                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $t, ^\circ C$   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R, \Omega$     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $T, K$          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $1 / T, K^{-1}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\ln(R / R_0)$  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 9

### Визначення радіуса кривизни лінзи та довжини світлової хвилі за допомогою кілець Ньютона

**Мета роботи** – вивчити явище інтерференції світла в тонких плівках, визначити радіус кривизни лінзи, визначити довжину світлової хвилі.

**Прилади та приладдя:** скляна пластинка, плоска опукла лінза, біноклярний мікроскоп (один монокуляр якого застосовується для підсвічування, а інший наділений окулярною шкалою), масштабна лінійка з відомою ціною поділки, набір світлофільтрів відомої довжини хвилі.

#### Загальні положення

*Інтерференція* – це процес накладання когерентних хвиль, внаслідок чого відбувається перерозподіл енергії хвильового поля, тобто утворюються послідовні світлі (максимуми) та темні (мінімуми) ділянки інтерференційної картини.

*Когерентні хвилі* – це хвилі однакової частоти, які приходять у дану точку простору з постійною різницею фаз. Інтерференцію можна спостерігати при падінні світлової хвилі на тонку прозору пластинку (або плівку). Під час відбивання світла від обох поверхонь пластинки виникають дві світлові хвилі, які можуть

інтерферувати. Прикладом інтерференції в тонких плівках є кільця Ньютона.

*Кільця Ньютона* спостерігаються тоді, коли опукла поверхня лінзи малої кривизни є дотичною до плоскої поверхні добре відполірованої пластинки. Отже, повітряний шар, який залишається між лінзою та пластинкою, поступово збільшується за товщиною від центру до країв (рис. 1). Якщо на лінзу падає пучок монохроматичного світла, то світлові хвилі, які відбиваються від верхньої та нижньої межі цього повітряного шару, будуть інтерферувати між собою. Водночас бачимо таку картину: в центрі – темна «пляма», яка оточена рядом концентричних світлих та чорних кілець, які поступово зменшуються за шириною (рис. 2).

Розрахуємо радіуси кілець Ньютона у відбитому світлі. Інтерференція відбувається між хвилями, які відбиваються від верхньої та нижньої поверхні повітряного шару. Під час розрахунку оптичної різниці ходу треба враховувати, що при відбиванні від більш оптично густого середовища (тобто на межі повітря–

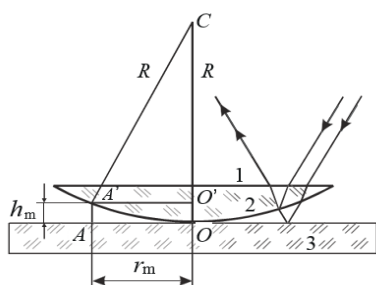


Рис. 1. Схема досліджу

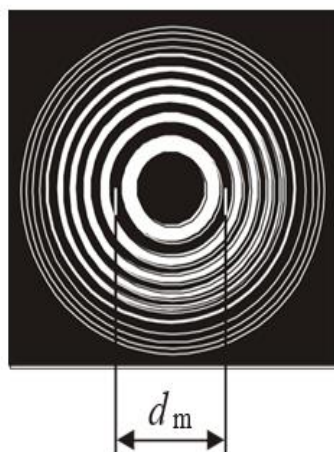


Рис. 2. Картина кілець Ньютона

скло), фаза хвилі змінюється на протилежну. Ця зміна призводить до появи додаткової різниці ходу  $\lambda/2$ .

Оптична різниця ходу променів, які відбиваються від двох поверхонь, у разі нормального падіння світла на тонку плівку буде дорівнювати:

$$\Delta = 2h_m n + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

де  $h_m$  – товщина плівки (товщина повітряного шару) в місці, де спостерігається кільце з номером  $m$ ;

$n$  – показник заломлення плівки ( $n = 1$ , оскільки шар є повітряним).

З трикутника  $A'O'C$  (див. рис. 1) знайдемо величину  $h_m$ , застосовуючи теорему Піфагора (виконайте це самостійно):

$$h_m = \frac{r_m^2}{2R}, \quad (2)$$

де  $r_m$  – радіус кільця, яке має номер  $m$ ;  $R$  – радіус кривизни лінзи.

Темне кільце (мінімум інтерференції) спостерігається, якщо виконується умова:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

З формул (1), (2), (3) отримаємо:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}. \quad (4)$$

Із формули (4) можна визначити  $R$  (або  $\lambda$ ), але оскільки внаслідок пружної деформації скла неможливо досягнути ідеального дотику сферичної лінзи та плоскої пластинки в одній точці, то більш коректний результат отримаємо, якщо вираховувати  $R$  (або  $\lambda$ ) за різницею радіусів двох кілець  $r_m$  та  $r_n$ . Кінцева формула матиме вигляд:

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m-n)\lambda}. \quad (5)$$

Для розрахунків цей вираз зручніше записати так:

$$R = \frac{(d_m - d_n)(d_m + d_n)}{4(m-n)\lambda}. \quad (6)$$

де  $d_m$  та  $d_n$  – діаметри кілець;  $m$  та  $n$  – відповідні номери кілець.

## Опис установки

Для спостереження кілець Ньютона застосовується установка, яка наведена на рис. 3.

Установка складається з мікроскопа, у якого знятий один з окулярів і встановлена лампа освітлення для отримання кілець Ньютона. Окулярний мікромір забезпечений шкалою, яку видно одночасно з кільцями Ньютона. Ціна поділки шкали мікрметра становить 0.1 мм. Щоб визначити наближені розміри об'єкта (лінійні розміри і площу) потрібно користуватися Перевідною таблицею для відповідного збільшення, за якого проводяться вимірювання. Між окулярним мікрометром і об'єктивом поміщений opak-ілюмінатор, тому що вимірювання проводяться у відбитому світлі. Opak-ілюмінатор є невеликою трубкою з боковим вікном, через яке проходить світло. Всередині трубки, перед вікном, знаходиться напівпропускна скляна пластинка, яка за допомогою спеціальних гвинтів встановлюється під кутом  $45^\circ$  до осі мікроскопа. Opak-ілюмінатор освітлюється монохроматичним світлом. Для цього необхідно джерело світла з лінійчатим спектром (у нашому випадку – ртутна лампа), конденсорна лінза. Промені, що виходять з opak-ілюмінатора, утворюють паралельний пучок світла, який падає нормально на лінзу, а потім на плоскопаралельну пластинку. Клин, на якому відбувається інтерференція променів, утворений повітряним прошарком між лінзою і пластинкою.

Під час спостереження за допомогою мікроскопу в полі зору бачимо чергування темних та світлих кілець, які мають темний центр («пляму»). Разом із кільцями Ньютона одночасно видно окулярну шкалу.

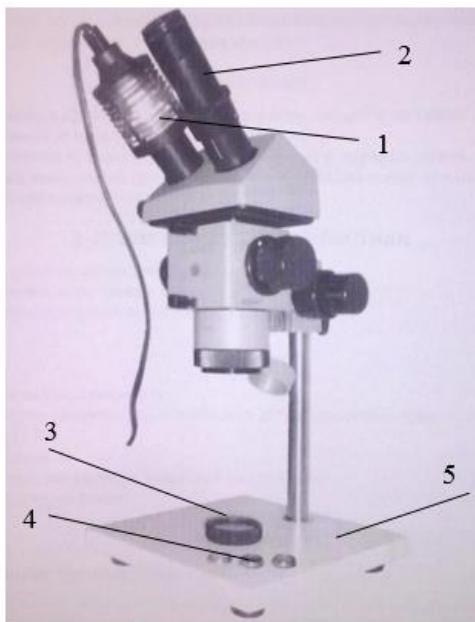


Рис. 3. Лабораторна установка

1 – освітлювач;

2 – насадка для мікроскопа;

3 – лінза, яка змонтована з пластинкою;

4 – світлофільтри;

5 – предметний столик.

## Порядок виконання роботи

**Вправа 1.** Визначення радіуса кривизни лінзи

1. Увімкніть освітлювач у мережу. Встановіть червоний світлофільтр ( $\lambda=630$  нм). Помістіть на столик 5 мікроскопа лінзу 3.

2. Досягніть гарної видимості кілець Ньютона. В центрі має спостерігатися темна пляма. Окулярна шкала водночас має бути розташованою за діаметром кілець.

3. Виміряйте діаметр першого темного кільця. Для цього потрібно отримати відліки  $N_1$  та  $N_2$  для діаметрально протилежних точок кільця (див. рис. 2) в поділках окулярної шкали. Діаметр кільця дорівнює різниці відліків, яка множиться на ціну поділки  $a$  окулярної шкали (див. перевідну таблицю):

$$d = |N_1 - N_2| \times a.$$

4. Виміряйте діаметри п'яти темних кілець згідно з п. 3.

5. Розрахуйте радіус кривизни лінзи за формулою (6) п'ять разів. Знайдіть середнє значення радіуса. Далі розрахуйте відповідну похибку.

### **Вправа 2. Визначення довжини світлової хвилі**

1. Замініть червоний світлофільтр на зелений (або інший за вказівкою викладача).

2. Виміряйте діаметри п'яти темних кілець згідно з п. 2, 3 вправи 1.

3. Розрахуйте п'ять разів довжину світлової хвилі, застосовуючи знайдене значення радіуса кривизни лінзи та формулу (6). Знайдіть середнє значення довжини хвилі.

4. Розрахуйте похибку як для прямих вимірювань.

5. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат подайте у вигляді:

$$\lambda = \lambda_{\text{ср}} \pm \Delta\lambda.$$

### **Перевідна таблиця**

| Округлені значення збільшень, які нанесені на рукоятку барабана, крат | Одна поділка шкали 0.1 мм відповідає величині на об'єкті, мм |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 0.6                                                                   | 0.17                                                         |
| 1                                                                     | 0.1                                                          |
| 2                                                                     | 0.05                                                         |
| 4                                                                     | 0.025                                                        |
| 7                                                                     | 0.014                                                        |

### **Таблиця довжин хвиль оптичного діапазону світла**

| Колір    | Довжина хвилі, нм |
|----------|-------------------|
| Червоний | $630 \pm 10$      |
| Жовтий   | $578 \pm 10$      |
| Зелений  | $546 \pm 10$      |
| Синій    | $435 \pm 10$      |

## Контрольні питання та завдання

### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Яка величини в роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується радіус кривизни лінзи. Поясніть позначення.
4. Запишіть формулу, за якою розраховується довжина світлової хвилі. Поясніть позначення.

### Захист роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Яке явище вивчалось в цій роботі? Дайте його означення.
  2. Які хвилі називаються когерентними?
  3. Намалюйте схематично промені, які інтерферують при падінні монохроматичного світла на опуклу поверхню лінзи малої кривизни, яка є дотичною до плоскої поверхні добре відполірованої пластинки. Запишіть формулу оптичної різниці ходу цих променів.
  4. Сформулюйте умови виникнення інтерференційних максимумів і мінімумів.
  5. Порівняйте отримане експериментальне значення довжини хвилі з табличним значенням та зробіть висновок.
- Під час захисту роботи **необхідно** вміти вивести формулу для розрахунку радіуса темного кільця (4).

### Рекомендовані джерела

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 9  
«ВИЗНАЧЕННЯ РАДІУСА КРИВИЗНИ ЛІНЗИ ТА ДОВЖИНИ  
СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

**Вправа 1**

Довжина хвилі червоного світлофільтра  $\lambda =$  \_\_\_\_\_ нм

| №<br>з/п | Номер<br>кільця | $N_1$ | $N_2$ | $d, м$ | $R, м$ |
|----------|-----------------|-------|-------|--------|--------|
| 1        |                 |       |       |        |        |
| 2        |                 |       |       |        |        |
| 3        |                 |       |       |        |        |
| 4        |                 |       |       |        |        |
| 5        |                 |       |       |        |        |
| середнє  |                 |       |       |        |        |

**Вправа 2**

Колір світлофільтра \_\_\_\_\_.

| №<br>з/п | Номер<br>кільця | $N_1$ | $N_2$ | $d, м$ | $\lambda, нм$ |
|----------|-----------------|-------|-------|--------|---------------|
| 1        |                 |       |       |        |               |
| 2        |                 |       |       |        |               |
| 3        |                 |       |       |        |               |
| 4        |                 |       |       |        |               |
| 5        |                 |       |       |        |               |
| середнє  |                 |       |       |        |               |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 10

### Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання за допомогою дифракційної ґратки на оптичній лаві

**Мета роботи:** ознайомитися з явищем дифракції на дифракційній ґратці, визначити довжину хвилі лазерного випромінювання, визначити період дифракційної ґратки.

**Прилади та приладдя:** оптична лава, гелій-неоновий лазер, екран, дифракційні ґратки різних періодів, тримач екрану, тримач для дифракційної ґратки.

#### Загальні положення

*Дифракція* – огинання світлом перешкод, розміри яких є співрозмірними із довжиною хвилі. Явище дифракції можна спостерігати за допомогою дифракційної ґратки.

*Дифракційна ґратка* являє систему паралельних щілин однакової ширини, які лежать в одній площині та розділені однаковими за шириною непрозорими проміжками.

Реальні ґратки являють собою періодичні структури, які вигравіюються спеціальною ділильною машиною на поверхні скляної або металевої пластинки. У хороших ґраток паралельні штрихи мають довжину близько 10 см, а на кожен міліметр припадає до 2 000 штрихів. Водночас загальна довжина ґратки досягає  $10 \div 15$  см. Виготовлення таких ґраток вимагає застосування високих технологій.

Основним параметром ґратки є відстань між серединами сусідніх щілин, яку називають *періодом  $d$  дифракційної ґратки (або сталою ґратки)*:

$$d = a + b, \quad (1)$$

де  $b$  – ширина щілини,  $a$  – розмір перешкоди.

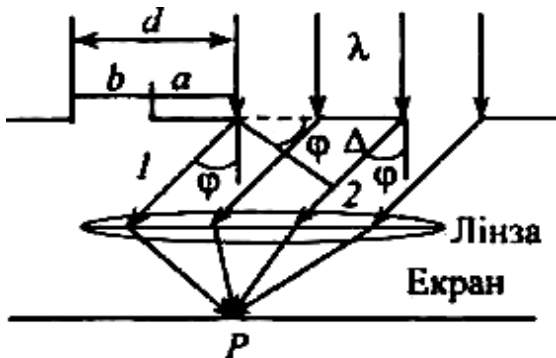


Рис. 1. Дифракція Фраунгофера на дифракційній ґратці

На ґратку спрямовується *паралельний пучок* світла, що досліджується. Спостереження проводиться у фокальній площині лінзи, яка встановлена за ґраткою.

Нехай світлова хвиля падає на ґратку нормально (тобто перпендикулярно до її поверхні). З кожної щілини виходять промені в усіх напрямках. У кожній точці  $P$  на екрані у фокальній площині лінзи зберуться промені, які до лінзи були паралельні між собою і поширювалися під певним кутом  $\varphi$

до напрямку падаючої хвилі (рис. 1).

Кут  $\varphi$  називається *кутом дифракції*. Коливання в точці  $P$  є результатом інтерференції вторинних хвиль, які приходять у цю точку від різних щілин. Для

того, щоб у точці  $P$  спостерігався інтерференційний максимум, оптична різниця ходу (різниця оптичних шляхів)  $\Delta$  між променями 1 та 2, які випущені сусідніми щілинами, має дорівнювати цілому числу довжин хвиль:

$$\Delta = m\lambda, \quad (2)$$

де  $\Delta$  – оптична різниця ходу променів;  $\lambda$  – довжини хвилі;  $m = 1, 2, 3 \dots$  – ціле число (номер максимуму).

З прямокутного трикутника можна знайти різницю ходу променів від відповідних точок сусідніх щілин:

$$\Delta = d \sin \varphi. \quad (3)$$

Промені, які дифрагують від інших відповідних точок сусідніх щілин матимуть таку ж різницю ходу в тому ж напрямку. Інші пари щілин можна розглянути аналогічним шляхом.

Прирівнюючи вирази (2) та (3), отримаємо:

$$d \sin \varphi = m\lambda. \quad (4)$$

Умова (4) визначає положення *головних максимумів* та є основною формулою дифракційної ґратки. Число  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  – порядок (номер) дифракційного максимуму.

Дифракційну картину отримують на екрані, який розміщують у фокальній площині збиральної лінзи (рис. 2). Дифракційна картина матиме вигляд вузьких світлих полос, які розділені темними проміжками. Центральний максимум ( $m = 0$ ). має найбільшу інтенсивність. Усі інші максимуми розміщуються симетрично відносно центрального максимуму (праворуч і ліворуч). При віддаленні від центру їх інтенсивність зменшується. Знаючи період ґратки  $d$ , кут дифракції  $\varphi$  та порядковий номер  $m$  максимуму, можна з рівняння (4) знайти довжину хвилі:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{m}. \quad (5)$$

### **Методика експерименту та опис експериментальної установки**

Лазерне випромінювання є монохроматичним. На екрані, який встановлений за дифракційною ґраткою, можна спостерігати декілька дифракційних максимумів.

Найбільш яскравий центральний максимум відповідає нульовому порядку ( $m = 0$ ). Його утворюють промені, кут дифракції  $\varphi$  для яких дорівнює нулю. Інші максимуми розміщені праворуч на відстанях  $l'_1, l'_2, l'_3$  та ліворуч на відстанях  $l''_1, l''_2, l''_3$  від центрального максимуму (рис. 3). Кут дифракції можна визначити, вимірюючи відстані  $L$  та  $l$ . Оскільки кут  $\varphi$  малий, то:

$$\sin \varphi \approx \tan \varphi \approx \frac{l}{L}. \quad (6)$$

Виконуючи заміну в (5), отримаємо формулу для розрахунку довжини хвилі:

$$\lambda = \frac{ld}{mL}. \quad (7)$$

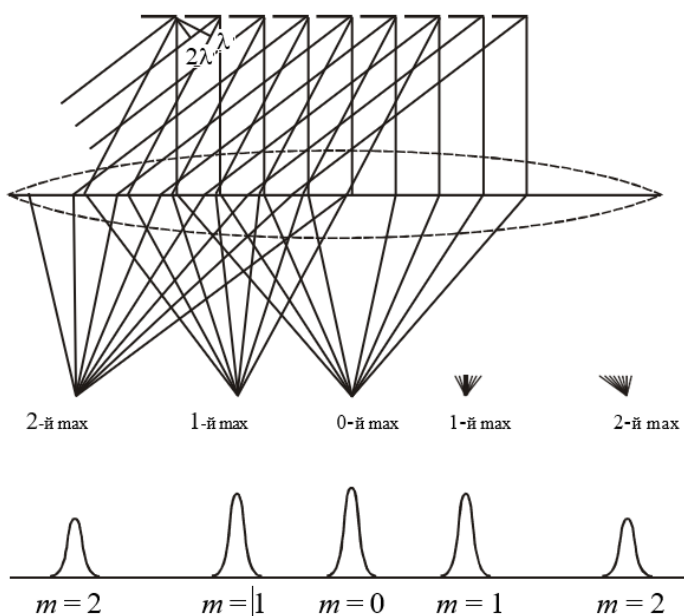


Рис. 2. Дифракційні максимуми

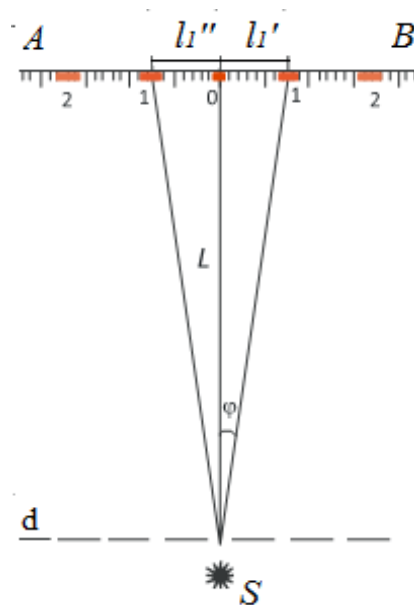


Рис. 3. Визначення куту дифракції

### Порядок виконання роботи

**Вправа 1.** Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання

1. Увімкніть лазер перемикачем «СЕТЬ» із дозволу викладача.
2. Запишіть значення постійної ґратки  $d$  (на ґратці вказана кількість штрихів на один міліметр) у протокол вимірювань.
3. Установіть дифракційну ґратку у тримач, який знаходиться між лазером та екраном. Ґратка має бути розташованою перпендикулярно до лазерного променя.
4. Отримайте на екрані чітку дифракційну картину. Відстань між екраном та ґраткою має бути такою, щоб на екрані помістилось не менше трьох максимумів з кожної сторони від центру картини.
5. Виміряйте відстань  $L$  між екраном та ґраткою.
6. Виміряйте відстані  $l'$  і  $l''$  для кожного максимуму.
7. Змініть відстань  $L$ , пересуваючи тримач з ґраткою. Повторіть вимірювання згідно з п. 5, 6.
8. Визначте середнє значення  $l$  для кожного максимуму за формулою:

$$l = \frac{l' + l''}{2}.$$

9. Розрахуйте довжину хвилі  $\lambda$  лазерного випромінювання для кожного максимуму за формулою (7).

10. Знайдіть середнє значення довжини хвилі  $\lambda_{\text{ср}}$ .

11. Розрахуйте абсолютну похибку у такий же спосіб, як і для прямих вимірювань.

12. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат запишіть у вигляді:

$$\lambda = \lambda_{\text{ср}} \pm \Delta\lambda.$$

**Вправа 2.** Визначення невідомого періоду дифракційної ґратки

1. Встановіть дифракційну ґратку з невідомим періодом у тримач.

2. Виконайте вимірювання згідно з п. 4–8 із даною ґраткою.

3. Розрахуйте невідомий період  $d$  дифракційної ґратки для кожного максимуму, застосовуючи формулу (7). Довжину хвилі  $\lambda$  лазерного випромінювання взяти з *Вправи 1*.

4. Знайдіть середнє значення періоду дифракційної ґратки  $d_{\text{ср}}$ . Розрахуйте абсолютну похибку як для прямих вимірювань.

5. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат запишіть у вигляді:

$$d = d_{\text{ср}} \pm \Delta d.$$

## Контрольні питання та завдання

### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Сформулюйте мету роботи. Про який саме тип дифракції йдеться в роботі?
2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується довжина хвилі. Поясніть усі позначення.

### Захист роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Що таке дифракція світла? Яка його фізична природа? Який тип дифракції вивчається у цій роботі?
2. Намалюйте хід променів через дифракційну ґратку. Вкажіть на рисунку період ґратки, кут дифракції, оптичну різницю ходу променів. Запишіть умову, за якої спостерігатимуться головні максимуми.
3. Який вигляд матиме дифракційна картина, якщо ґратку освітлювати білим світлом?

4. Порівняйте отримане експериментальне значення довжини хвилі з табличним значенням, зробіть висновок.

**Під час захисту роботи необхідно вміти вивести робочу формулу (7).**

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011.

## ПРОТОКОЛ

вимірювань до лабораторної роботи № 10

### «ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ ҐРАТКИ НА ОПТИЧНІЙ ЛАВІ»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

#### **Вправа 1**

Період дифракційної ґратки  $d =$  \_\_\_\_\_ м

| № з/п   | Номер $m$ максимуму | $L, м$ | $l', м$ | $l'', м$ | $l, м$ | $\lambda, нм$ |
|---------|---------------------|--------|---------|----------|--------|---------------|
| 1       |                     |        |         |          |        |               |
| 2       |                     |        |         |          |        |               |
| 3       |                     |        |         |          |        |               |
| 4       |                     |        |         |          |        |               |
| 5       |                     |        |         |          |        |               |
| 6       |                     |        |         |          |        |               |
| Середнє |                     |        |         |          |        |               |

#### **Вправа 2**

| №<br>з/п | Номер $m$<br>максимуму | $L, м$ | $l', м$ | $l'', м$ | $l, м$ | $d, м$ |
|----------|------------------------|--------|---------|----------|--------|--------|
| 1        |                        |        |         |          |        |        |
| 2        |                        |        |         |          |        |        |
| 3        |                        |        |         |          |        |        |
| 4        |                        |        |         |          |        |        |
| 5        |                        |        |         |          |        |        |
| 6        |                        |        |         |          |        |        |
| Середнє  |                        |        |         |          |        |        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 11

### Отримання і дослідження поляризованого світла

**Мета роботи:** вивчити способи отримання поляризованого світла, перевірити закон Малюса, визначити показник заломлення діелектрика.

**Прилади і приладдя:** оптична лава, лампа розжарювання, регульоване джерело напруги, поляроїди, чорне дзеркало, фотореєструвальний пристрій.

#### Загальні положення

Електромагнітні хвилі є поперечними. Це означає, що вектор напруженості електричного поля  $\vec{E}$  та вектор напруженості магнітного поля  $\vec{H}$  ( $\vec{E} \perp \vec{H}$ ) коливаються в площинах, перпендикулярних до напрямку поширення хвилі, рис. 1.

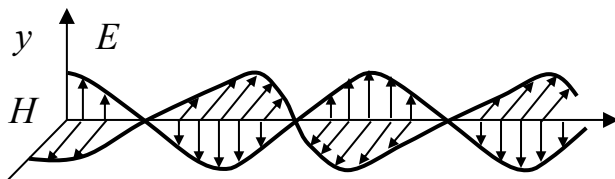


Рис. 1. Поперечна електромагнітна хвиля

Якщо всі напрямки коливань світлового вектора (вектори напруженості електричного поля  $\vec{E}$ ) у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, рівно ймовірні, то світло називається *неполяризованим*

або *природним*. Світло називається *поляризованим*, якщо напрямки коливань світлового вектора у якийсь спосіб упорядковані.

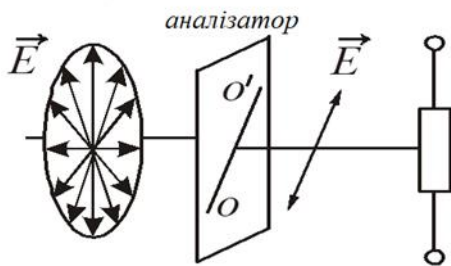


Рис. 2. Аналізатор поляризованого світла

Світло, в якому коливання світлового вектора відбуваються лише в одній площині, називається *лінійно поляризованим*. Поляризуватися можуть лише поперечні хвилі.

Для того, щоб визначити, поляризоване світло чи ні, використовують прилади, які пропускають світло лише з певним напрямком вектора  $\vec{E}$  (рис. 2). Залежно від призначення їх називають поляризаторами чи аналізаторами. Якщо світло неполяризоване, то під час повороту аналізатора навколо горизонтальної осі інтенсивність світла, що сприймається фотоприймачем, завжди та сама.

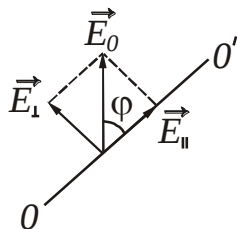


Рис. 3. Розклад поляризованого світла на компоненти

Для лінійно поляризованого світла виконується закон Малюса. Нехай коливання електричного вектора відбуваються у вертикальній площині та амплітуда коливань дорівнює  $E_0$  (рис. 3). Якщо вісь аналізатора  $OO'$  повернена на кут  $\phi$  по відношенню до напрямку поляризації, то до фотоприймача пройде світло з амплітудою (рис. 3):

$$E_{\parallel} = E_0 \cos \phi.$$

Інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди, тому:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

$I_0$  – інтенсивність поляризованого світла, що падає на аналізатор;

$I$  – інтенсивність світла, що вийшло з аналізатора;

$\varphi$  – кут між площиною поляризації променя та площиною пропускання аналізатора (простіше кажучи, це кут між площинами поляризації поляризатора і аналізатора).

Співвідношення (1) називається законом Малюса.

Одним зі способів отримання поляризованого світла є відбиття від межі розділу двох діелектриків.

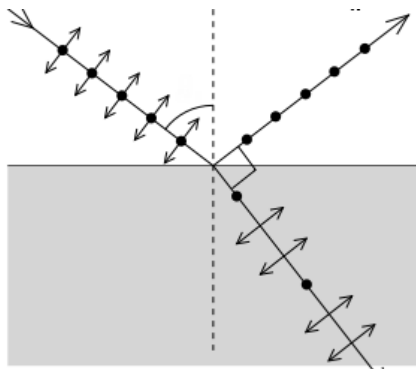


Рис. 4. Відбиття світла від межі двох діелектриків під кутом Брюстера

Світлові промені, проходячи через межу розділу двох середовищ із різними показниками заломлення  $n_1$  і  $n_2$ , зазнають відбивання та заломлення. Відбитий і заломлений промені завжди виявляються частково поляризованими. У відбитому світлі коливання відбуваються переважно перпендикулярно до площини падіння променя, у заломленому – у площині падіння. Ступінь поляризації залежить від кута падіння. За умови, що кут падіння

задовольняє рівняння:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (2)$$

відбитий промінь буде повністю поляризованим. Ступінь поляризації заломленого променя за умови, що кут падіння дорівнює  $\alpha_{\text{Бр}}$ , буде максимальний, проте цей промінь є частково поляризованим.

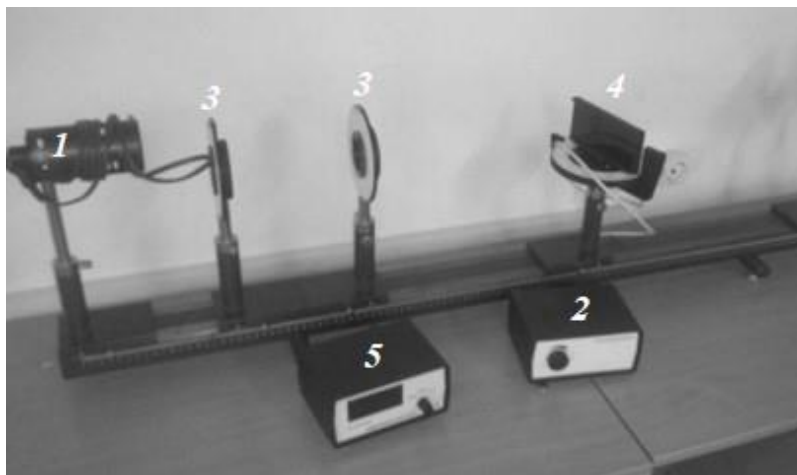
Співвідношення (2) називається *законом Брюстера*, а кут  $\alpha_{\text{Бр}}$  – кутом Брюстера або кутом повної поляризації. Якщо світло падає на межу розділу під кутом Брюстера, то відбитий та заломлений промені взаємно перпендикулярні.

### Методика експерименту та опис експериментальної установки

Установку збирають на оптичній лаві (рис. 5). На одному кінці лави розміщують джерело світла (лампу розжарювання), що підключається до регульованого джерела напруги, яке дає змогу плавно змінювати яскравість джерела світла.

В якості поляризатора використовують поляроїд, укладений в оправу з лімбом для відліку кута повороту поляроїда навколо горизонтальної осі.

В якості аналізатора у різних вправах використовують такий самий поляроїд або чорне дзеркало.



*Рис. 5. Вигляд лабораторної установки для вивчення поляризації світла*

1 – джерело світла (лампа розжарювання);

2 – регульоване джерело напруги;

3 – поляроїди;

4 – чорне дзеркало;

5 – фотореєструючий пристрій.

Чорне дзеркало укріплене на зовнішній частині горизонтального столу, яка може обертатися навколо вертикальної осі та нерухомої центральної

частини столу. Поворот здійснюють за допомогою рифленого кільця на бічній поверхні столу. Центральна частина столу встановлена на стійці рейтера і може бути закріплена в ньому за допомогою гвинта. Для вимірювання інтенсивності відбитого від чорного дзеркала світла використовується фоторезистор, який незалежно від столу також може обертатися навколо вертикальної осі. Кут повороту чорного дзеркала та фоторезистора відраховуються за допомогою лімба столу з ціною поділки шкали  $1^\circ$ .

Для вимірювання інтенсивності світла, що пройшло крізь поляроїди, використовується фоторезистор, укріплений на окремому рейтері.

Фоторезистор, що використовується в процесі вимірювання, підключають до фотореєструючого пристрою, який з'єднаний з шунтами для перемикання діапазону вимірювань струму.

### **Порядок виконання роботи**

#### ***Вправа 1.* Перевірка закону Малюса**

1. Встановіть на оптичній лаві прилади в наступній послідовності: джерело світла, два рейтери з поляроїдами і рейтери з фоторезистором. Перший поляроїд є поляризатором, другий – аналізатором.

2. Зсуньте прилади до мінімально можливої відстані між ними та відрегулюйте їх по висоті так, щоб центри вихідного вікна освітлювача, поляроїдів та тубуса фоторезистора розташовувалися на одній горизонтальній прямій, паралельній

оптичній лаві. Площини вихідного вікна освітлювача, поляроїдів та фоторезистора повинні бути перпендикулярні до оптичної лави. Збільшіть відстань між освітлювачем та фоторезистором до 80–100 см. Поляроїди встановіть між ними довільно. Стрілки на оправі аналізатора встановіть на нуль кругової шкали.

3. Підключіть джерело світла до регулятора напруги, а фоторезистор до фотореєструвального пристрою. Регулятор напруги і фотореєструючий пристрій приєднайте до мережі з напругою 220 В.

4. Увімкніть джерело світла, натиснувши кнопку «СЕТЬ» на панелі регулятора напруги з дозволу викладача. Повертаючи ручку на панелі приладу, відрегулюйте яскравість джерела.

5. Увімкніть у вимірювальний ланцюг фоторезистора натисканням кнопки «СЕТЬ» на панелі фотореєструвального пристрою. Масштаб шкали фотореєструвального пристрою встановлюють поворотом ручки перемикання діапазонів панелі. У процесі вимірювання слідкуйте, щоб показання приладу не виходили за межі встановленого діапазону. У разі перевантаження спалахує світлодіод «ПЕРЕГРУЗКА».

6. Обертаючи поляризатор, намагайтеся отримати максимальну величину інтенсивності світла, що пройшло крізь обидва поляроїди. Цьому відповідає максимальна величина фотоструму  $i_{\max}$ , що вимірюється фотореєструвальним пристроєм.

7. Встановіть шкалу фотореєструвального пристрою так, щоб за максимального значення фотоструму  $i_{\max}$  показання приладу знаходилися в межах встановленого діапазону. Якщо необхідно, знову відрегулюйте яскравість джерела світла і пересувайте фоторезистор уздовж оптичної лави.

8. Обертаючи аналізатор навколо осі, зафіксуйте показання фотоструму через кожні  $10^\circ$  для всіх кутів від  $0$  до  $360^\circ$  у протокол вимірювань.

9. Побудуйте графік залежності сили струму від кута повороту аналізатора  $i = f(\alpha)$ .

**Вправа 2.** Дослідження відбиття поляризованого та природнього світла від межі діелектрика. Визначення показника заломлення діелектрика за допомогою кута Брюстера

Природнє світло, що падає під кутом Брюстера на діелектрик, після відбиття стає лінійно поляризованим перпендикулярно площині падіння. Під час падіння під кутом Брюстера на діелектрик лінійно поляризованого в площині падіння світла, інтенсивність відбитої хвилі має дорівнювати нулю. Для визначення кута Брюстера необхідно зробити таке:

1. На оптичній лаві встановіть освітлювач, поляроїд та чорне дзеркало.
2. Підключіть фоторезистор чорного дзеркала до фотореєструвального пристрою.

3. Увімкніть у мережу джерело світла і фотореєструвальний пристрій натисканням кнопок «СЕТЬ» на панелі приладів з дозволу викладача.

4. Звільнивши затискний гвинт на стійці рейтера зі столиком і чорним дзеркалом, поверніть столик так, щоб мітка на центральній частині столика вказувала напрямок падаючого променя. Встановіть столик у такий спосіб, зафіксуйте його положення затискним гвинтом на стійці рейтера. Якщо поєднати нуль на лімбі з міткою на столику, падіння променя на чорне дзеркало буде нормальним (перпендикулярним).

5. Поворотом навколо вертикальної осі встановіть чорне дзеркало так, щоб промінь світла ковзав уздовж чорного дзеркала, водночас кут падіння променя на дзеркало дорівнює буде дорівнювати  $90^\circ$ . Поверніть кронштейн з фоторезистором і встановіть його так, щоб промінь, що ковзає вздовж чорного дзеркала, потрапляв на фоторезистор. Водночас показник фотопристрою буде максимальним і не залежатиме від кута повороту поляроїда.

6. Встановіть чорне дзеркало так, щоб падаючий на нього промінь світла становив кут  $\varphi = 80^\circ$  з нормаллю до його поверхні. Водночас поділ лімба, що дорівнює  $80^\circ$ , має знаходитися напроти мітки на столику. Поверніть кронштейн з фоторезистором і встановіть його так, щоб показчик на кронштейні фоторезистора знаходився напроти поділки лімба, що відповідає куту  $\varphi = 80^\circ$  по інший бік від  $0^\circ$  (кут відбиття дорівнює куту падіння).

7. Обертаючи поляроїд навколо горизонтальної осі і стежачи за показниками фотореєструвального пристрою, досягніть мінімального значення фотоструму. Мінімум фотоструму вказує на те, що напрямок коливань вектора  $\vec{E}$  в промені, який падає, лежить у площині падіння. Запишіть величину фотоструму  $i$ .

8. Визначте величину фотоструму для кутів падіння в інтервалі від  $80^\circ$  до  $5^\circ$  через кожні  $5^\circ$ . Після закінчення вимірювань вимкніть освітлювач та фотореєструвальний пристрій.

9. Побудуйте графік залежності  $i(\varphi)$ , його мінімум надасть значення кута Брюстера.

10. Визначте за формулою (2) показник заломлення матеріалу  $n$ , з якого виготовлено дзеркало.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Які пристрої використовуються в якості аналізатора у різних вправах?
3. Які величини в роботі вимірюються безпосередньо?

4. Які закономірності досліджуються в даній роботі?
5. Які графіки необхідно побудувати за результатами експерименту?

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. У чому полягає явище поляризації? Яким типам хвиль, поперечним або поздовжнім, притаманне це явище? Чим відрізняється поляризоване світло від природного?
2. Сформулюйте закон Малюса. Запишіть формулу для нього.
3. Сформулюйте закон Брюстера. Запишіть формулу для нього.
4. Який висновок можна зробити з отриманого графіка  $i = f(\alpha)$ ?

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (електрика, магнетизм, оптика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: Комп'ютерні науки, Кібербезпека, Фізика та астрономія, Середня освіта (фізика), Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2020.
2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 11  
«ОТРИМАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

**Вправа 1**

|                 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $\alpha^\circ$  | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| $i, \text{мкА}$ |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

|                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\alpha^\circ$  | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| $i, \text{мкА}$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

|                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\alpha^\circ$  | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 |
| $i, \text{мкА}$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

|                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\alpha^\circ$  | 280 | 290 | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 360 |
| $i, \text{мкА}$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

**Вправа 2**

|                 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $\varphi^\circ$ | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 |
| $i, \text{мкА}$ |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 12

### Визначення фокусних відстаней тонких лінз

**Мета роботи:** ознайомлення з методами вимірювання фокусних відстаней тонких лінз.

**Приладдя:** Оптична лава (довжиною  $l = 1.2$  м з міліметровою шкалою), рейтери, освітлювач з джерелом живлення ПП-1, сітка (матове скло зі шкалою), екран зі шкалою, лінзи в оправках, тримачі лінз.

### Теоретична частина

Одним з основних понять в оптиці є поняття оптичного променя як прямої лінії, яка бере свій початок від джерела світла, вона вважається нескінченно тонкою, а довжина хвилі – нескінченно малою. Розрахунок ходу променів через межу різних середовищ здійснюється за законами геометрії з урахуванням законів заломлення і відбиття оптичних променів, звідси і назва «*геометрична оптика*», в цьому випадку немає необхідності знання природи світла.

У геометричній оптиці вивчаються ідеальні оптичні системи, для яких виконані дві умови: 1) гомоцентричність, тобто будь-який світловий пучок, що виходить з однієї точки, знову збирається в точку після проходження системи; 2) зображення, отримане системою, геометрично подібне предмету, тобто немає спотворень форми предмета. Однак у дійсності спотворення форми предмета існують, для їх пояснення і усунення необхідно враховувати природу світла. Ця частина оптики, де виникає необхідність врахування природи світла як електромагнітних хвиль, отримала назву фізичної оптики з її законами (закони Бугера, Планка, Стефана–Больцмана, Віна та інших) і явищами (інтерференція, дифракція, поляризація, дисперсія  $\lambda(n)$  і т. ін.).

### Основні закони геометричної оптики

Експериментально були встановлені такі закони *геометричної оптики*:

- в однорідному середовищі світловий промінь поширюється прямолінійно;
- закон оборотності ходу променів – промінь, спрямований у зворотному напрямку, проходить по тому ж шляху, що і прямий промінь;
- незалежність світлових променів;
- закон заломлення променя під час перетину межі двох середовищ з показниками заломлення  $n_1$  і  $n_2$ : падаючий і заломлений промені лежать в одній площині з перпендикуляром, встановленим до межі поділу в точці падіння променя, а кут падіння  $\varphi_1$  і заломлення  $\varphi_2$  задовольняють рівняння  $\sin \varphi_1 \cdot n_1 = \sin \varphi_2 \cdot n_2$ , де кути відраховуються від перпендикуляра;
- закон відбиття світла – падаючий і відбитий промені лежать в одній площині, а кут падіння дорівнює куту відбиття.

Лінзи використовуються для отримання зображення предмета, зміни напрямку ходу променя для концентрації енергії випромінювання. Нагадаємо основні характеристики тонких (ідеальних) збиральних лінз.

Лінія, яка проходить через центри кривини поверхонь лінзи, називається головною *оптичною віссю*, а точка перетину *оптичної осі* з лінзою називається *оптичним центром* лінзи. Промені, які проходять через оптичний центр, не заломлюються. Промені, паралельні оптичній осі, перетинаються в одній точці на оптичній осі двоопуклої лінзи, ця точка називається *фокусом* лінзи, а відстань між *фокусом* і *оптичним центром* називається *фокусною відстанню*, вона традиційно позначається літерою  $f$ . Промені, що поширюються під кутом до оптичної осі, перетинаються в точці, яка *лежить у фокальній площині*. Ця площина проходить через фокус і перпендикулярна оптичній осі. Промінь «С», який проходить через оптичний центр лінзи, паралельний падаючому променю «М», називається *побічним променем*. Він використовується для визначення ходу променів, що падають під кутом до оптичної осі. *Тонкою лінзою* називається лінза, у якій відстань між поверхнями, які обмежують її, є значно меншою за фокусну відстань  $f$ .

Розглянемо будову деяких найпростіших оптичних приладів, в яких використані лінзи.

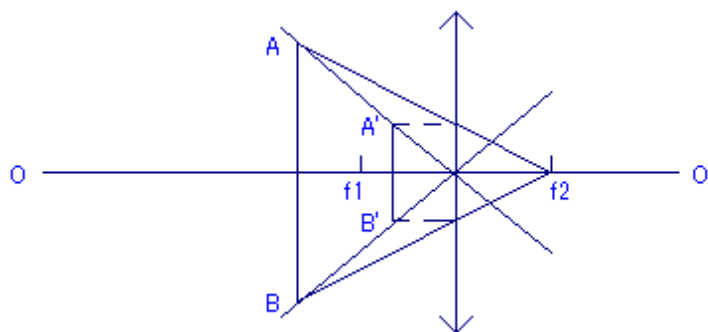


Рис. 1. Хід променів у лупі

1. **Лупа** (рис. 1) – збираюча лінза з короткою фокусною відстанню, яка використовується для зображення предмета прямим і збільшеним. Збільшення лупи  $\gamma$  дорівнює відношенню розмірів зображення  $AB$  і предмета  $A'B'$ , що приблизно дорівнює відношенню відстані найкращого зору  $L$  до фокусної відстані лінзи  $f$ .

$$\gamma = \frac{AB}{A'B'} \approx \frac{L}{f},$$

де  $L \approx 25$  см, за умови  $f = 1,2 \dots 5$  см збільшення лінзи буде  $\gamma \approx 20 \dots 4$ .

2. **Зорова труба Кеплера** (рис. 2) – це оптична система, що складається з двох збираючих лінз – об'єктива  $L_1$  і окуляра  $L_2$ . Зазвичай (під час спостереження нескінченно віддалених предметів) зорова труба налаштовується так, щоб задній

фокус об'єктива збігався з переднім фокусом окуляра. У цьому випадку будь-який паралельний пучок, що входить в об'єktiv, вийде з окуляра також у вигляді паралельного пучка. Така оптична система називається телескопічною. Збільшенням  $\gamma$  зорової труби Кеплера називають відношення, яке дорівнює:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (1)$$

де  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  – кути, утворені паралельним пучком, який входить і виходить паралельним пучком з головною оптичною віссю (рис. 2). Пропонується самостійно показати, що:

$$\gamma = \frac{f_1}{f_2}, \quad (2)$$

де  $f_1$  і  $f_2$  – фокусні відстані об'єктива і окуляра. Видно, що для великого збільшення потрібно, щоб об'єktiv був довгофокусним, а окуляр – короткофокусним. Із рис. 2 видно, що в зоровій трубці Кеплера зображення буде *перевернутим*.

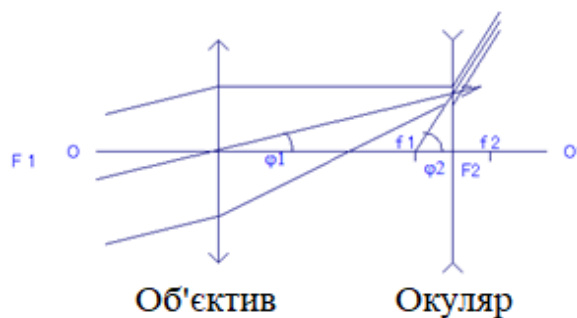
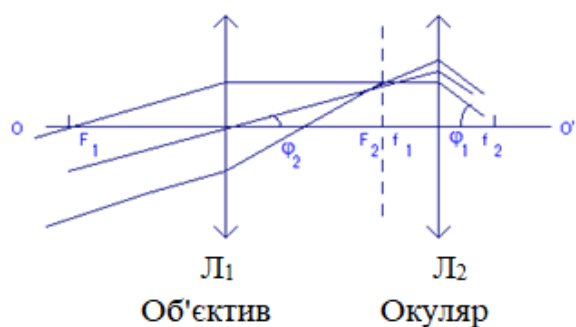


Рис. 2. Хід променів у зоровій трубці Кеплера      Рис. 3. Хід променів у зоровій трубці Галілея

**3. Зорова труба Галілея** (рис. 3) – це оптична система, у якій окуляр є розсіювальною лінзою. Якщо фокуси об'єктива і окуляра збігаються, то труба Галілея також є телескопічною.

Збільшення зорової труби Галілея таке ж саме, як і труби Кеплера. На відміну від труби Кеплера, у трубці Галілея:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{A'B'}{O_2F_2},$$

де  $O_2F_2$  – фокусна відстань окуляра.

Можна показати, що:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{AB \cdot F_2 O_1}{F_2 O_2 \cdot B O_1}. \quad (3)$$

4. **Мікроскоп.** Збільшенням мікроскопа називають відношення  $\gamma = \frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1}$ , де  $\varphi_1$  – кут, під яким предмет  $AB$  видно неозброєним оком з відстані найкращого зору ( $L = 25$  см). Тоді  $\tan \varphi_1 = \frac{AB}{L}$ .

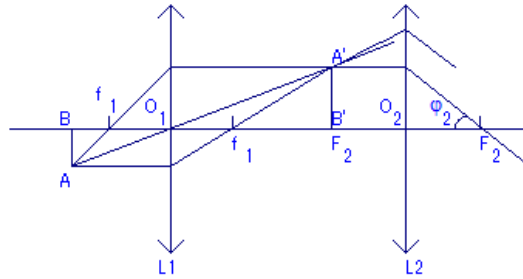


Рис. 4. Хід променів у мікроскопі

Якщо ввести довжину тубуса мікроскопа як відстань  $\ell$  між об'єктивом і окуляром  $\ell = O_1O_2 = O_1F_2 + O_2F_2$ , то використовуючи формулу лінзи:

$$\frac{1}{O_1B} + \frac{1}{O_1F_2} = \frac{1}{f'}$$

отримаємо такий вираз для коефіцієнта збільшення:

$$\gamma = \frac{L(\ell - f_1 - F_2)}{f_1 F_2}. \quad (4)$$

У цьому наближенні враховано, що обидві лінзи – короткофокусні.

### Хід роботи

**Центрування лінз.** Перед виконанням вправ необхідно центрувати систему. Мета центрування – розташувати оптичні елементи (джерело світла, лінзи, екран) по висоті так, щоб пучок світла від освітлювача зміг пройти всі лінзи і досягти екрана. Центрування починають з того, що рейтер з екраном присувають впритул до віконця освітлювача і регулюють висоту екрана так, щоб центр світлової плями збігався з центром екрана. Після цього відсувають екран на відстань приблизно 1 м, і між ним і освітлювачем поміщають збиральну лінзу, яка досліджується. Пересуваючи рейтер з лінзою, отримують на екрані зображення сітки освітлювача. Після цього регулюють висоту лінзи так, щоб центр зображення сітки збігався з центром екрана. Описаним способом необхідно від'юстувати всі збиральні лінзи, які використовуються в роботі. Для юстування негативних лінз, встановлюють рейтер із вже від'юстованою позитивною лінзою, рейтер з негативною лінзою поміщають між екраном і позитивною лінзою. Переміщаючи їх уздовж оптичної лави, намагаються отримати зображення на екрані сітки освітлювача. Після цього регулюють висоту негативної лінзи.

### **Вправа 1.** Визначення фокусної відстані збиральної лінзи

1. Для визначення фокусної відстані збиральної лінзи встановіть прилади на оптичній лаві згідно з рис. 5. Предметом служить **сітка** на матовому склі освітлювача.

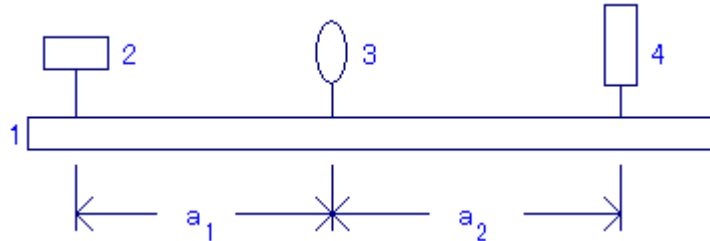


Рис. 5. Розташування оптичних елементів

2. Переміщуючи екран, отримайте чітке зображення предмета на ньому. Виміряти відстані  $a_1$  і  $a_2$  за допомогою лінійки на оптичній лаві.

3. Повторіть вимірювання п'ять разів, змінюючи відстань  $a_1$ . Рекомендується отримувати як збільшені, так і зменшені зображення на екрані.

4. Підставте знайдені значення  $a_1$  і  $a_2$  у формулу лінзи  $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}$  і розрахуйте фокусну відстань лінзи.

5. Знайдіть середнє значення фокусної відстані лінзи  $\bar{f}$ .

6. Розрахуйте похибку як для прямих вимірювань.

7. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат запишіть у вигляді:

$$f = \bar{f} \pm \sigma_f.$$

### **Вправа 2.** Визначення фокусної відстані збиральної лінзи за методом Бесселя

Оптична схема визначення фокусної відстані позитивної лінзи методом Бесселя показана на рис. 6.

1. Встановіть освітлювач і екран на протилежних кінцях оптичної лави.

2. Розташуйте лінзу на оптичній лаві так, щоб на екрані вийшло чітке *збільшене* зображення предмета. Предметом, як і раніше, служить **сітка** на матовому склі освітлювача ( $AB$ ).

3. Визначте положення лінзи  $X_1$  на лаві і виміряйте відстань  $D$  від сітки освітлювача до екрана.

4. Не змінюючи положення предмета і екрана, перемістіть лінзу ближче до екрану так, щоб на екрані вийшло чітке *зменшене* зображення предмета (сітка освітлювача). Визначте нове положення лінзи  $X_2$  і виміряйте відстань між цими двома положеннями лінзи  $X_1 - X_2 = b$ .

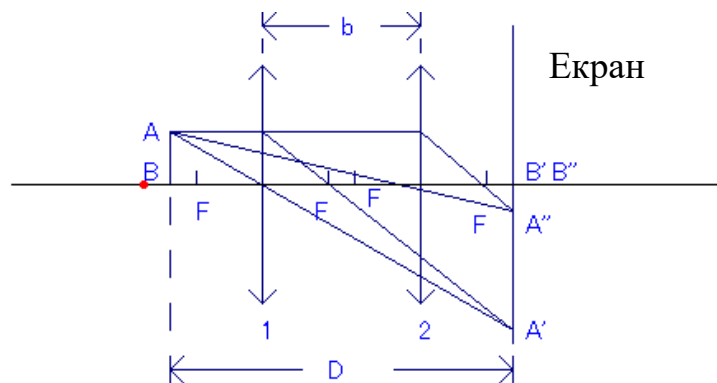


Рис. 6. Хід променів у схемі методу Бесселя

5. Повторіть вимірювання п'ять разів, змінюючи відстань між освітлювачем і екраном (водночас пам'ятаючи, що  $D > 4F$ ).

6. Розрахуйте фокусну відстань лінзи за формулою:  $F_i = \frac{D^2 - b_i^2}{4D}$ .

7. Знайдіть середнє значення фокусної відстані лінзи  $\bar{F}$ .

8. Розрахуйте похибку як для прямих вимірювань.

9. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат запишіть у вигляді  $F = \bar{F} \pm \sigma_F$ . Порівняйте отриманий результат з результатом, отриманим у Вправі 1.

## Контрольні питання та завдання

### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Які величини у роботі вимірюються безпосередньо?
3. Опишіть метод Бесселя для визначення фокусної відстані збиральної лінзи.
4. Запишіть формулу, за якою розраховується фокусна відстань лінзи  $f$  у кожній з вправ. Поясніть позначення.

### Захист роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Сформулюйте закони відбивання та заломлення світла.
2. Як побудувати зображення, яке дає тонка лінза (збиральна та розсіювальна)? Намалюйте хід променів. Запишіть формулу тонкої лінзи. Поясніть позначення.
3. Що називається збільшенням лінзи?
4. У чому перевага методу Бесселя для визначення фокусної відстані збиральної лінзи?

ПРОТОКОЛ  
Вимірювань до лабораторної роботи № 12  
«ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНИХ ВІДСТАНЕЙ ТОНКИХ ЛІНЗ»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

**Вправа 1**

| №<br>з/п | $a_1, м$ | $a_2, м$ | $f, м$ |
|----------|----------|----------|--------|
| 1        |          |          |        |
| 2        |          |          |        |
| 3        |          |          |        |
| 4        |          |          |        |
| 5        |          |          |        |

**Вправа 2**

| №<br>з/п | $D, м$ | $b, м$ | $f, м$ |
|----------|--------|--------|--------|
| 1        |        |        |        |
| 2        |        |        |        |
| 3        |        |        |        |
| 4        |        |        |        |
| 5        |        |        |        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

**ЗВІТ**  
з лабораторної роботи № \_\_\_\_\_

---

---

Виконав студент групи:

---

---

---

Викладач кафедри:

---

---

---

Відмітка про захист роботи:

---

Вінниця 202\_\_

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 «Фізика та астрономія», 014.08 «Середня освіта (фізика)», 122 «Комп'ютерні науки», 125 «Кібербезпека», 105 «Прикладна фізика та наноматеріали») / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко / за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (електрика, магнетизм, оптика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: Комп'ютерні науки, Кібербезпека, Фізика та астрономія, Середня освіта (фізика), Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2020. 131 с.
3. Русаков В. Ф. Молекулярна фізика: навчальний посібник. Вінниця: ТОВ «Твори», 2019. Частина 1. 68 с.
4. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с.
5. Русаков В. Ф. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
6. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
7. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
8. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
9. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 2: Електрика і магнетизм. Київ: Техніка, 2001. 452 с.
10. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
11. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.
12. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

## ДЛЯ НОТАТОК

---

## ДЛЯ НОТАТОК

---

Навчальне видання

*Рассохіна Юлія Валентинівна*  
*Пишкін Роман Олександрович*

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА»**

*Для здобувачів денної форми навчання  
спеціальностей 091 Біологія та біохімія, 101 Екологія, 102 Хімія*

Редактор О. А. Солдатова  
Технічний редактор Т. О. Важеніна-Гопрак

Підписано до друку 26.12.2023  
Формат 60×84/16. Папір офсетний.  
Друк – цифровий. Умовн. друк. арк. 4,65.  
Тираж 30. Зам. 102.

Донецький національний університет імені Василя Стуса  
21021, м. Вінниця, 600-річчя, 21  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру  
серія ДК № 5945 від 15.01.2018