

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ І ДИДАКТИКИ ФІЗИКИ

В. Ф. Русаков, В. Г. Пищюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко

**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»)

За загальною редакцією Русакова В. Ф.

Вінниця
ДонНУ
2019

УДК 539.1/.3(072)
М 545

*Рекомендовано до друку вченою радою фізико-технічного факультету Донецького національного університету імені Василя Стуса
(протокол № 2 від 24.09.2019 р.)*

- Укладачі:** *В. Ф. Русаков*, д-р фіз.-мат. наук, проф., завідувач кафедри загальної фізики і дидактики фізики ДонНУ імені Василя Стуса.
В. Г. Пицюга, канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри загальної фізики і дидактики фізики ДонНУ імені Василя Стуса.
Р. О. Пишкін, завідувач навчальної лабораторії механіки і молекулярної фізики кафедри загальної фізики і дидактики фізики ДонНУ імені Василя Стуса.
К. В. Демченко, завідувач навчальної лабораторії методики викладання фізики кафедри загальної фізики і дидактики фізики ДонНУ імені Василя Стуса.
- Рецензент:** *В. Г. Крижановський*, д-р техн. наук, проф., професор кафедри радіофізики та кібербезпеки ДонНУ імені Василя Стуса.

М 545 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. 104 с.

До методичних вказівок включені лабораторні роботи з механіки і молекулярної фізики, наведені основні теоретичні положення про досліджувані в роботах фізичні явища, формули фізичних законів, опис лабораторного обладнання, порядок виконання робіт, питання для контролю знань. Для зручності студентів наведені основні формули розрахунку похибок та необхідні фізичні константи. Частина матеріалу, згідно з вимогами Болонського процесу, запропонована для самостійного опрацювання.

УДК 539.1/.3(072)

© Русаков В. Ф., 2019
© Пицюга В. Г., 2019
© Пишкін Р. О., 2019
© Демченко К. В., 2019
© ДонНУ імені Василя Стуса, 2019

Загальні положення про оформлення лабораторних робіт та розрахунків похибок

Кожен студент повинен мати зошит, в якому записується назва лабораторної роботи, мета роботи, основні формули, фізичні величини, які безпосередньо вимірюються (таблиця) або розраховуються за формулами, відповіді на питання щодо допуску до виконання роботи і хід виконання роботи. Математичні розрахунки бажано виконувати з використанням комп'ютерних програм. **Звіт про виконання лабораторної роботи повинен бути виконаний на окремих аркушах і включати:**

- розрахунки середніх значень шуканих фізичних величин;
- розрахунки їхніх 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 σ_x залежать від інструментів або приладів, якими вимірюється фізична величина, способів і умов вимірювання. Систематичні похибки δ 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 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, а розраховується за відповідною формулою, тобто $V \in$

функцією декількох величин $V = f(\alpha, \ell, \omega)$, які безпосередньо вимірюються – α_i , ℓ_i , ω_i . У цьому випадку 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 вимірних величин σ_α , σ_ℓ , σ_ω 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 таким чином: $V = \bar{V} \pm \sigma_V$.

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 α у функції $R_i = R_0(1 + \alpha t_i)$). В такому випадку використовують метод найменших квадратів. Цей метод використовують тільки у тому випадку, 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 для магнітної сприйнятливості $\chi_i = \frac{C}{T_i - \theta}$ перетворюється в лінійну функцію таким чином: $\chi_i^{-1} = C^{-1}(T_i - \theta)$, де $k = C^{-1}$, $b = \theta C^{-1}$.

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 $\sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2 = \varphi$ була найменшою. Для цього необхідно, щоб $\frac{\partial \varphi}{\partial k} = 0$ і $\frac{\partial \varphi}{\partial b} = 0$, з цих двох рівнянь знаходять 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 σ_k , σ_b знайдених параметрів k і b прямої $y = kx + b$, необхідно зробити наступне: розрахувати $y_{ip} = kx_i + b$, використовуючи виміряні x_i та знайдені k і b , потім розрахувати величину φ_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 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 таким чином: якщо приладом вимірюється величина, наприклад, до *третього* знаку після коми, то після *кожної* арифметичної дії залишають *чотири* знаки після коми, а в кінцевому результаті 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.

Фізичні константи	
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2.99792458 \cdot 10^8$ м/с
Прискорення вільного падіння	$g = 9.80665$ м/с ²
Число Авогадро	$N_A = 6.022045 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
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	$R_\infty = 13,605693009(84)$ 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

Лабораторні роботи виконуються на обладнанні, виготовленому фірмою

<http://www.uchtech.com.ua>, м. Рівне.

МЕХАНІКА

Лабораторна робота № 1

Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою машини Атвуда

Мета роботи: експериментальна перевірка закону шляху при рівноприскореному русі і визначення прискорення вільного падіння.

Прилади й обладнання: машина Атвуда, вантажі з перевантаженнями.

Зміст роботи

Машина Атвуда (див. рис. 1.1.1) складається з укріпленого на штативі 1 блока 2, через який перекинута нитка з підвішеними на ній однаковими вантажами 3 і 4. Маса цих вантажів може бути збільшена додатковими невеликими вантажами (перевантаженнями) 5. Якщо на вантаж масою m покласти перевантаження з масою m_1 , то вся система почне рухатися рівноприскорено.

На вантажі 3 і 4 з перевантаженням m_1 5 впливатимуть дві сили: сила тяжіння і сила натягу нитки. В машині Атвуда маса блока (2) невелика, порівняно з m , сила тертя в блоці мала (розкручування блока практично не потребує зусиль), тому сили натягу нитки по обидва боки блока однакові. На підставі другого закону Ньютона для кожного з вантажів можна записати:

$$\begin{cases} (m + m_1)a = (m + m_1)g - T \\ -ma = mg - T \end{cases}, \quad (1)$$

де a – прискорення вантажів, T – натяг нитки, g – прискорення вільного падіння. Розв'язок цих рівнянь дає величину сили натягу нитки й величину прискорення вантажу:

$$T = \frac{gm(2m+2m_1)}{2m+m_1}, \quad (2)$$

$$a = g \frac{m_1}{2m+m_1}. \quad (3)$$

Звідси знайдемо прискорення вільного падіння

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

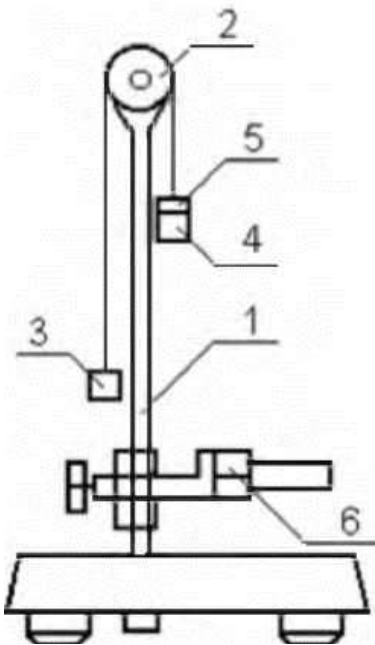


Рис. 1.1.1 – Машина Атвуда

Отже, для розрахунку прискорення вільного падіння необхідно спочатку визначити прискорення a рівноприскореного руху вантажу. Загальний вигляд експериментальної установки представлений на рис. 1.1.2.

Порядок виконання роботи

1. Перекинути через блок 2 нитку з двома вантажами 3 та 4 й перекона-тися, що система знаходиться у стані рівноваги
2. Встановити кронштейн з фотодатчиком 6 у нижній частині шкали вертикальної стійки, а фотодатчик розмістити таким чином, щоб вантаж під час



Рис. 1.1.2 – Загальний вигляд установки

руху униз проходив у центрі робочого вікна фотодатчика (за нижнє положення вантажу береться риска шкали, яка відповідає рисці на корпусі фотодатчика й являє собою ніби продовження оптичної осі фотодатчика, яку перетинає вантаж, що рухається униз). Вантаж ($m+m_1$) встановлюють у крайньому верхньому положенні так, щоб низ вантажу ($m+m_1$) співпадав з верхньою межею візира. Від цієї межі відраховується по лінійці на штативі 1 шлях S руху вантажу ($m+m_1$).

3. Увімкнути установку перемикачем (з дозволу викладача!).

4. Покласти одне з перевантажень на вантаж, який буде рухатися униз до перетину оптичної осі фотодатчика.

5. Натиснути на кнопку «ПУСК» блоку. Відбувається відпускання електромагніту, вантаж ($m+m_1$) починає опускатися, а таймер блоку починає відлік часу. При перетині вантажем ($m+m_1$) оптичної осі фотодатчика відлік часу припиниться. Записати показання таймера – час руху вантажів.

6. Визначити за шкалою лінійки шлях, пройдений вантажем, як відстань від нижньої площини вантажу (верхня межа візиру) до оптичної осі фотодатчика.

7. Повторити виміри 5 разів, змінюючи висоту вантажу 4 кожного разу на 2 см, таким чином будемо мати 5 значень S_i , t_i та a_i .

8. Знаючи пройдений шлях i час руху, визначаємо значення прискорення:

$$a_i = \frac{2S_i}{t_i^2}, \quad (5)$$

де S_i – шлях, пройдений вантажем, t_i – час руху вантажів.

Знайти середнє значення прискорення вантажів $a_{1експ.}$ та його похибку.

Повторити виміри за пп. 2–6 з іншим перевантаженням 5, записати виміряні значення S_i та t_i в таблицю для двох значень перевантажень m_1 . Розрахувати за формулою (5) a_i , знайти $\langle a \rangle$ та похибку σ_a . Порівняти $a_{1експ.}$ і $a_{2експ.}$ та зробити висновок.

9. Розрахувати прискорення вільного падіння для двох випадків:

- за формулою (4);

- за графіком залежності $S = f\left(\frac{t^2}{2}\right)$, використовуючи метод найменших квадратів як тангенс кута нахилу прямої (кутовий коефіцієнт прямої).

Знайти похибку прискорення вільного падіння σ_g . Порівняти знайдені результати з прискоренням вільного падіння, обчисленим для широти Вінниці ($\varphi = 49^\circ$):

$$g = 9.7803 \cdot (1 + 0.005302 \sin^2 \varphi - 0.00007 \sin^2 2\varphi).$$

10. Вимкнути обладнання після закінчення дослідів, показати результати викладачу.

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Які закони динаміки вивчаються в цій роботі? Сформулювати ці закони.
3. Записати закон шляху при рівноприскореному русі.
4. Розповісти порядок виконання роботи.
5. Яка причина того, що вантажі на машині Атвуда починають свій рух?
6. Як рухається тіло під впливом постійної сили?
7. За рахунок якої сили система вантажів рухається прискорено?
8. Які формули для розрахунку похибок знайдених величин використовують в цій роботі?

Контрольні питання

1. Перелічити способи задання руху матеріальній точці у кінематиці.
2. Сформулювати визначення швидкості, середньої швидкості, прискорення.
3. Що таке сила? Перелічити всі види сил, які вивчаються у механіці.

4. Сформулювати три закони Ньютона.
5. Що називають вагою тіла? Як знайти вагу вантажу при його рівноприскореному русі?
6. Як визначити силу натягу нитки в разі рівномірного й рівноприскореного руху вантажів?
7. Як рухатимуться вантаж з масою m й перевантаження з масою m_1 , якщо обрізати нитку?
8. Як відіб'ється врахування маси блоку на величині прискорення a , яке визначається за допомогою машини Атвуда?
9. Які основні похибки експерименту на машині Атвуда?
10. У чому перевага методики визначення прискорення вільного падіння g за допомогою машини Атвуда перед прямим експериментом за визначенням прискорення вільного падіння?
11. Вивести формули (2) і (3) й відповідні формули похибок.
12. Що таке маса тіла?

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ: 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики / Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Наука, 1989. Т. 1: Механика. 206 с. С. 71–91.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. М.: Наука, 1982. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. С. 35–45, 50–60, 72–73.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. С. 11–18, 43–52.
7. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

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, штангенциркуль.

Зміст роботи

Основний закон обертального руху твердого тіла, рівняння моментів, має вигляд:

$$I\vec{\varepsilon} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i$$

де I – момент інерції тіла, $\vec{\varepsilon}$ – вектор його кутового прискорення,

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i$$

– векторна сума моментів зовнішніх сил, прикладених до тіла.

Нехтуючи масою диска і силами тертя в осі диска, можна записати рівняння обертального руху маятника у проекції на напрям кутового прискорення:

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

де R – радіус диску, T – сила натягу нитки.

Рівняння, яке пов'язує лінійне прискорення a точок, які лежать на зовнішній межі диску, з його кутовим прискоренням ε , має вигляд:

$$a = \varepsilon R. \quad (2)$$

Якщо нитка нерозтяжна і не прослизає по поверхні диску, то лінійне прискорення a й прискорення поступального руху вантажу на нитці однакові за величиною. Тоді рівняння поступального руху вантажу на нитці у проекції на напрям прискорення можна записати у вигляді:

$$ma = mg - T, \quad (3)$$

де m – маса вантажу. З рівнянь (1–3) знаходимо

$$a = \frac{mR^2}{I+mR^2} g. \quad (4)$$

З іншого боку, використовуючи кінематичні співвідношення, для прискорення a можна записати формулу

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (5)$$

де h – відстань, яку проходить вантаж за час t .

Рівняння (1) перевіряється при *постійному моменті інерції*, тому:

$$\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = I. \quad (6)$$

Індекс «1» («2») відповідає експерименту з вантажем маси m_1 , (m_2) і диском радіуса R_1 , (R_2).

З рівнянь (4–6) отримаємо, знайшовши $\frac{M_1}{\varepsilon_1}$ та $\frac{M_2}{\varepsilon_2}$:

$$m_1 R_1^2 (gt_1^2 - 2h) = m_2 R_2^2 (gt_2^2 - 2h). \quad (7)$$

Для того, щоб *перевірити*, чи дійсно виконується *основний закон динаміки обертального руху*, необхідно порівняти величини

$$A = m_1 R_1^2 (gt_1^2 - 2h) \quad \text{і} \quad B = m_2 R_2^2 (gt_2^2 - 2h)$$

в межах їхніх похибок. Якщо A і B у межах похибок експерименту співпадають, то рівняння (1) виконується.

Формули відносних похибок вимірювання A і B мають вигляд (отримати самостійно):

$$\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{m_1}}{m_1}\right)^2 + \left(2 \frac{\sigma_{R_1}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{2gt_1\sigma_{t_1}}{gt_1^2-2h}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_h}{gt_1^2-2h}\right)^2};$$

$$\frac{\sigma_B}{B} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{m_2}}{m_2}\right)^2 + \left(2 \frac{\sigma_{R_2}}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{2gt_2\sigma_{t_2}}{gt_2^2-2h}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_h}{gt_2^2-2h}\right)^2}.$$

Процент не співпадіння A і B визначається за формулою:

$$\delta = \frac{|A-B|}{\min(A,B)} \cdot 100\%.$$

Опис установки

Загальний вигляд маятника Обербека показаний на рис. 1.2.1.

На вертикальній стійці 1, встановленій на підставці 2, закріплений кронштейн – нижній рухомий 3 і дві втулки: нерухома верхня втулка 4 і рухома середня 5.

Підставка має регульовані ніжки 6, які забезпечують горизонтальне положення приладу. На верхній втулці 4 закріплений підшипниковий вузол диска 7 і сам диск 8. Через диск перекидається нитка 9. Один кінець нитки прикріплений до двоступеневого диску 10, а на іншому кінці закріплений змінний вантаж 11.

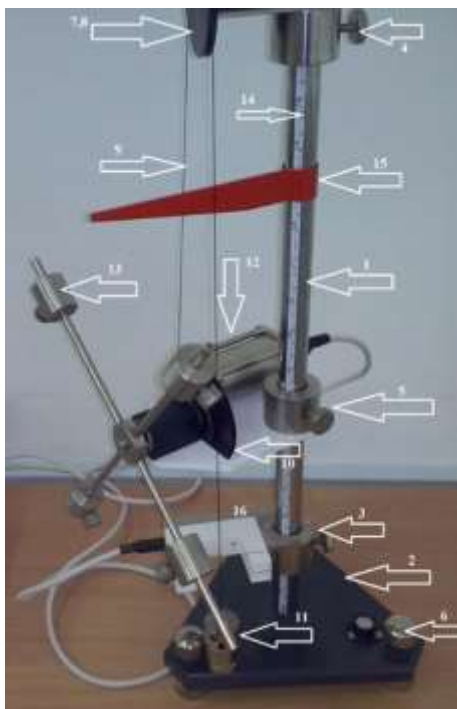


Рис. 1.2.1 – Загальний вигляд установки

До втулки 5 прикріплений гальмівний електромагніт 12, який після підключення до нього напруги живлення утримує за допомогою фрикційної муфти систему хрестовини разом з вантажами 13 у стані спокою. З метою відліку довжини шляху нанесена міліметрова шкала 14 і є візир 15.

На рухомому кронштейні 3 закріплений фотоелектричний датчик (16), який виробляє електроімпульс закінчення виміру часу і вмикає гальмівний електромагніт.

На панелі електронного блоку знаходяться наступні елементи керування:

«МЕРЕЖА» – перемикач мережі. Натискання перемикача веде до вмикання / вимикання напруги живлення і автоматичного обнуління приладу.

«СБРОС» – обнуління вимірювача часу.

Натискання перемикача веде до обнуління схеми мілісекундоміра.

«ПУСК» – керування електромагнітом. Натискання кнопки веде до вивільнення електромагнітом хрестовини і генерування імпульсу, який дозволяє вимірювання часу.

Маятник складається з чотирьох стрижнів й двох блоків різного радіуса, закріплених на горизонтальній осі. Уздовж стрижнів можуть переміщатися й закріплюватися в потрібному положенні чотири (по одному на кожному стрижні) вантажі 13 однакової маси. За допомогою вантажів різної маси 11, прикріплених до кінця нитки, намотаної на один з двох дисків, маятник може починати обертання.

Порядок виконання роботи

1. Встановити вантажі 13 на стрижнях маятника симетрично, у найближчому положенні від осі маятника, навколо якої він може обертатися ($\ell_1 = \ell_{min}$).

Закріпити на нитці потрібне число вантажів загальною масою m_1 й перекинути її через блок (на хрестовині) радіуса R_1 . Масу записати в таблицю.

2. Виміряти радіус R_1 блоку штангенциркулем, записати це значення.

Підняти вантаж m_1 у верхнє положення і встановити *нижній край* вантажу m_1 точно *на верхній межі* візиру 15 на шкалі 14 і натиснути перемикач «МЕРЕЖА», спрацює магніт який зафіксує хрестовину.

3. Виміряти за шкалою 14, яка знаходиться на стійці, довжину шляху h , який проходить вантаж m_1 (від верхньої межі візиру до оптичної осі) й записати його, далі натиснути кнопку «ПУСК».

4. Зафіксувати вимірне за допомогою блоку управління значення часу руху вантажу m_1 по шляху h , повернути вантаж в верхнє положення й натиснути кнопку «СБРОС», знову спрацює магніт, який утримує хрестовину (не натискати «СБРОС» коли вантаж у нижньому положенні!).

5. Вимірювання повторити 5 разів і визначити середнє значення часу руху вантажу та його похибку.

6. Перекинути нитку на інший блок радіуса R_2 й закріпити на нитці вантаж масою m_2 . Значення маси і радіуса записати в таблицю.

7. Повторити дії, згідно з пунктами 3–8.

8. Упевнитися у справедливості формули (7) в межах похибки експерименту.

9. Закріпити вантажі 13 на стрижнях маятника у найбільш віддаленому від осі положенні ($\ell_2 = \ell_{max}$) симетрично.

10. Повторити дії, згідно з пунктами 2–11.

11. Вимкнути обладнання після закінчення дослідів, показати результати викладачу.

12. Результати вимірів оформити у вигляді таблиці.

Таблиця 1

№ блоку	$R_{\text{бл}}$ м	$m_{\text{в}}$ кг	h м	t_1 с	t_2 с	t_3 с	t_4 с	t_5 с	$\langle t \rangle$ с	положення вантажу на хрестовині
1й										вантаж на стрижнях у найближчому положенні
2й										
1й										вантаж на стрижнях у дальньому положенні
2й										

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Сформулювати основний закон обертального руху твердого тіла.
3. У чому полягає ідея експериментальної перевірки рівняння моментів?
4. Розказати хід роботи.

5. Що називають моментом інерції твердого тіла?
6. Як зміниться момент інерції маятника при збільшенні (зменшенні) відстані між вантажами?
7. Що називають моментом імпульсу? Як знайти його напрям? У якому випадку момент імпульсу зберігається?
8. Що називають моментом сили? Як він спрямований?
9. Вивести формули для розрахунку похибок знайдених величин.
10. У роботі визначаються дві величини А і дві величини В (при ℓ_{\min} і ℓ_{\max}). Які з них необхідно попарно порівняти, щоб перевірити справедливості основного закону обертального руху? Чому?

Контрольні питання й завдання

1. Яким чином у цій роботі можна визначити момент сил тертя?
2. Вивести зв'язок між лінійним й кутовим прискоренням.
3. Вивести рівняння моментів.
4. Вивести основне рівняння динаміки обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі.
5. Записати основне рівняння динаміки обертального руху, що використовується у цій роботі.
6. Вивести формули для моментів інерції однорідних стрижня, диску, кільця.
7. За якими припущеннями побудована теорія експерименту?

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львів: Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Наука, 1989. Т. 1: Механика. С. 179–189, 197–202, 206–207.
4. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «МАТНСАД». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
5. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. С. 161–173, 177–184.
6. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероной. М.: Наука, 1967. С. 92–95.
7. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 3

Вимірювання швидкості польоту «кулі» балістичним методом за допомогою крутильного маятника

Мета роботи: визначення швидкості польоту «кулі» за допомогою крутильного маятника на основі закону збереження моменту імпульсу.

Прилади й обладнання: уніфілярний підвіс, мішень, вантажі, два металеві снаряди.

Опис установки

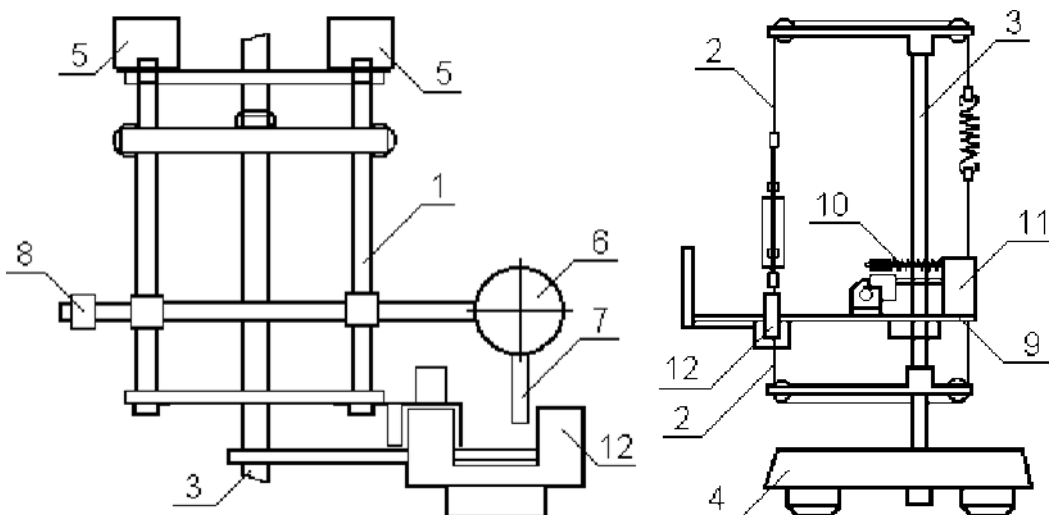


Рис. 1.3.1 – Схема установки

Головним елементом установки (див. рис. 1.3.1) є крутильний маятник, що являє собою металеву рамку 1, підвішену на сталевій нитці 2. Нитка підвісу закріплена вертикально в натягнутому стані на стійці 3 з основою 4. Рамка може здійснювати крутильні коливання навколо вертикальної осі, що проходить через її вісь симетрії. На ній є місця для кріплення двох додаткових вантажів 5 симетрично відносно осі симетрії рамки. До неї ж кріпиться «мішень» 6 у вигляді диска, поверхня якого вкрита тонким шаром пластиліну, прапорець 7 для контролю її коливань й противаги 8. «Кулею» є тонкий металевий циліндр. До стійки на кронштейні 9 кріпиться «пістолет», що складається зі стрижня, що задає напрям польоту кулі, з пружиною 10 й спусковим пристроєм 11. До стійки також на кронштейні кріпиться фотодатчик 12, з'єднаний з електронним блоком реєстрації часу і кількості коливань.

Принцип дії лабораторної установки

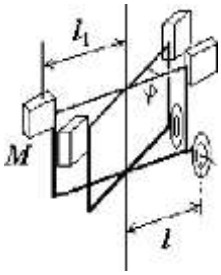


Рис. 1.3.2 –
Параметри, що
вимірюються

Після пострілу «куля» потрапляє у «мішень» й прилипає до її поверхні (див. рис. 1.3.2). Зіткнення снаряду з мішенню відбувається за такий малий час, що обертанням рамки з «мішенню», а отже, і дією моменту сил пружності нитки за цей час можна знехтувати. Момент сили тяжіння й сили натягу нитки відносно вертикальної осі дорівнює нулю. Таким чином, відносно цієї осі сумарний момент зовнішніх сил, що діє на рамку і «снаряд», дорівнює нулю, й при зіткненні виконується закон збереження сумарного моменту імпульсу рамки і «снаряда».

Момент імпульсу «снаряда» до зіткнення $L_1 = mv\ell$, де m – маса «снаряда», v – його швидкість, ℓ – прицільна відстань (див. рис. 1.3.2). Після зіткнення рамка з вантажами починає обертати з кутовою швидкістю ω , при цьому її момент імпульсу

$$L_2 = (I_p + 2M\ell_1^2)\omega. \quad (1)$$

Тут I_p – момент інерції рамки без вантажів, M – маса кожного з вантажів, ℓ_1 – відстань вантажів від осі обертання. Внеском у момент інерції прилипло «снаряда» можна знехтувати через малу його масу.

За законом збереження моменту імпульсу $L_1 = L_2$, таким чином,

$$v = \frac{(I_p + 2M\ell_1^2)\omega}{m\ell}. \quad (2)$$

Щоб скористатися цією формулою, потрібно знайти кутову швидкість рамки ω й момент інерції рамки з вантажами $I_p + 2M\ell_1^2$.

Кутову швидкість можна знайти, вимірявши кут максимального відхилення φ_m рамки після зіткнення. Після зіткнення обертання рамки гальмується дією моменту пружних сил у сталевій нитці підвісу. При цьому виконується закон збереження енергії. Кінетична енергія рамки переходить у потенціальну енергію закрученої сталевий нитки:

$$\frac{(I_p + 2M\ell_1^2)\omega^2}{2} = \frac{D\varphi_m^2}{2}. \quad (3)$$

Тут D – модуль кручення дроту. Модулем кручення називається коефіцієнт пропорційності між моментом пружних сил $M_{пр}$ і кутом закручування нитки φ .

$$M_{\text{пр}} = -D\varphi.$$

Знак мінус тут показує, що напрям моменту пружних сил протилежний куту закручування.

Зі співвідношення (3) знаходимо вираз для кутової швидкості:

$$\omega = \varphi_m \sqrt{\frac{D}{(I_p + 2M\ell_1^2)}}. \quad (4)$$

Модуль крутіння D і момент інерції $I_p + 2M\ell_1^2$ визначають період коливань рамки. Їхнє відношення, а також необхідний для обрахунку швидкості момент інерції рамки з вантажами можна знайти з вимірювань періоду коливань рамки з вантажами і без них. Для того щоб зрозуміти, як зв'язаний період з цими величинами, розглянемо рівняння обертання рамки, підвішеної на пружній сталевій нитці: $I_p \ddot{\varphi} = -D\varphi$. Тут I_p – момент інерції рамки, $\ddot{\varphi}$ – друга похідна від кута за часом, це кутове прискорення.

Це рівняння змінюється до виду

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0, \text{ де } \omega_0 = \sqrt{\frac{D}{I_p}}. \quad (5)$$

Рівняння (5) описує гармонічні коливання з циклічною частотою коливань ω_0 . Період коливань вираховується за формулою:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I_p}{D}}. \quad (6)$$

Позначивши період коливань рамки без вантажів – T_0 , з вантажами – T , за формулою (6) маємо:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_p}{D}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{I_p + 2M\ell_1^2}{D}}. \quad (7)$$

З цих формул отримаємо для кутової швидкості (4) наступний вираз:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \varphi_m. \quad (8)$$

Виключимо модуль крутіння D з формул (7) і знайдемо момент інерції рамки з вантажами:

$$I_p + 2M\ell_1^2 = \frac{2M\ell_1^2 T^2}{T^2 - T_0^2}. \quad (9)$$



Рис. 1.3.3 – Загальний вигляд установки

Підставивши співвідношення (8) й (9) у рівняння (2), отримаємо кінцеву формулу:

$$v = \frac{4\pi M\ell_1^2 T \varphi_m}{m\ell(T^2 - T_0^2)}. \quad (10)$$

Таким чином, для розрахунку швидкості кулі необхідно *виміряти* періоди коливань рамки з *вантажами* і *без вантажів* (T , T_0), відстані ℓ, ℓ_1 та кут φ_m , знати

маси куль та вантажів (M, m). Загальний вигляд експериментальної установки показаний на рис. 1.3.3.

Порядок виконання роботи

1. Здійсніть регулювання горизонтального положення основи за допомогою регулюючих гвинтів. Переконайтеся у вертикальності нитки підвісу по виску.
2. Встановіть вантажі 5 на рамку.
3. Встановіть «мішень» 6 на рамці. Переконайтеся, що «мішень» знаходиться на лінії «пострілу» й перпендикулярна їй, а прапорець перетинає при коливаннях рамки оптичну вісь фотодатчика.
4. Встановіть один зі «снарядів» на напрямний стрижень «гармати», зведіть пружину й здійсніть «постріл». Візуально визначте кут φ_{mi} максимального відхилення рамки за шкалою кутових переміщень за допомогою прапорця, закріпленого на рамці. Повторіть «постріл» й вимірювання кута максимального відхилення п'ять разів.
5. Виміряйте штангенциркулем відстань ℓ від осі обертання рамки до центру відбитку «кулі» на мішені.

Натисніть на електронному блоці кнопку «МЕРЕЖА» (з дозволу **викладача!**). Відхиліть рамку з вантажами на кут 30° градусів й зафіксуйте за допомогою електромагніту. Натисніть кнопку «ПУСК», при цьому вимкнеться електромагніт, який відпустить рамку, і розпочнуться крутильні коливання рамки. Визначте час t , за який виконується N коливань рамки. Для реєстрації часу необхідно натиснути кнопку «СТОП» після того, як пройде $N-1$ повних коливань (за одиницю до потрібного числа за індикатором). Прилад зупинить відлік часу у момент завершення N -го коливання, де $N = 20$.

6. Виміряйте штангенциркулем відстань ℓ_1 від осі обертання рамки до центру вантажів 5.

7. Зніміть вантажі 5 з рамки й так само, як у пункті 5, проведіть вимірювання часу t_1 , за яке відбувається N_1 коливань рамки без вантажів, де $N_1 = 20$.

8. Визначте середнє значення кута максимального відхилення під час пострілу:

$$\bar{\varphi}_m = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_{mi}}{n},$$

де n – кількість вимірювань кута максимального відхилення φ_m .

9. Вирахуйте періоди коливання рамки з вантажами й без них:

$$T = \frac{t}{N}, \quad T_0 = \frac{t_1}{N_1}.$$

10. Використовуючи середнє значення кута $\bar{\varphi}_m$, вирахуйте за формулою (10) швидкість кулі v та розрахуйте її похибку (формулу для розрахунку похибки отримати самостійно).

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

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Який закон збереження виконується під час взаємодії кулі з маятником і чому?
3. Викладіть хід роботи.
4. Який сенс має кут φ_m , через який визначається швидкість кулі? У яких одиницях він повинен бути виміряний?
5. Які величини потрібно виміряти для визначення моменту інерції маятника?
6. Чи потрібно стріляти кулею у мішень для визначення періоду коливань рамки без вантажів? Чому?

Контрольні питання

1. Що називають кутовою швидкістю й кутовим прискоренням?
2. Що називають моментом імпульсу? Коли ця величина зберігається? Що є причиною її зміни?
3. Що називають моментом сили? Як знайти його напрям?
4. З яких форм і у які переходить енергія у процесі експерименту?

5. У якому з процесів у цій роботі виконується, а в якому не виконується закон збереження механічної енергії і чому?
6. Отримати рівняння моментів.
7. Вивести основне рівняння динаміки обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі.
8. Як записується основне рівняння динаміки обертального руху відносно процесів, що вивчаються у цій роботі? Який сенс величин, що до нього входять?
9. Якими параметрами описується обертальний рух? Яким рівнянням описується зміна цих параметрів при гармонічних коливаннях крутильного балістичного маятника?
10. Як записується вираз для повної механічної енергії маятника у довільний момент часу?
11. Вивести формулу для розрахунку швидкості польоту кулі й відповідну їй формулу для обрахунку похибки.

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики / Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. С. 33–38, 132–135, 141–148, 179–183, 187–189.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1982. С. 45–48, 105–111, 134–137.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. С. 18–23, 161–170, 177–184.
7. Стрелков С. П. Механика. М.: Наука, 1975. С. 181–183, 187–189, 200–205.
8. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. С. 132–136.
9. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 4

Вивчення законів зіткнення тіл

Мета роботи: вимірювання коефіцієнтів відновлення швидкості й енергії при центральному ударі двох шарів, часу і середньої сили зіткнення.

Прилади й обладнання: лабораторна установка зіткнення куль, набір металевих куль з алюмінію, латуні, сталі.

Опис установки

Схема лабораторної установки показана на рис. 1.4.1.

До штативу 1 підвішені на нитках дві кулі. Кути відхилення підвісів від вертикалі визначаються за шкалою 3. Електромагніт 4 потрібен для утримання однієї з куль у відхиленому положенні.

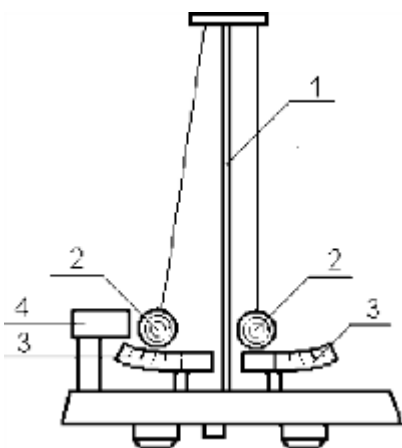


Рис. 1.4.1 – Схема лабораторної установки

Відведемо одну з куль на деякий кут α_1 й відпустимо без початкової швидкості. Відхилена куля буде рухатися вниз, розганяючись, при цьому її потенціальна енергія буде переходити у кінетичну. Нехай зіткнення з другою кулею відбувається у той момент, коли нитка

першої кулі стає вертикально. За законом збереження механічної енергії (див. рис. 1.4.2)

$$m_1gh = \frac{m_1v_1^2}{2}, \quad (1)$$

де m_1 – маса кулі, g – прискорення вільного падіння, h – висота кулі у відхиленому стані відносно нижньої точки траєкторії, v_1 – швидкість першої кулі у нижній точці перед зіткненням з другою кулею. З рисунку видно, що

$$h = \ell - \ell \cos \alpha_1, \quad (2)$$

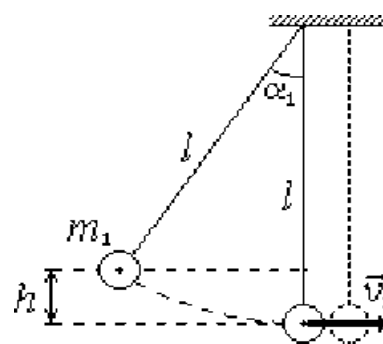


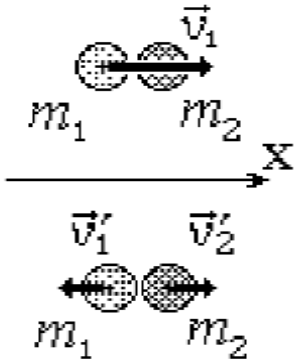
Рис. 1.4.2 – Параметри відхилення кулі

де ℓ – відстань від точки підвісу до центру тяжіння кулі, а α_1 – кут початкового відхилення нитки.

Підставляючи (2) в (1), знайдемо вираз для швидкості v_1 через кут початкового відхилення:

$$v_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2g\ell(1 - \cos\alpha_1)} = 2\sqrt{g\ell} \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2}. \quad (3)$$

Маси куль підбрані таким чином, щоб після удару вони розлетілися у різні боки. Після удару кулі набувають швидкості v'_1 і v'_2 (див. рис. 1.4.3), і, розлітаючись, відхиляють нитки на максимальні α'_1 і α'_2 кути, відповідно. Так само як у співвідношенні (3), отримуємо:



$$v'_1 = 2\sqrt{g\ell} \cdot \sin \frac{\alpha'_1}{2}, \quad v'_2 = 2\sqrt{g\ell} \cdot \sin \frac{\alpha'_2}{2}. \quad (4)$$

Рис. 1.4.3 – Напрями руху куль до і після зіткнення

Якщо удар відбувається достатньо швидко, так, що нитки за час удару не встигають відхилитися на помітний кут, то у напрямку горизонтальної осі X не виникає зовнішніх сил, й виконується закон збереження імпульсу у проекції на цю вісь:

$$m_1 v_1 = m_2 v'_2 - m_1 v'_1. \quad (5)$$

Коефіцієнт ε_v відновлення швидкості визначається як відношення модуля різниці швидкостей куль після удару до модуля різниці швидкостей куль до удару:

$$\varepsilon_v = \frac{v'_{\text{від}}}{v_{\text{від}}} = \frac{|v'_2 - v'_1|}{|v_2 - v_1|}. \quad (6)$$

У цьому випадку формула (6) з урахуванням (3), (4) набуває вигляду

$$\varepsilon_v = \frac{v'_2 + v'_1}{v_1} = \frac{\sin \frac{\alpha'_2}{2} + \sin \frac{\alpha'_1}{2}}{\sin \frac{\alpha_1}{2}}. \quad (7)$$

Для абсолютно пружного удару $\varepsilon_v = 1$. У випадку зіткнення реальних куль зіткнення не зовсім є абсолютно пружним, тому $\varepsilon_v < 1$.

Окрім коефіцієнту відновлення швидкості ε_v , зіткнення куль характеризується коефіцієнтом відновлення енергії ε_w , що дорівнює відношенню кінетичної енергії тіл після удару до їхньої кінетичної енергії до удару:



Рис. 1.4.4 – Загальний вигляд лабораторної установки

$$\varepsilon_w = \frac{\frac{1}{2}m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2'^2}{\frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2}. \quad (8)$$

Враховуючи, що швидкість другої кулі до удару $v_2 = 0$, і підставляючи для швидкостей вирази (3), (4), знаходимо робочу формулу для коефіцієнта відновлення енергії:

$$\varepsilon_w = \frac{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1'}{2} + m_2 \sin^2 \frac{\alpha_2'}{2}}{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}}. \quad (9)$$

Якщо відома тривалість удару τ , то з другого закону Ньютона по зміні імпульсу однієї з куль можна визначити середню силу взаємодії між кулями:

$$\vec{F}_{cp} = \frac{m_2 \vec{v}_2' - m_2 \vec{v}_2}{\tau} \quad \text{або} \quad \vec{F}_{cp} = \frac{m_2 \vec{v}_2'}{\tau}. \quad (10)$$

Порядок виконання роботи

1. З'єднати клеми електромагніту 4 і клеми верхнього кронштейна до електронного блоку (за потреби).

2. Закріпити дві кулі до підвісу. За допомогою регульованих опор встановіть основу установки таким чином, щоб нижні візирі підвісу вказували на нулі шкал.

Відрегулюйте (якщо треба) положення куль у вертикальній і горизонтальній площинах до симетричного суміщення візирів підвісу. Регулювання виконується за допомогою зміни довжини підвісу куль, а також зміною положення вузлів кріплення ниток на верхньому кронштейні (рис. 1.4.4).

3. Увімкніть перемикачем лабораторний блок (з дозволу викладача!) або, якщо він вже увімкнений, на блоці натисніть кнопку «СБРОС». При цьому на табло індикації засвітяться нулі, на електромагніт буде подана напруга.

4. Відведіть праву кулю і зафіксуйте її за допомогою електромагніту. Визначте початковий кут відхилення першої кулі α_1 (наприклад 10 градусів).

5. Натисніть кнопку «ПУСК», при цьому виникне зіткнення куль. За таймером блока визначте час зіткнення куль τ .

6. Визначте час зіткнення для *різних пар різних* куль за методикою, яка описана у пунктах 4–6.

7. У правий підвіс вставте алюмінієву кулю зі сталеву вставкою, а у лівий – латунну або сталеву кулю.

8. Виконайте пункти 4–6. За допомогою шкал візуально визначте кути відхилення куль α_1' і α_2' . Повторіть виміри кутів відхилення п'ять разів. Знайдіть середнє значення кожного з кутів, $a'_{1\text{сер.}}$ і $a'_{2\text{сер.}}$ та їхні похибки.

9. За формулою (3) визначте швидкість v_1 першої кулі перед зіткненням. Використовуючи середні значення кутів відскоку за формулами (4), визначте швидкості обох куль одразу після зіткнення v_1' і v_2' . Перевірте виконання закону збереження імпульсу за формулою (5).

10. Використовуючи середні значення кутів відскоку за формулами (7), (9), визначте коефіцієнти відновлення швидкості та енергії.

11. Використовуючи знайдене вище значення v_2' за формулою (10), визначте середню силу, з якою кулі діють одна на одну під час зіткнення.

12. Таким чином, в роботі треба виміряти кути відхилення α_1 , α_1' , α_2' для таких пар кульок: сталевий–сталевий, сталевий–алюмінієвий, алюмінієвий–бронзовий.

13. Вимкнути обладнання після закінчення дослідів, показати результати викладачу.

Питання для допуску

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Що називають зіткненням?
3. Яке зіткнення називають абсолютно пружним?
4. Яке зіткнення називають абсолютно непружним?
5. Сформулювати закони збереження імпульсу й механічної енергії.
6. Що покладено в основу перевірки закону збереження імпульсу в цій роботі?
7. Викласти хід роботи.
8. Як відцентрувати установку?
9. Який порядок увімкнення кнопок на передній панелі пристрою?
10. Вивести формули для підрахунку похибок.

Контрольні питання й завдання

1. Що називають імпульсом тіла?
2. Сформулювати й довести закон збереження імпульсу.
3. Дати визначення кінетичної, потенціальної і повної механічної енергії.
4. Сформулювати й довести закон збереження механічної енергії.

5. Яку систему називають замкненою? Чи є система двох куль, що стикаються у цій роботі замкненою? Чому?
6. Яке зіткнення називають лобовим?
7. Розглянути процес лобового абсолютно пружного зіткнення двох куль різних мас з початковими швидкостями v_1 , v_2 і знайти швидкості куль після зіткнення.
8. Вивести робочі формули.
9. Пояснити, чому в цій роботі не виконуються на 100 % закони збереження імпульсу та механічної енергії?

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. С. 75–77, 86–91, 146–165.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1982. С. 100–105, 116–117.
5. Ісай В. М., Король В. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. С. 73–79, 112–139.
7. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероной. М.: Наука, 1967. С. 124–129.
8. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 5

Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника

Мета роботи: експериментальна перевірка закономірностей руху математичного маятника.

Прилади й обладнання: маятник універсальний.

Зміст роботи

Математичним маятником зазвичай називають тіло малого розміру (матеріальну точку), підвішене до нерухокої точки на невагомій нерозтяжній нитці, яке рухається, відхиляючись від положення рівноваги на *малий кут*, у вертикальній площині під дією сили тяжіння (рис. 1.5.1). У полярних координатах рівняння руху такої системи має вигляд:



$$m\ell^2\varphi'' = -mg\ell \sin\varphi, \quad \text{або } \varphi'' + \omega^2 \sin\varphi = 0,$$

Рис. 1.5.1 – Кут відхилення кулі

$$\text{де } \omega^2 = \frac{g}{\ell}.$$

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

$$\varphi'' + \omega^2\varphi = 0. \quad (1)$$

Рішення цього рівняння може бути записано у вигляді

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

де A – амплітуда коливання, δ – початкова фаза коливання. Таким чином,

математичний маятник здійснює гармонічні коливання з частотою $\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$ і

періодом $T_i = 2\pi \sqrt{\frac{\ell_i}{g}}$.

Схема установки показана на рис. 1.5.2. У ролі тіла математичного маятника використовується металева куля 1, підвішена на двох капронових нитках до кронштейна 2. На цьому ж кронштейні знаходиться також гвинт 3, який дозволяє змінювати довжину підвісу. На нижньому кронштейні закріплений фотодатчик 4, відстань між кронштейнами визначається за нанесеною на штатив шкалою 5.

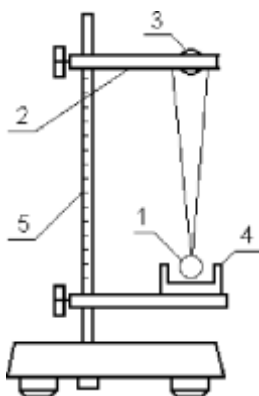


Рис. 1.5.2 – Схема установки

Загальний вигляд експериментальної установки представлено на рис. 1.5.3.

Порядок виконання роботи

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

2. За шкалою на вертикальній стійці визначити довжину підвісу математичного маятника ℓ .

3. Увімкнути живлення перемикачем (з дозволу викладача!).

4. Привести математичний маятник у коливальний рух, відхиливши металеву кульку на невеликий кут (~ 5 градусів), після чого натиснути на кнопку «ПУСК» на блоці.

За показаннями таймера визначити значення часу t_1 для $N = 50$ коливань маятника. Після чого натиснути кнопку «СТОП».

5. Визначити середнє значення періоду коливань маятника за формулою $T_1 = t_1/N$, де t_1 – час коливань, N – кількість коливань.

6. Перемістити угору кронштейн з фотодатчиком на два сантиметри за шкалою вертикальної стійки. Обертаючи гвинт 3, добитися такого положення кульки, при якому її центр буде співпадати за висотою з рискою на фотодатчику. За шкалою вертикальної стійки визначити довжину математичного маятника ℓ_2 , для цієї довжини виміряти період T_2 . Далі виміряти періоди коливань T_3, T_4, T_5 за пп. 4–5 для ℓ_3, ℓ_4, ℓ_5 , зменшуючи кожен раз довжину підвісу маятника на 2 см.

7. Розрахувати 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 ℓ_i . Апроксимувати отриману залежність прямою лінією $T_i^2 = k\ell_i + b$. Знайти коефіцієнт нахилу k методом найменших квадратів, а потім знайти величину прискорення вільного



Рис. 1.5.3 – Загальний вигляд установки

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 σ_g і порівняти 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. Вимкнути обладнання після закінчення дослідів, показати результати викладачу.

Питання для допуску

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. Вивести формулу для визначення похибки прискорення вільного падіння.

Контрольні питання

1. Від чого залежить прискорення сили земного тяжіння?
2. Пояснити, 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 з прискоренням $a \geq g$, догори – $a < g$?
4. Чому Земля, яка притягується Сонцем, не падає на Сонце, а довільний предмет, який притягується Землею, падає на Землю?

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. 520 с.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1982. С. 105–111, 131–134.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. 352 с.
7. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 6
Вимірювання прискорення вільного падіння
за допомогою фізичного маятника

Мета роботи: вимірювання прискорення вільного падіння.

Прилади й обладнання: маятник універсальний ФМ-13.

Теоретична частина

Фізичним (оборотним) маятником називається тверде тіло, яке має можливість виконувати коливання під дією сили тяжіння навколо нерухомої горизонтальної осі. Період малих вільних коливань фізичного маятника визначається співвідношенням

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

де g – прискорення вільного падіння, m – маса маятника, I – момент інерції маятника відносно осі підвісу, ℓ – відстань від осі підвісу до центру інерції маятника.

Зокрема, для математичного маятника, маса якого зосереджена у центрі інерції, маємо $I = m\ell^2$. Тоді з рівняння (1) отримуємо

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (2)$$

Співвідношення (1) зручно перетворити, використовуючи теорему Штейнера

$$I = I_0 + m\ell^2, \quad (3)$$

де I_0 – момент інерції маятника відносно осі, яка проходить через його центр інерції паралельно осі підвісу. Підставивши рівняння (3) у (1), знаходимо

$$T(\ell) = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + m\ell^2}{mg\ell}}. \quad (4)$$

Зробимо аналіз залежності періоду T коливань фізичного маятника від величини ℓ . У граничному випадку великих значень ℓ ($\ell \rightarrow \infty$) співвідношення (4) переходить у (2), таким чином отримуємо математичний маятник

$$T(\ell)_{\ell \rightarrow \infty} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (5)$$

За малих ℓ маятник наближений до положення байдужої рівноваги. У цьому випадку із співвідношення (4) отримуємо

$$T(\ell)_{\ell \rightarrow 0} = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{mg\ell}}. \quad (6)$$

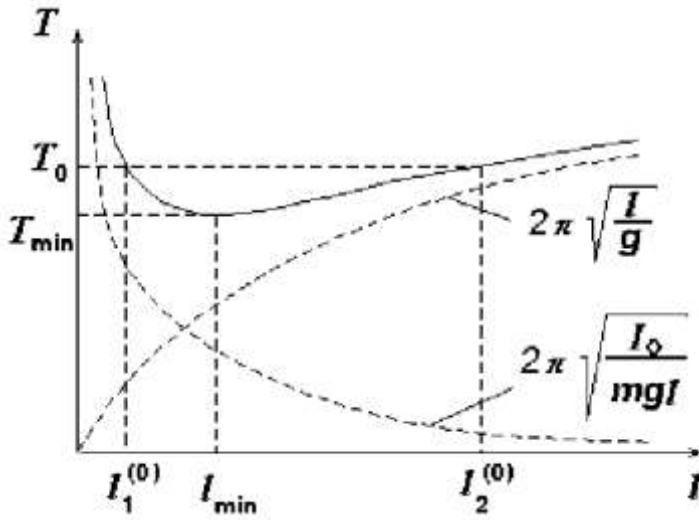


Рис. 1.6.1 – Приблизний вид графіка залежності $T(\ell)$

Приблизний вид графіка залежності $T(\ell)$ показаний на рис. 1.6.1. Асимптотична поведінка функції за $\ell \rightarrow \infty$ і $I \rightarrow \infty$ описується виразами (5) і (6), можна показати, що за $\ell_{min} = (I_0/m)^{1/2}$ функція $T(\ell)$ має мінімум.

Розглянемо можливість визначення за допомогою фізичного маятника прискорення вільного падіння g . Величину I_0 , що входить у формулу (4), яку складно знайти з досліду, можна

виключити, вимірюючи період коливань за двох різних значень ℓ . Записавши рівняння (4) для ℓ_1 і ℓ_2 , отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} mg\ell_1 T_1^2 = 4\pi^2(I_0 + m\ell_1^2) \\ mg\ell_2 T_2^2 = 4\pi^2(I_0 + m\ell_2^2) \end{cases} \quad (7)$$

Звідси знаходимо:

$$g = 4\pi^2 \frac{\ell_1^2 - \ell_2^2}{T_1^2 \ell_1 - T_2^2 \ell_2}. \quad (8)$$

На практиці важко точно визначити положення центру інерції маятника, і таким чином виміряти ℓ_1 і ℓ_2 . Ці труднощі можна обійти, якщо взяти такі відстані $\ell_1^{(0)}$ і $\ell_2^{(0)}$, щоб відповідні періоди збігалися, і таким чином виконувалася б умова $T_1^{(0)} = T_2^{(0)} = T_0$. Тоді, вважаючи $\ell_1^{(0)} \neq \ell_2^{(0)}$, з рівняння (8) отримаємо

$$g = \frac{4\pi^2}{T_0^2} [\ell_1^{(0)} + \ell_2^{(0)}]. \quad (9)$$

При цьому якщо осі розташовані по різні боки від центру інерції, то сума $\ell_1^{(0)} + \ell_2^{(0)}$ є просто відстань ℓ_0 між осями, яку легко виміряти з високою точністю.

Отже, якщо спостерігається збіг періодів коливань фізичного маятника відносно двох осей, які знаходяться по обидва боки від центру інерції і на різних відстанях від нього, то величину g можна знайти зі співвідношення

$$g = 4\pi^2 \frac{\ell_0}{T_0^2}, \quad (10)$$

де ℓ_0 – відстань між осями; T_0 – період коливань, що збігається відносно двох осей.

Зміст роботи

У роботі використовується фізичний маятник, який називається оборотним, і схематично показаний на рис. 1.6.2. Основною частиною маятника є металевий стрижень 1. Осями підвісу є ребра двох призм 2, закріплені поблизу кінців стрижня, у робочому положенні призми встановлюються у V-образні опори штативу. Зсув центру інерції, необхідний для зміни відстані ℓ_1 , і ℓ_2 , забезпечується переміщенням масивного вантажу 3, що знаходиться біля кінця стрижня. Положення фіксованого вантажу 4 підібрано так, щоб за допомогою регульовального вантажу можна було досягти рівності T_1 і T_2 у прямому і зворотному положеннях маятника.

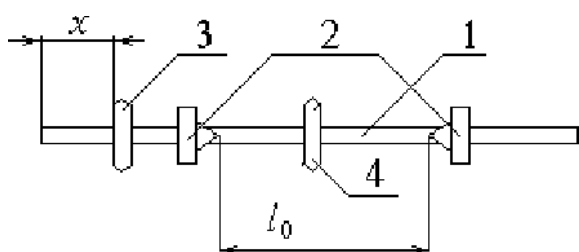


Рис. 1.6.2 – Схема фізичного (оборотного) маятника

Для більш точного вимірювання величини $T_0 = T_1^{(0)} = T_2^{(0)}$ у роботі досліджується залежність T_1 і T_2 від положення x регульовального вантажу, яке визначається за спеціальною шкалою. Оскільки відстань ℓ_0 між осями фіксована, то при зміщенні вантажу 3 зміна ℓ_1 і ℓ_2 буде однаковою за величиною, але протилежна за знаком. Як видно з

рис. 1.6.1, це призведе до однакової за знаком зміни періодів T_1 і T_2 . Однак за достатньої асиметрії у розташуванні центру інерції залежність $T(x)$ у зворотному положенні маятника буде більш крутою, ніж у прямому.

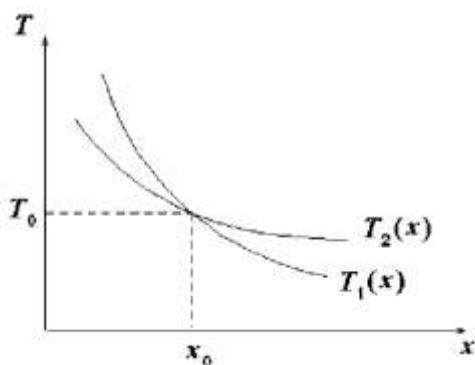


Рис. 1.6.3 – Графіки залежності $T_1(x)$ і $T_2(x)$

Таким чином, графіки залежності $T_1(x)$ і $T_2(x)$ для прямого й зворотного положень маятника матимуть вигляд, зображений на рис. 1.6.3. В результаті значення T_0 можна знайти як ординату точки перетину відповідних кривих.

Період коливань маятника можна визначити за формулою

$$T = \frac{t}{N}, \quad (11)$$

де t – час, за який відбувається повна кількість N коливань. При повторних вимірюваннях зручно реєструвати час t однієї й тієї ж кількості коливань N . Тоді немає необхідності одразу переходити до величини T . Практично зручніше досліджувати залежності $t(x)$ для прямого й зворотного положень маятника. Точка перетину відповідних графіків дає величину $t_0 = t_1^{(0)} = t_2^{(0)}$. Тоді з урахуванням виразів (10), (11) отримуємо для розрахунку прискорення вільного падіння співвідношення

$$g = 4\pi^2 \ell_0 \left(\frac{N}{t_0}\right)^2. \quad (12)$$

Внаслідок похибок вимірювань експериментальні точки на графіку $t(x)$ можуть не знаходитися на плавній кривій, прогнозованій теорією (див. рис. 1.6.3), тому при обробці результатів вимірювань криві $t_1(x)$ і $t_2(x)$ варто провести приблизно, прагнучі мінімізувати їхні середні відхилення від отриманих з дослідів точок. Загальний вигляд установки представлено на рис. 1.6.4.

Порядок виконання роботи

1. Під час підготовки до виконання роботи варто встановити стійку вертикально. Нижній кінець стрижня повинен вільно проходити між вікнами фотодатчика. Встановити маятник так, щоб регульовальний вантаж знаходився на відстані 2 см від кінця стрижня (якщо потрібно). **Увага!** При роботі з маятником варто дотримуватися обережності й упевнитися, що ребро призми, що є віссю підвісу, знаходиться в заглибленні V-подібної опори. Амплітуда коливань повинна складати приблизно 5 градусів.

2. Увімкнути електронний блок перемикачем (з дозволу викладача!).

3. Виміряти час t_1 для $N = 10$ повних коливань маятника. Запуск і зупинення секундоміра здійснюється фотоелектричним датчиком. При натисканні

на кнопку «ПУСК» починається відлік часу від моменту проходження маятником положення рівноваги. При натисканні кнопки «СТОП» секундомір фіксує тривалість t цілої кількості коливань на момент найближчого за часом проходження маятником положення рівноваги. Кількість коливань фіксується спеціальним індикатором. Записати значення t , N й положення x вантажу.

4. Перевернути маятник й повторити завдання п. 3. Визначити час t_2 .

5. Повторити дослід при п'яти різних значеннях x , зміщуючи вантаж з одного крайнього положення в інше. Для підвищення точності вимірів t при кожному x повторіть вимірювання t п'ять разів.



6. Виміряти відстань ℓ_0 між ребрами призми, які є осями підвісу маятника, й оцінити похибку σ_{ℓ_0} .

7. При оформленні звіту побудувати графіки залежності $t_1(x)$ і $t_2(x)$ для прямого і зворотного положень маятника. Знайти величину t_n як ординату точки перетину відповідних кривих. За формулою (12) розрахувати величину g .

8. Оцінити похибку визначення t_n і розрахувати похибку σ_g знаходження g .

9. Вимкнути обладнання після закінчення дослідів, показати результати викладачу.

Рис. 1.6.4 – Загальний вигляд установки

Розрахунок похибки

Використовуючи правила обрахунку похибки непрямих вимірів, з виразу (12) отримуємо наступну формулу для відносної похибки величини g :

$$\frac{\sigma_g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\ell_0}}{\ell_0}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_{t_0}}{t_0}\right)^2}, \quad (13)$$

де σ_{ℓ_0} і σ_{t_0} – абсолютні похибки величин ℓ_0 і t_0 .

Оскільки відстань ℓ_0 вимірюється безпосередньо, то її похибка визначається, як звичайно, за даними багатьох вимірювань.

Величина t_0 визначається непрямим методом за графіками залежності $t_1(x)$ і $t_2(x)$. При цьому внаслідок наявності похибок σ_t при вимірюванні часу t графік $t(x)$ фактично повинен зображатися не лінією, а смужкою завширшки $\approx 2\sigma_t$.

Похибку σ_t варто знайти за даними багатьох вимірювань відрізків часу t і нанести на графік. Тоді в результаті перетинання кривих $t_1(x)$ і $t_2(x)$, проведених з урахуванням похибки, отримуємо деяку область. Величина t_0 знаходиться як ордината її центру. Оцінку похибки σ_{t_0} отримуємо, враховуючи, що максимальний розмір вказаної області уздовж осі ординат складає $2\sigma_{t_0}$. При оцінці σ_{t_0} варто враховувати, що точність побудови точок на графіку не перевершує 0,5 мм.

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Що називають фізичним маятником?
3. Що називають математичним маятником?
2. Що називають приведеною довжиною фізичного маятника?
3. Що називають центром качання фізичного маятника?
4. За яких умов періоди коливань фізичного і математичного маятників співпадають?
5. Записати формулу для періоду коливань математичного маятника.
6. Записати формулу для періоду коливань фізичного маятника.
7. У чому полягає властивість оберненості фізичного маятника?
8. Як знайти період T_0 , відповідний приведеній довжині ℓ_0 у цій роботі?
9. Чому початкове відхилення маятника від вертикалі не повинне перевищувати $\approx 5^\circ$?
10. Як визначити приведену довжину ℓ_0 у цій роботі?
11. Чому дорівнює похибка шкали?
12. Викласти хід роботи.

Контрольні питання й завдання

1. Що називають моментом інерції твердого тіла?
2. Що називають центром мас тіла?
3. Чому дорівнює радіус-вектор центру мас?
4. Що знаходиться нижче: центр коливань чи центр мас маятника?
5. Що називають моментом сили, моментом імпульсу?
6. Сформулювати й довести теорему Гюйгенса–Штейнера.
7. Знайти моменти інерції однорідних стрижня, кільця, диска, циліндра, конуса, кулі.

8. Вивести формули для визначення періодів коливань фізичного й математичного маятників.
9. Порівняти періоди коливань фізичного і математичного маятників, якщо довжина математичного маятника дорівнює відстані від точки підвісу до центра мас фізичного маятника.
10. Довести властивість оберненості фізичного маятника.
11. Вивести формулу для підрахунку похибки.

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. 520 с. С. 179–189, 225–229.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1982. С. 105–111, 131–134, 190–199.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности. М.: Высш. шк., 1976. С. 298–317.
7. Стрелков С. П. Механика. М.: Наука, 1975. С. 212–215.
8. Хайкин С. Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. С. 297–304, 398–412.
9. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. 352 с. С. 54–60.
10. Гольдин Л. Л., Игошин Ф. Ф., Козел С. М. Лабораторные занятия по физике. М.: Наука, 1983. С. 123–128.
11. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 7

Вимірювання швидкості польоту кулі за допомогою балістичного маятника

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

Прилади й 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. 1.7.1). Для визначення зміщення маятника 2 використовується закріплена на маятнику лінійка 3 і стрижень 4. Пружинна гармата 1 потрібна для набуття швидкості кулею. Поверхня маятника, у яку влучає куля, вкрита пластиліном, щоб куля застрягла в ньому, і взаємодія була непружна.

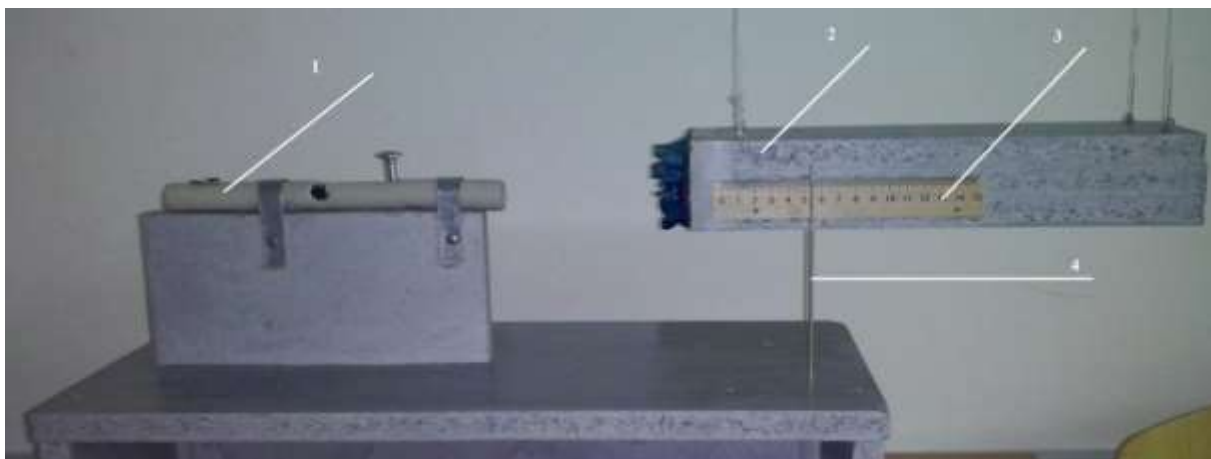


Рис. 1.7.1 – Загальний вигляд установки

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 вид:

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

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:

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

Після удару маятник відхилиться від положення рівноваги й підніметься на висоту h (рис. 1.7.2). Нехтуючи в цьому процесі тертям об повітря, із закону збереження механічної енергії отримаємо:

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

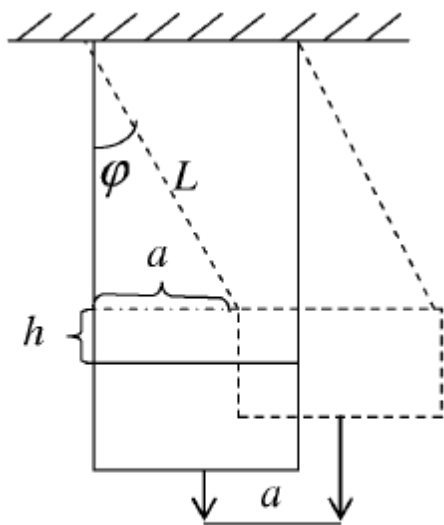


Рис. 1.7.2 – Параметри, що вимірюються

Вимірювані параметри

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

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

Величину h можна визначити, вимірявши кут φ 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 φ , а висоту h через горизонтальне зміщення a :

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

Тоді формула для розрахунку швидкості кулі буде мати вид:

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

Таким чином, 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. Записати маси m двох куль.
2. Помістити кулю у пружинну гармату, зробити постріл і виміряти горизонтальне зміщення a_i маятника.
3. Зробити 5 пострілів, знайти середнє значення зсуву $\langle a \rangle$ та його похибку. Результати вимірювань занести у таблицю.
4. Визначити швидкість польоту кулі за формулою (8). Значення маси маятника взяти $M = 0.95$ кг й довжини нитки $L = 1.84$ м.
5. Підрахувати похибку σ_v швидкості кулі за формулою (9).
6. Для кулі іншої маси повторити дії згідно з пунктами 1–5.
7. Після закінчення дослідів показати результати викладачу.

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Що прийнято за основу метода вимірювання швидкості кулі в роботі?
3. Сформулювати закони збереження імпульсу й 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. Викласти хід роботи.

Контрольні питання й завдання

1. Сформулювати й довести закон збереження імпульсу.
2. Що таке повна механічна енергія?
3. Сформулювати й довести закон збереження механічної енергії.
4. Чи може механічна енергія не зберігатися? Чому дорівнює її зміна?
5. Що таке пружний і непружний удар?
6. Вивести формулу (8) і формулу для підрахунку похибки швидкості кулі.

7. У якому з процесів, що відбуваються у цій роботі, виконується, а в якому – не виконується закон збереження механічної енергії?
8. Чи виконується в даній роботі закон збереження імпульсу?
9. Від чого залежить швидкість польоту кулі у цьому експерименті?

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. 520 с. С. 75–77, 141–165.
4. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «МATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
5. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. С. 73–80, 97–115, 121–127.
6. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. 352 с. С. 129–132.
7. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 8

Гіроскоп

Мета роботи: ознайомлення з гіроскопічним ефектом й вимірювання моменту інерції гіроскопа.

Прилади й обладнання: гіроскоп, вантаж для зміни моменту сили.

Зміст роботи

Гіроскопом зазвичай називають симетричне тверде тіло, яке швидко обертається навколо осі симетрії, напрям якої можна змінювати у просторі.

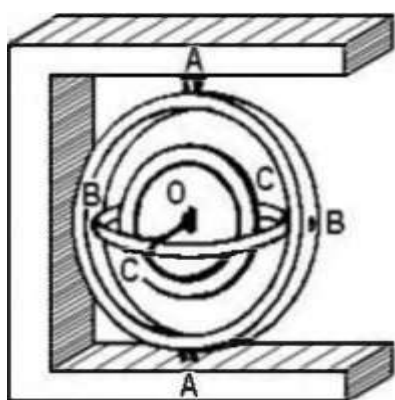


Рис. 1.8.1 – Гіроскоп у кардановому підвісі

Властивості гіроскопа мають небесні тіла, що обертаються, артилерійські снаряди, ротори турбін, які встановлюються на суднах, гвинти літаків та інше. У сучасній техніці гіроскоп – основний елемент всіляких гіроскопічних пристроїв або приладів, які широко використовуються для автоматичного управління рухом літаків, суден, торпед, ракет, у навігації (вказівники курсу, горизонту, сторін світу тощо) й у багатьох інших випадках.

Найпростішим гіроскопічним приладом, який входить у ролі основної складової частини у більшість гіроскопічних пристроїв, є масивний диск (ротор гіроскопа), закріплений у кільцях так званого карданового підвісу (рис. 1.8.1).

У цьому приладі є три осі обертання, взаємно перпендикулярні й перехресні в одній точці: вісь AA_1 зовнішнього кільця підвісу, вісь BB_1 внутрішнього кільця й вісь CC_1 ротора гіроскопа (вісь гіроскопа).

Якщо загальний центр тяжіння рухомих частин приладу, ротора й двох кілець, співпадає з точкою перехрещення трьох осей обертання приладу, то гіроскоп зберігає рівновагу за будь-якого положення його ротора – рівновага є байдужою.

Такий гіроскоп називається урівноваженим або астатичним.

Основні властивості гіроскопа

Якщо ротор урівноваженого гіроскопа не обертається, то достатньо злегка вдарить по приладу, щоб його вісь вийшла з первинного положення й почала повертатися відповідно до напрямку сили удару. Цей рух буде продовжуватися,

поки сила тертя не зупинить прилад у будь-якому новому урівноваженому положенні. Якщо ж привести ротор гіроскопа у швидке обертання, то реакція його на дії зовнішніх сил буде зовсім іншою. Якщо тепер вдарити по гіроскопу, то його вісь майже не змінить свого положення, вісь гіроскопа набула стійкості, і ця стійкість буде тим більшою, чим більшими будуть кутова швидкість обертання і момент інерції ротора. Якщо до гіроскопа, що обертається, докласти дві сили, які повернуть його навколо осі, перпендикулярної до осі його обертання, то він стане обертатися навколо третьої осі, перпендикулярної до перших двох. В цьому й полягає так званий *гіроскопічний ефект*.

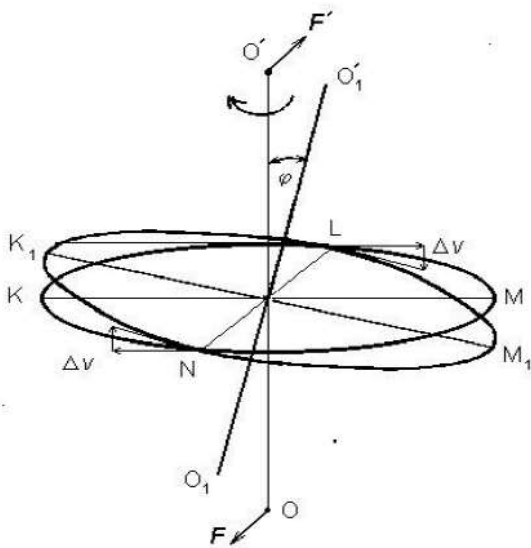


Рис. 1.8.2 – Дія двох сил на гіроскоп

Ці парадоксальні, на перший погляд, властивості гіроскопа можуть бути зрозумілі завдяки наступному наочному поясненню. Уявимо собі для простоти гіроскоп у вигляді кільця $KLMN$, який незмінно пов'язаний з віссю OO' (рис. 1.8.2) і обертається навколо цієї осі у напрямку, вказаному стрілкою.

При повороті осі OO' у площині рисунку на малий кут φ вона займе положення O_1O_1' , а кільце $KLMN$ перейде у положення K_1LM_1N . При цьому лінійні швидкості обертання усіх точок кільця, окрім точок K і M , змінять свої напрями.

В точках K і M вектори швидкості зсунуться лише паралельно собі: зміни для них дорівнюють нулю. Для точок L і N зміна швидкості Δv буде найбільшою, причому для точки L вектор $\overline{\Delta v}$ буде напрямлений донизу, а для точки N – угору. Для проміжних точок кільця чисельні зміни швидкості будуть лежати в межах від 0 до $|\Delta v|$, причому для усієї половини кільця KLM ці зміни спрямовані униз, а для усієї половини кільця MNK – угору. Щоб викликати такі зміни швидкостей, до осі потрібно докласти дві сили F і F' , які лежать у площині, перпендикулярній площині рисунку. Таким чином, для того, щоб повернути вісь обертання гіроскопа OO' навколо напрямку LN , потрібно докласти дві сили, які прагнуть повернути її навколо перпендикулярного напрямку KM ; гіроскоп прагне розмістити вісь свого обертання таким чином, щоб вона утворювала найменший кут з віссю вимушеного обертання, й щоб обидва обертання здійснювалися в одному і тому ж напрямку.

Сили, які докладені до зв'язків, що утримують вісь, дорівнюють силам F і F' , але спрямовані у протилежні боки. Вони називаються гіроскопічними силами.

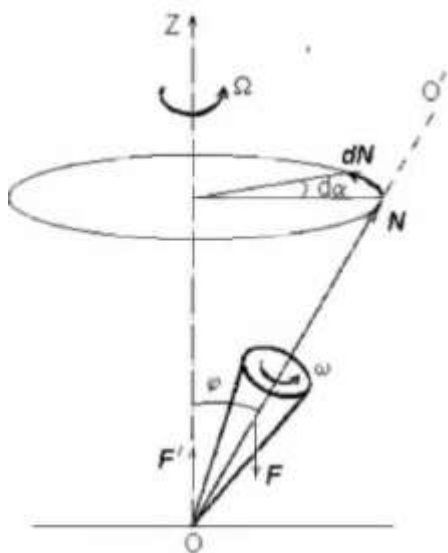


Рис. 1.8.3 – Прецесія гіроскопа

Щоб отримати кількісне співвідношення між силами, що діють на гіроскоп, й зміною положення його осі, розглянемо рух дзиги, яка спирається на горизонтальну підставку у точці O й обертається навколо своєї осі OO' з кутовою швидкістю ω (рис. 1.8.3). Нехай у деякий момент часу дзига займає нахилене положення, як вказано на рисунку, і її вісь складає з вертикаллю кут φ . На дзигу діють дві сили FF' з моментом M (сила тяжіння й реакція опори, тертям ми нехтуємо), яка прагне нахилити її вісь ще більше. Завдяки гіроскопічному ефекту вісь відхиляється у перпендикулярному напрямку, в результаті чого дзига не падає, а починає обертатися навколо вертикальної осі OZ так, що її вісь описує конічну

поверхню. Такий рух називається прецесією.

Знайдемо зв'язок між кутовою швидкістю прецесії Ω й моментом сил M . Момент імпульсу дзиги дорівнює:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}, \quad (1)$$

де I – її момент інерції відносно осі OO' . Вектор \vec{L} спрямований уздовж осі дзиги. (Рівняння (1) не повністю точне, бо дзига бере участь одночасно в двох обертальних рухах – обертанні навколо своєї осі й прецесії навколо осі OZ . Але через те, що швидкість прецесії невелика $\Omega \ll \omega$, її впливом на величину й напрям вектора \vec{L} можна знехтувати). Згідно з правилом моментів, швидкість зміни моменту імпульсу дорівнює моменту зовнішніх сил, які діють на дзигу:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}.$$

За нескінченно малий проміжок часу dt вектор \vec{L} отримує перпендикулярний собі приріст

$$dL = L \cdot \sin\varphi d\alpha,$$

який лежить у горизонтальній площині. Таким чином,

$$M = L \cdot \sin\varphi \cdot \frac{d\alpha}{dt}.$$

Але $d\alpha/dt$ – це кутова швидкість прецесії Ω . (Зауважимо, що, через те, що момент сил у нашому випадку – величина постійна, то постійною буде й кутова швидкість прецесії). Підставляючи в останній вираз $L = I\omega$, $d\alpha/dt = \Omega$, отримаємо

$$M = I \cdot \omega \cdot \Omega \cdot \sin\varphi$$

і, враховуючи векторний характер величин, можемо записати

$$\vec{M} = [\vec{\Omega}, I\vec{\omega}]. \quad (2)$$

За цією формулою можна визначити величину й напрям кутової швидкості прецесії, якщо відомий момент сил, що діють на гіроскоп. З формули (2) також видно, що момент сил визначає не кутове прискорення (як це було для гіроскопа, що не обертався), а кутову швидкість прецесії. Отже, як тільки зовнішній вплив припиняється ($M = 0$), вісь гіроскопа зупиняється. Якщо вплив був короткотривалим, то вісь встигне обернутися тільки на дуже малий кут. Таким чином, видно, що гіроскоп, приведений у швидке обертання набуває стійкості. Схема установки показана на рис. 1.8.4.

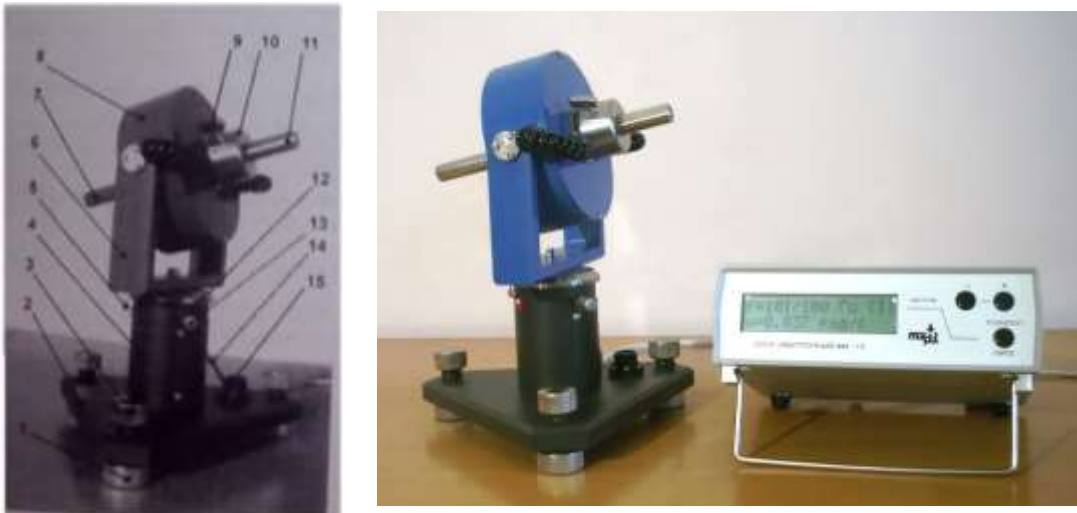


Рис. 1.8.4 – Схема і загальний вигляд установки

У цій роботі тілом гіроскопа є гіроскопічна система 8, яка складається з електромотора з маховиком, стрижнів 7, 11. Гіроскопічна система попередньо вільно врівноважена. На одному зі стрижнів є протизвага 10, яка встановлюється на час роботи, призначена для отримання моменту зовнішніх сил, які викликають прецесію гіроскопа. Зміна частоти прецесії гіроскопа виникає при зміщенні протизваги уздовж стрижня. Таким чином, момент сил M , які викликають прецесію, дорівнює $M = mg\ell$, де m – маса протизваги разом з фіксуєчим гвинтом 9, а ℓ –

плече гіроскопа. Швидкості обертання маховика гіроскопа і прецесії задаються і визначаються блоком управління.

Порядок виконання роботи

Дослід 1. Визначення швидкості прецесії і вимір кутової швидкості обертання маховика гіроскопа.

1. За допомогою регулювальних гвинтів 3 основи 1 по рівню 15 гіроскопа відрегулювати (якщо потрібно) горизонтальне положення основи, затягнути гвинти.

2. Увімкнути перемикач «Мережа» (з дозволу викладача!).

3. За допомогою кнопки «пуск–стоп–сброс» блока управління, утримуючи 1–2 секунди, увімкнути електромотор гіроскопа, встановити за допомогою кнопок «частота + / –» частоту в межах 40÷60 Гц. Впевнитися у відсутності прецесії (обертання).

4. Якщо це необхідно, встановити нове значення частоти обертання за допомогою кнопок регулювання швидкості обертання маховика гіроскопа «ЧАСТОТА +» та «ЧАСТОТА –» (величина частоти обертання визначається викладачем) й дочекатися, поки частота обертання мотора досягне встановленої.

5. Встановити противагу 10 на стрижень 7 або 11, зсунути його майже впритул до корпусу гіроскопа 8 й зафіксувати гвинтом 9.

6. За допомогою штангенциркуля або лінійки виміряти відстань ℓ_1 від бокової поверхні електромотора до дальньої від нього торцевої поверхні противаги 10.

7. Встановити гіроскопічний вузол так, щоб стрижні 7, 11 знаходились в горизонтальному положенні і, утримуючи його, послабити фіксуючий гвинт валу 13, після чого відпустити гіроскопічний вузол й короткочасно натиснути кнопку «СБРОС» електронного блока.

8. За допомогою індикатора визначити швидкість прецесії Ω_1 .

9. Зсунути противагу так, щоб відстань від бокової поверхні електромотора до дальньої від нього поверхні противаги 10 збільшилася на 10 мм, таким чином маємо $\ell_2 = \ell_1 + 10$ (вимірюється за допомогою лінійки або штангенциркуля).

10. Встановити гіроскопічний вузол так, щоб стрижні 7, 11 знаходились у горизонтальному положенні і після цього відпустити гіроскопічний вузол й короткочасно натиснути кнопку «СБРОС» електронного блока.

11. За допомогою індикатора визначити швидкість прецесії Ω_2 .

12. Зсунути противагу так, щоб відстань від бокової поверхні електромотора до дальньої від нього поверхні противаги 10 збільшилась ще на 10 мм: $\ell_3 = \ell_1 + 20$ (вимірюється за допомогою штангенциркуля або лінійки), зробити 5 вимірів.

13. Встановити гіроскопічний вузол у горизонтальне положення, після цього відпустити гіроскопічний вузол й короткочасно натиснути кнопку «СБРОС» електронного блока.

14. За допомогою табло електронного блока визначити швидкість прецесії Ω_3 .

15. Упевнитися в справедливості співвідношення:

$$\ell_1/\Omega_1 = \ell_2/\Omega_2 = \dots = \ell_5/\Omega_5 \approx const. \quad (3)$$

УВАГА! Для більш точного результату рекомендується значення ℓ визначати, як

$$\ell = \ell_i + 27,5 - 12,5, \quad (4)$$

де 27,5 мм і 12,5 мм – половина ширини мотора гіроскопічної системи і противаги відповідно.

За необхідності повторити дії, передбачені пунктами 4–14, завчасно переставивши противагу на протилежний стрижень, при цьому напрямок прецесії зміниться на протилежний.

Дослід 2. Визначення залежності швидкості прецесії гіроскопа Ω від кутової швидкості обертання маховика гіроскопа ω .

16. Для п'яти різних значень частоти ω_i обертання маховика гіроскопа (встановлюється кнопками «Частота + / –») при *постійному положенні противаги на стрижні*, визначити швидкості прецесії гіроскопа Ω_i (значення брати з індикатора).

Побудувати графік залежності $\Omega_i = f(1/\omega_i)$ методом найменших квадратів.

Дослід 3. Визначення залежності швидкості прецесії гіроскопа від моменту сил, прикладених до горизонтальної осі гіроскопа.

17. Переміщуючи противагу по стрижню (треба виставити п'ять значень плеча ℓ_i) при постійній частоті обертання маховика ω (див. по індикатору), визначити залежність швидкості прецесії гіроскопа Ω_i від моменту сил, докладених до горизонтальної осі гіроскопа

$$M_i = mg\ell_i,$$

де ℓ_i – плече сили, m – маса противаги, g – прискорення вільного падіння.

18. На базі отриманих даних побудувати графік залежності $\Omega_i = f(M_i)$ методом найменших квадратів, визначити з графіка кутовий коефіцієнт K отриманої

прямої, вирахувати момент інерції гіроскопа за формулою $I = \frac{mg}{K\omega}$ і вирахувати відносну похибку I :

$$\frac{\sigma_I}{I} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\omega}{\omega}\right)^2}.$$

19. Завершивши роботу, вимкнути мотор, для чого натиснути кнопку «ПУСК / СТОП» й утримувати її протягом 1–2 с (до індикації напису (0)), потім вимкнути перемикач живлення «МЕРЕЖА», показати результати викладачу.

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Що називають гіроскопом?
3. Які елементи установки утворюють гіроскоп?
4. Що таке карданів підвіс?
5. Які елементи установки утворюють карданів підвіс?
6. Яка взаємна орієнтація векторів \vec{L} , $\vec{\omega}$, $\vec{M}_{\text{зовн}}$?
7. Який вид мають графіки залежності $\Omega = f(\ell)$ та $\Omega = f(1/\omega)$?
8. У якому напрямку треба впливати на кінець важеля гіроскопа, щоб він змінив свій нахил до горизонту?
9. Розказати хід роботи.

Контрольні питання

1. Що називають кутовою швидкістю?
2. Що називають моментом інерції?
3. Що називають моментом імпульсу? Як він спрямований?
4. Що називають моментом сили? Як він спрямований?
5. Як обґрунтувати вираз $M_{\text{зовн.}} = mg\ell$?
6. Записати рівняння моментів.
7. Що називають прецесією?
8. Вивести формулу: $\Omega = \frac{|\vec{M}_{\text{зовн.}}|}{L} = \frac{mg\ell}{I\omega}$.
9. Чим пояснюється зміна кута нахилу гіроскопа, який здійснює прецесію?
10. Що називають нутацією? Які види нутації Вам відомі?
11. Вивести формули для підрахунку похибок.

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. С. 287–320.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1989. С. 131–144, 161–167.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «МATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. С. 161–169, 189–193.
7. Гольдин Л. Л., Игошин Ф. Ф., Козел С. М. Лабораторные занятия по физике: учебное пособие. М.: Наука, 1983. С. 128–134.
8. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. С. 139–141.
9. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 9

Вимірювання моменту інерції твердого тіла методом крутильних коливань

Мета роботи: дослідження крутильних коливань і вимірювання моменту інерції тіла складної форми.

Прилади й обладнання: установка з уніфілярним підвісом, набір сталевих зразків різної форми.

Зміст роботи

Момент інерції I – це величина, яка характеризує інертність тіла при обертальному русі. Величину I можна знайти з основного закону динаміки обертального руху:

$$I = \frac{M}{\varepsilon}, \quad (1)$$

де M – алгебраїчна сума моментів сил, докладених до тіла; ε – його кутове прискорення.

Величина I залежить від розмірів, форми й маси тіла. Тіла, що досліджуються в цій роботі, мають різну форму.

Схема установки показана на рис. 1.9.1.

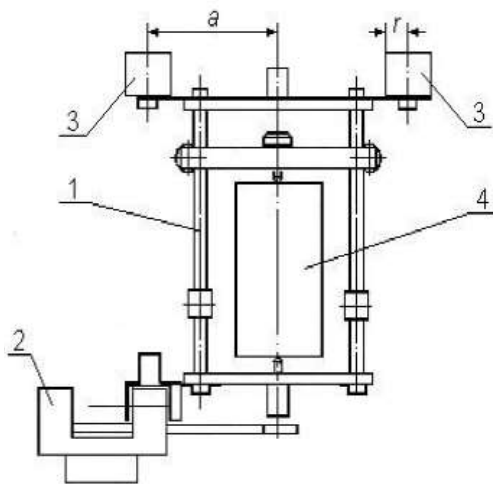


Рис. 1.9.1 – Схема установки

Тіло, що досліджується у цій роботі, має форму прямокутної рамки 1, закріпленої на натягнутому сталевому дроті, який проходить по її геометричній осі симетрії. Якщо рамку повернути на деякий кут φ , то відбувається закручення дроту. Тоді сила пружності дроту (обертаюча сила) прагне повернути рамку у початкове положення. Момент M обертаючої сили при відносно малому куті φ повороту рамки зв'язаний з ним співвідношенням

$$M = -D\varphi, \quad (2)$$

де D – коефіцієнт, який називається модулем крутіння дроту. Величина D залежить від довжини дроту, його діаметра й модуля зсуву, який характеризує пружні властивості матеріалу дроту. З формул (1) і (2) отримуємо диференціальне рівняння, що описує рух рамки:

$$I\varphi'' = -D\varphi, \quad \text{або} \quad \varphi'' + \omega_0^2\varphi = 0, \quad (3)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{I}}$, $\varphi'' = \varepsilon$.

Рішенням рівняння (3) для кута φ є гармонічне коливання $\varphi = \varphi_0 \cos(\omega_0 t + \delta)$ з періодом T :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}. \quad (4)$$

Отже, досліджуване тіло здійснює крутильні коливання. Момент інерції I тіла можна знайти з формули (4), якщо знати величину D . В цій роботі визначення модуля крутіння D не потрібне. Вимірюється період коливання T порожньої рамки з моментом інерції I . Потім визначається період T_1 коливань системи, яка складається з рамки і встановленими на ній вантажами 3 з моментом інерції I_0 . Тоді, згідно з формулою (4), маємо

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I+I_0}{D}}. \quad (5)$$

Виключаючи з формул (4) і (5) величину D , отримуємо формулу для розрахунку моменту інерції I досліджуваного тіла

$$I = I_0 \frac{T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}. \quad (6)$$

Період коливань T – це тривалість одного повного коливання. Величину T можна виміряти як час між двома послідовними проходженнями рамкою положення рівноваги *в одному й тому ж напрямку*. Для підвищення точності вимірів T його знаходять, вимірюючи тривалість t деякої кількості N повних коливань. Тоді

$$T = \frac{t}{N}. \quad (7)$$

Хід виконання роботи

1. Встановіть рамку так, щоб у положенні рівноваги прапорець рамки знаходився між вікнами фотодатчика 2 (див. рис. 1.9.1), встановіть електромагніт у положення, приблизно 40° за кутовою шкалою.

2. Увімкніть електроживлення (з дозволу викладача!), натиснувши перемикач. Потім поверніть рамку так, щоб вона утримувалась електромагнітом.

3. Натисніть кнопку «ПУСК». В цій роботі рекомендується брати кількість повних коливань $N = 10$. Кнопку «СТОП» треба натискати, коли кількість повних коливань за показниками індикатора буде дорівнювати $N - 1$.

4. Виміряти час t для числа повних коливань рамки $N = 10$, повторити дослід 5 разів. Визначити період коливань рамки T .

5. Встановити два вантажі 3 на рамку (див. рис. 1.9.1). Визначити період коливань T_1 рамки з вантажами за формулою (7).

6. Визначити момент інерції рамки за формулами:

$$I_p = \frac{I_0 T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}, \quad (8)$$

де $I_0 = 2m\left(\frac{r^2}{2} + a^2\right)$ момент інерції вантажів 3, m – маса вантажу, $r = 0,015$ м – радіус вантажу; $a = 0,052$ м – відстань від осі обертання рамки до осі вантажу.

7. Зняти вантаж 3, встановити досліджуваний зразок 4 у рамку й закріпити спеціальними гвинтами так, щоб одна з його геометричних осей співпадала з віссю рамки.

8. Знайти період коливань T_2 рамки зі зразком 4 за формулою (7). Визначити момент інерції досліджуваного зразка 4 за формулою:

$$I_4 = I_p \left(\frac{T_2^2}{T_1^2} - 1 \right). \quad (9)$$

Розрахувати теоретичний момент інерції I_4 зразка за формулою

$$I_4 = \frac{m}{12} (a^2 + b^2), \quad (10)$$

де a і b – довжини сторін зразка, що знаходяться у горизонтальній площині, m – маса зразка. Порівняти результати експериментального визначення моменту інерції зразка з теоретичним.

9. Вимкнути обладнання після закінчення дослідів, показати результати викладачу.

Розрахунок похибок

Із формул (8)–(10) можна отримати наступні співвідношення для розрахунку похибки σ_{I_4} :

$$\frac{\sigma_{I_4}}{I_4} = \left[\left(\frac{\sigma_m}{m} \right)^2 + 4 \frac{a\sigma_a^2 + b\sigma_b^2}{a^2 + b^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Похибки σ_{a^2} і σ_{b^2} знаходять за даними прямих вимірювань. Потім за формулою (11) розраховують похибку σ_{I_4} .

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Що називають моментом інерції тіла?
3. Як пов'язаний момент інерції тіла відносно довільної осі, яка проходить через його центр мас, з моментами інерції цього тіла відносно його центральних головних осей?
4. Що покладено в основу перевірки співвідношення між моментом інерції тіла відносно довільної осі, яка проходить через його центр мас, і його головними центральними моментами інерції?
5. Викласти хід роботи.
6. Вивести формули для підрахунку похибок.

Контрольні питання

1. Що називають тензором моменту інерції?
2. Які осі тіла називають головними?
3. Показати шляхом безпосередніх підрахунків, що у головних осях недиагональні елементи тензора інерції прямокутного паралелепіпеда дорівнюють нулю.
4. Вивести формули для моменту інерції кулі і кільця.

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. С. 248–265, 320–329.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1982. С. 134–150.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. С. 177–189.
7. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. С. 102–105.
8. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 10

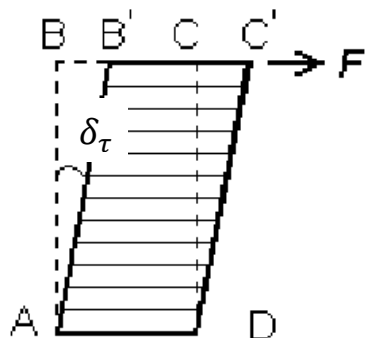
Вимірювання модуля зсуву за допомогою пружинного маятника

Мета роботи: вивчення деформації зсуву.

Прилади й обладнання: установка «модуль Юнга», установка зсуву, пружини різної жорсткості, набір вантажів.

Зміст роботи

Зсувом називається деформація, при якій усі плоскі шари твердого тіла, паралельні деякій площині (площині зсуву), зміщуються паралельно один одному (рис. 1.10.1). Зсув відбувається під дією сили F , докладеної паралельно площині зсуву BC (див. рис. 1.10.1). Мірою деформації при цьому є кут зсуву δ_τ (відносний зсув). За законом Гука, відносний зсув δ_τ пропорційний дотичній напрузі:



δ

Рис. 1.10.1 – Деформація зсуву

$$\delta_\tau = \frac{F}{S} = G\vartheta, \quad (1)$$

де S – площа грані відносного зсуву, G – модуль зсуву, який чисельно дорівнює дотичній нарузі, яка викликає відносний зсув, що дорівнює одиниці.

У цій роботі визначається модуль зсуву матеріалу G , з якого виготовлена гвинтова пружина (рис. 1.10.2). Основними геометричними параметрами пружини є діаметр дроту d , діаметр витка пружини D і число витків N . Під дією сили F , що розтягує, довжина пружини L збільшується, згідно з законом Гука на величину

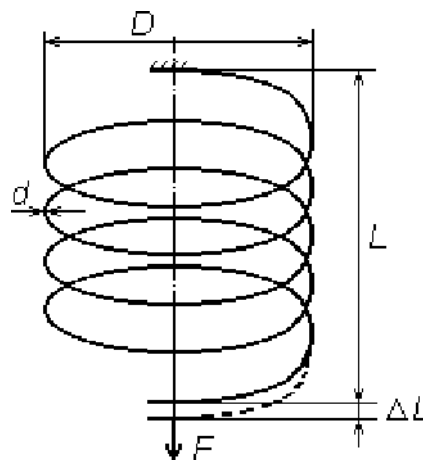


Рис. 1.10.2 – Геометрія пружини

$$\Delta L = \frac{F}{k}, \quad (2)$$

де k – жорсткість пружини. Напрямок дії сили при цьому перпендикулярний виткам, тому подовження пружини визначається модулем зсуву й дається співвідношенням:

$$\Delta L = \frac{8FD^3N}{Gd^4}. \quad (3)$$

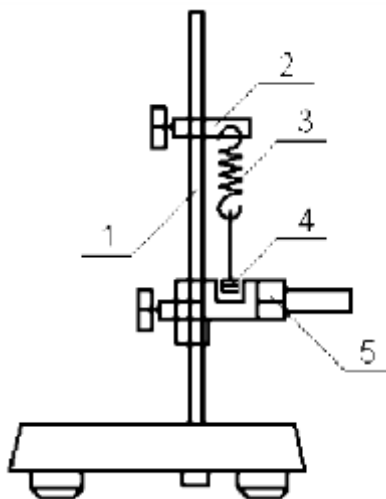


Рис. 1.10.3 – Схема установки

Для визначення модуля зсуву G у роботі використовується пружинний маятник, показаний на рис. 1.10.3. На штативі 1 встановлений кронштейн 2 з вузлом кріплення вертикально підвішених змінних пружин 3. До пружини підвішується набірний вантаж 4. Вимірювання періодів коливань вантажу здійснюється за допомогою фотодатчика 5.

Під дією сил тяжіння й пружності пружини виведений з положення рівноваги вантаж масою m здійснює гармонічні коливання з частотою $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ і періодом $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, звідки для жорсткості пружини маємо:

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2}. \quad (4)$$

Таким чином, вимірявши період коливань й скориставшись формулами (2), (3), (4) з $F = mg$, можна знайти модуль зсуву:

$$G = \frac{32\pi^2 D^3 Nm}{T^2 d^4}. \quad (5)$$

Порядок виконання роботи

1. Кронштейн 2 з вертикально підвішеною пружиною 3 закріпити на вертикальній стійці таким чином, щоб набірний вантаж 4, підвішений на пружину, своєю нижньою площиною збігся з оптичною віссю фотодатчика 5 (оптична вісь співпадає з рисою на фотодатчику).

2. Увімкнути установку перемикачем «МЕРЕЖА» (з дозволу викладача!).

3. Відтягнути вантаж униз й відпустити. При цьому вантаж починає здійснювати коливальні рухи на пружині. Виміряти час t для $n = 15$ повних коливань маятника. Запуск й зупинка секундоміра здійснюється фотоелектричним датчиком. При натисканні на клавішу «ПУСК» починається відлік часу від моменту проходження маятником положення рівноваги. При натисканні кнопки «СТОП» секундомір фіксує тривалість t цілої кількості коливань на момент найближчого за часом проходження маятником положення рівноваги. Кількість коливань n фіксується спеціальним індикатором.

4. Знайти період коливань $T = t/n$. Повторити дослід 5 разів, знайти середнє значення T і його похибку.

5. Повторити завдання п. 3, збільшуючи масу вантажу. Всього провести вимірювання для трьох вантажів m_1 , m_2 , m_3 .

6. Вимкнути установку кнопкою «МЕРЕЖА».

7. Виміряти параметри пружини D , d , N .

8. Для кожного значення $m_{1,2,3}$ вирахувати модуль зсуву $G(m)$ за формулою (5). Знайти усереднене значення G і його похибку.



Рис. 1.10.4 – Загальний вигляд установки

9. Вимкнути обладнання після закінчення дослідів, показати результати викладчу. Загальний вигляд установки показано на рис. 1.10.4.

Питання для допуску

1. Яка деформація називається зсувом?
2. За яких умов деформацію називають пружною?
3. Викласти порядок виконання роботи.
4. Які величини і в яких одиницях вимірюються в роботі?

Контрольні питання

1. Від чого залежить період коливань пружини?
2. Поясніть, чому коефіцієнт пружності k різний для різних металів?
3. Виходячи з формули (3), дайте визначення модуля зсуву.
4. Що характеризують компоненти тензора деформацій?

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. С. 71–91, 206.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1982 416 с.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «МATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

Лабораторна робота № 11

Вимірювання модуля Юнга методом вигину

Мета роботи: вивчення пружних деформацій різних матеріалів.

Прилади й обладнання: установка «модуль Юнга», металеві пластини, набір вантажів.

Зміст роботи

Якщо прями пружний стрижень обома кінцями вільно положити на тверді опори й навантажити у середині вантажем вагою P , то середина стрижня опуститься, таким чином стрижень прогнеться (рис. 1.11.1).

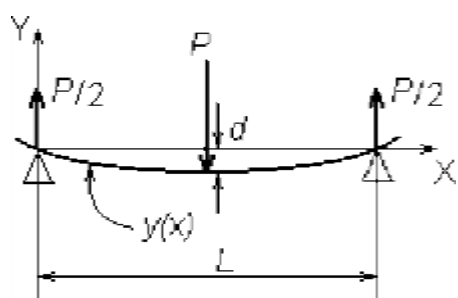


Рис. 1.11.1 – Прогин стрижня під навантаженням

Легко зрозуміти, що при такому прогині верхні шари стрижня будуть стискатися, нижні – розтягуватися, а деякий середній шар, який називають нейтральним шаром, збереже довжину й тільки зазнає викривлення. Переміщення d , яке отримує середина стрижня, називається *стрілою прогину*. Стріла прогину тим більша, чим більше навантаження, й, крім того, вона залежить від форми й розмірів стрижня і від його модуля пружності. Загальний вигляд установки показано на рис. 1.11.2.

Для деформацій розтягування й стискання модуль пружності називається *модулем Юнга* і чисельно дорівнює напрузі (пружній силі, яка припадає на одиницю площі поперечного перетину тіла), яке виникає у зразку при збільшенні (зменшенні) його довжини у два рази.

Знайдемо зв'язок між стрілою прогину й характеристиками пружного стрижня. У цій роботі використовується пластина прямокутного перетину розмірами L (довжина), h (висота), b (ширина). Під дією зовнішньої сили пластина викривляється, і її форма може бути описана функцією $y(x)$ (див. рис. 1.11.1). Сили пружності, які виникають у пластині, пропорційні *кривизні* пластини, таким чином – другій похідній $y''(x)$. Умова рівноваги має вид:

$$EIy''(x) = M(x), \quad (1)$$

де E – модуль Юнга, $I = \frac{bh^3}{12}$ – коефіцієнт, який визначається геометрією пластини; $M(x) = \frac{P}{2}x$ – вигинаючий момент.

Таким чином, отримаємо диференціальне рівняння для форми пластини:

$$y''(x) = \frac{P}{2EI} x,$$

інтегруючи це рівняння, знаходимо:

$$y'(x) = \frac{P}{4EI} x^2 + C.$$

Постійну інтегрування C визначимо з умови рівності нулю похідної $y'(L/2) = 0$, (див. рис. 1.11.1.), звідки

$$C = -\frac{PL^2}{16EI}.$$

Після другого інтегрування маємо:

$$y(x) = \frac{Px^3}{12EI} - \frac{PL^2x}{16EI}. \quad (2)$$

Стріла прогину d за модулем дорівнює зміщенню середини пластини:

$$d = -y\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{PL^3}{4Ebh^3},$$

звідки остаточно:

$$E = \frac{PL^3}{4dbh^3}. \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

1. Встановити одну з досліджуваних пластин 1 на опори 2 (див. рис. 1.11.2). Встановити мікрометричний індикатор 3 таким чином, щоб його кінцівка торкнулася пластини.
2. Підвісити на скобу 4 гирю 5 масою m . За шкалою індикатора визначити величину прогину d . Для підвищення точності повторити виміри 5 разів.
3. Повторити завдання п. 2, збільшуючи масу гирі за допомогою додаткових вантажів. Провести виміри для різних значень мас гирь m_1, m_2, m_3 по 5 разів.
4. Виміряти штангенциркулем розміри пластини.
5. Вирахувати модуль Юнга досліджуваного зразка за формулою (3) для кожної маси гирі, потім знайти середнє значення $\langle E \rangle$.
6. Показати результати викладачу.

Розрахунок похибки

Із формули (3) отримуємо для відносної похибки визначення модуля Юнга за певного значення маси гирі

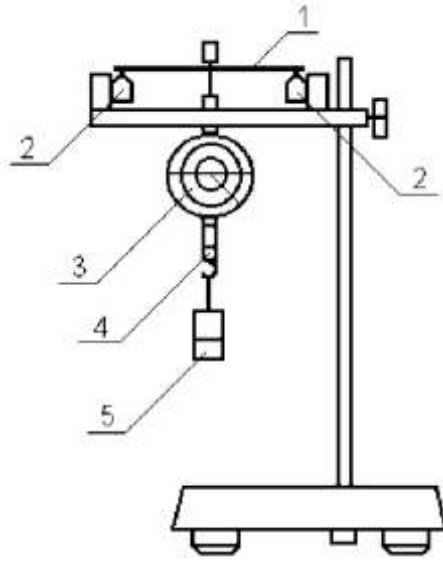


Рис. 1.11.2 – Схема установки

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_p}{P}\right)^2 + 3\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2 + 3\left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2}. \quad (4)$$

Питання для допуску

1. Сформулювати мету роботи.
2. Розказати хід роботи.
3. За якими формулами виконуються розрахунки модуля Юнга та його похибки?
4. Що очікуємо отримати в результаті виконання досліду?
5. Для чого потрібний мікрометр?
6. Для чого потрібно змінювати масу гирі?
7. Що таке стріла прогину?

Контрольні питання

1. Що таке модуль Юнга?
2. Від чого залежить модуль Юнга?
3. Що впливає на міцність металу?
4. Сформулюйте закон Гука.
5. Наведіть формулу енергії пружно деформованого тіла.

Рекомендована література

1. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
2. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики. Львівська політехніка, 2015. 188 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1989. 520 с.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1982. 416 с.
5. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «МATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
6. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА

Лабораторна робота № 1

Вимірювання швидкості звуку у повітрі методом стоячих хвиль

Мета роботи: виміряти швидкість звуку в повітрі та співвідношення C_p/C_v методом стоячих хвиль.

Прибори і приналежності: труба, заповнена повітрям, динамік, мікрофон, двоканальний осцилограф, звуковий генератор.

Методичні вказівки

Коливання густини повітря й пов'язані з ними коливання температури у звуковій хвилі виникають настільки швидко, а теплопровідність повітря настільки мала, що теплообміном у таких процесах можна знехтувати, і тому розповсюдження звуку можна вважати адіабатичним процесом.

Із термодинаміки відомо, що швидкість розповсюдження звуку у газах дорівнює

$$v = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}}, \quad (1)$$

де P – тиск газу, ρ – густина (щільність) газу.

Рівняння першого закону (начала) термодинаміки для адіабатичного процесу має вид $-C_V^\mu dT = PdV$. Враховуючи, що $\gamma = \frac{C_P^\mu}{C_V^\mu}$ і $R = C_P^\mu - C_V^\mu$ (де C_P^μ і C_V^μ – молярні теплоємності при постійному тиску й постійному об'ємі, відповідно, можна отримати:

$$\gamma PdV + VdP = 0. \quad (2)$$

Якщо в цьому рівнянні перейти від об'єму до густини, то воно переписиться у вигляді:

$$\gamma P d\rho - \rho dP = 0, \quad (3)$$

звідки отримаємо:

$$\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_{\text{ад.}} = \gamma \frac{P}{\rho}.$$

Виразимо густину через температуру й тиск, тоді для швидкості звуку отримаємо:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (4)$$

де μ – молярна маса повітря, T – температура повітря.

Але за допомогою запропонованої в роботі установки можна визначити швидкість звуку у повітрі за іншою формулою:

$$v = \lambda f, \quad (5)$$

де λ – довжина звукової хвилі, f – частота звуку. Для вимірювання λ необхідно створити в трубі установки стоячу хвилю, тоді шляхом повільного переміщення каретки з мікрофоном вздовж труби знаходять такі положення мікрофона ℓ і ℓ_1 , за яких на екрані осцилографа з'явиться різке збільшення амплітуди (що відповідає встановленню стоячих хвиль), тоді

$$\lambda = 2(\ell - \ell_1). \quad (6)$$

За допомогою отриманих даних (ℓ , f , λ , v), використовуючи формулу (4), розраховується γ .

Опис експериментальної установки

Для проведення вимірів використовується установка, схема якої зображена на

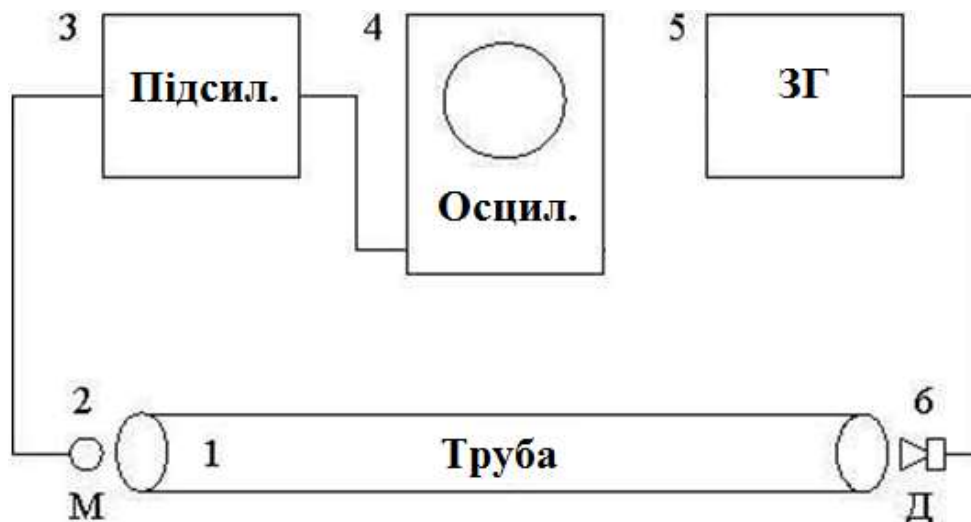


Рис. 2.1.1 – Блок-схема експериментальної установки для вимірювання швидкості звуку методом стоячих хвиль у трубі

Відкрита труба (1) використовується як акустичний резонатор. Приймачем звуку виступає мікрофон (2), розміщений на рухомій каретці і з'єднаний з одним з входів двоканального осцилографа (4). Звуковий генератор (5) з'єднаний з динаміком (6) і розміщений з іншого краю труби, таким чином, щоб звукова хвиля, яка виникає в трубі, мала форму фронту, максимально близького до плоского (рис. 2.1.1).

При проведенні вимірів на екрані двоканального осцилографа можна спостерігати як сигнал з динаміка, так і відгук, що виникає у повітряному стовпі труби. Окрім того, можлива наявність «хибних» максимумів, пов'язаних з нелінійністю амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) апаратури – динаміка і мікрофону, які використовуються в цьому експерименті. Отже, перед початком вимірювань резонансних частот в трубі необхідно виміряти АЧХ системи «мікрофон–динамік».

Порядок виконання роботи

Дослід № 1

Зняття АЧХ системи «мікрофон–динамік».

1. Увімкніть (з дозволу викладача!) звуковий генератор ЗГ, осцилограф, дайте їм прогрітися 2–3 хвилини.
2. Під'єднайте динамік до виходу звукового генератора (ЗГ), мікрофон до входу одного з каналів осцилографа.
3. Розташуйте динамік і мікрофон у найближчому положенні.
4. За допомогою ручки генератора «Частота грубо / точно» (натиснувши її кілька разів і повернувши) оберіть режим «Повітря». За допомогою ручки осцилографа «V» встановіть амплітуду сигналу відгуку вимірювальної системи (приблизно 2/3 шкали осцилографа).
5. Змінюючи частоту генератора в межах від 450 Гц до 2.5 кГц, фіксуйте значення амплітуди сигналу по осцилографу (U_{max}) і відповідну частоту (Гц) з кроком 200 Гц.
6. Занесіть у таблицю максимальні значення амплітуди U_{max} і відповідні частоти, знайдені в цьому інтервалі частот (450÷2 500 Гц).
7. Побудуйте графік залежності U_{max} від частоти f , це буде АЧХ вимірювального тракту.

Дослід № 2

Визначення швидкості звуку.

1. Увімкніть генератор і осцилограф (з дозволу викладача!).
2. Встановіть за допомогою ручки «Частота» звукового генератора значення f в інтервалі (1 500÷2 000 Гц) й досягніть стійкої картини коливальних на екрані осцилографа.

3. Визначте відстань між двома максимумами (мінімумами) у стоячій хвилі. Для цього визначте відстань ℓ від нульової мітки на трубі до першого максимуму (різке збільшення амплітуди сигналу на екрані осцилографа) або мінімуму (різке зменшення амплітуди сигналу). Рухаючи каретку з мікрофоном праворуч, знайти положення другого максимуму (мінімуму) і визначити ℓ_1 .

4. Вимірювання зробіть 5 разів, знайдіть середнє ℓ та ℓ_1 , та їхню похибку.

5. За формулою (6) розрахувати λ , за формулою (5) розрахувати швидкість звуку v , за формулою (4) розрахувати показник адіабати γ та похибки.

6. Змінити частоту сигналу і провести необхідні виміри і розрахунки, вказані в пунктах 3–5.

Загальний вигляд лабораторної установки показано на рис. 2.1.2.



Рис. 2.1.2 – Загальний вигляд лабораторної установки

Питання для допуску до виконання лабораторної роботи

1. Сформулювати мету роботи.
2. Які закони термодинаміки перевіряються у роботі?
3. Яке теоретичне значення γ для повітря, як його визначити?
4. Чому процес розповсюдження акустичних хвиль можна вважати адіабатним?
5. Чим обумовлені похибки експерименту?
6. У якому частотному діапазоні Ви будете проводити вимірювання?
7. Що може змінитися в методиці експерименту, якщо збільшити довжину труби або зменшити її?

Питання для захисту результатів лабораторної роботи

1. Що таке хвиля, і які бувають хвилі?
2. Перерахуйте властивості біжучої і стоячої хвилі.
3. Що таке звукова хвиля?
4. Сформулювати перший закон (начало) термодинаміки для адіабатних процесів.
5. Вивести формулу для γ залежно від числа ступенів свободи молекули газу. Які значення γ для різних газів?
6. Вивести формулу (4).
7. Що таке стоячі хвилі? Де і за яких умов вони виникають?
8. Вивести формули для підрахунку похибок.

Рекомендована література

1. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987. С. 93–94, 134–157.
2. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів; ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1979. С. 44–62, 67–83.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1987. 416 с.
5. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
6. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 2

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 і матеріали: установка для визначення теплоємності металів, набір зразків, секундомір.

Теоретичні відомості

Кількість теплоти ΔQ , яку віддає метал масою m під час охолодження на ΔT градусів, визначається за формулою

$$\Delta Q = mc\Delta T. \quad (1)$$

Якщо охолодження відбувається протягом часу $\Delta\tau$, то (1) можна записати так:

$$\Delta Q = mc \frac{\Delta T}{\Delta\tau} \Delta\tau, \quad (2)$$

де $\frac{\Delta T}{\Delta\tau}$ – швидкість охолодження металу.

Величину ΔQ можна також обчислити на підставі закону охолодження Ньютона:

$$\Delta Q = \alpha(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})S\Delta\tau, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт теплообміну (тепловіддачі), ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$); S – площа поверхні зразка; $T_{\text{п}}$ і $T_{\text{с}}$ – температури поверхні охолоджуваного зразка і навколишнього середовища.

Прирівнюючи (2) і (3), отримаємо

$$mc \frac{\Delta T}{\Delta\tau} = \alpha(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})S. \quad (4)$$

Вважають, що величини $\frac{\Delta T}{\Delta\tau}$, α , $T_{\text{п}}$, $T_{\text{с}}$, які фігурують у формулах (1) і (3), не залежать від координат точок зразків металів. Це, звичайно, потрібно забезпечити за умовами досліду.

Запишемо вираз (4) для двох зразків однакової форми і розмірів (еталонного і досліджуваного) вважаючи, що $T_{\text{п}1} = T_{\text{п}2}$, $\alpha_1 = \alpha_2$ (перше наближення) і

температура T_c в обох випадках є сталою, поділивши один вираз на інший, отримаємо:

$$c_2 = \frac{c_1 m_1 \left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1}{m_2 \left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2}, \quad (5)$$

де $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1$ і $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2$ – швидкості охолодження зразків металу за однакової температури (їх визначають експериментально).

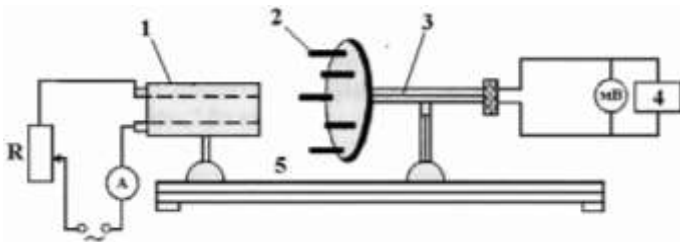


Рис. 2.2.1 – Установа для визначення питомої теплоємності металів методом охолодження

Отже, питому теплоємність досліджуваного металу c_2 можна визначити, порівнюючи швидкість його охолодження зі швидкістю охолодження еталонного зразка. Для цього використовують спеціальну установку, показану на рис. 2.2.1.

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 2).

Хід роботи

1. Увімкнути блок 1 і 2 лабораторної установки (рис. 2.2.2) перемикачем «Мережа» (з дозволу викладача!).
2. Ручкою 3 «Зразок» виставити значення 1 (перший зразок).
3. Кнопкою 5 «Нагрівання» увімкнути нагрів муфельної печі 1.
4. Дочекатися досягнення температури по індикатору 4 значення 120 °С (при цьому автоматично вимкнеться нагрів і увімкнеться охолодження).
5. З цього моменту часу, як увімкнулося охолодження, починаємо відлік часу t по секундоміру і через кожну хвилину охолодження знімаємо показники температури T по індикатору 4, до досягнення значення ~ 20 °С (кімнатна температура).
6. Значення температури T зразка та часу t за секундоміром при охолодженні записати у таблицю.
7. Побудувати графік залежності температури зразка від часу $T = f(t)$.
8. Аналогічні дослідження (п. 2–7) виконати для зразка 2.

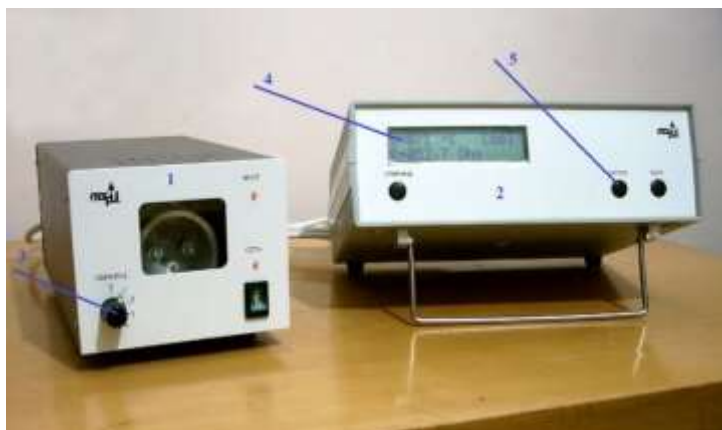


Рис. 2.2.2 – Загальний вигляд лабораторної установки

9. Визначити швидкості охолодження з графіків $T = f(t)$, значення зміни температур ΔT для різних зразків виміряти, взявши однакові проміжки часу Δt для обох зразків.

10. За формулою (5) визначити c_2 , узявши 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 .

11. Обчислити абсолютну і відносну похибки експерименту.

12. Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№ з/п	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1, \text{K/c}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2, \text{K/c}$	$C_2,$ Дж/кг·К	$\sigma_{c2},$ Дж/кг·К	$E, \%$
-------	---	---	-------------------	---------------------------	---------

Питання для допуску

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.

Контрольні питання

1. Що називають теплоємністю? У яких одиницях її вимірюють?
2. Як на підставі цієї роботи можна перевірити закон Дюлонга і Пті?
3. Чому площі S_1 і S_2 зразків повинні бути однаковими?
4. Визначити кількість теплоти, яку віддає 1 кг міді при охолодженні від температури 100 °С до 20 °С. Питому теплоємність міді взяти з довідника.

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987. 395 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1979. 551 с.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1987. 416 с.
5. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
6. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 3

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом нагріву і охолодження

Мета роботи: дослідити явища переносу; виміряти коефіцієнт теплопровідності.

Прилади і матеріали: експериментальна установка з термостатом, досліджуване тіло.

Вказівки до виконання роботи

У термодинамічних нерівноважних системах виникають *необоротні процеси*, які мають назву явищ переносу, унаслідок яких відбувається просторовий перенос енергії (теплопровідність), маси (дифузія) і імпульсу (внутрішнє тертя або в'язкість). Для цих процесів характерним є те, що перенос енергії, маси та імпульсу завжди відбувається у напрямку, оберненому градієнта їхнього просторового розподілу, тобто система наближається до термодинамічної рівноваги.

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

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

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

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

Із рівняння Фур'є можна отримати: $\lambda = \left| \frac{\Delta Q}{\frac{\partial T}{\partial x} \Delta S \Delta \tau} \right|$ і дати таке визначення коефіцієнта теплопровідності: *коефіцієнт теплопровідності* чисельно дорівнює кількості теплоти, що переноситься через одиницю площі поперечного перерізу тіла за одиницю часу за градієнта температури, який дорівнює одиниці.

Практичне вимірювання величин, які входять у наведене рівняння Фур'є, пов'язане з певними труднощами, тому краще розглядати процеси, в яких можна легко і точно виміряти всі величини, що входять до розрахункової формули для визначення λ . Один з таких процесів – *регулярний режим нагрівання*.

Нехай нагріте до деякої температури T тіло, внесене в середовище, яке добре проводить тепло (наприклад, вода). Температура цього середовища підтримується

сталою і дорівнює T_0 . Унаслідок теплопровідності різниця температур тіла та середовища $T - T_0 = \Delta T$ постійно зменшуватиметься і в момент встановлення рівноваги дорівнюватиме нулю. Закон цього зменшення, тобто функція $\Delta T = f(\tau)$, залежить від розмірів та форми тіла, його теплофізичних властивостей, а також від того, як було нагріте тіло (рівномірно чи ні) перед початком досліду. У початковій стадії теплообміну цей закон є досить складним.

Поступово настає так званий регулярний режим нагрівання (або охолодження), за якого різниця температур між будь-якою точкою зразка та навколишнім середовищем залежить від часу за експоненціальним законом. Якщо внутрішня теплопровідність значно більше, ніж коефіцієнт тепловіддачі, то всередині встановлюється майже однорідна температура (якщо на всій поверхні також вона однакова), і тоді можна записати рівняння охолодження тіла у формі

$$\Delta T(x, \tau) = A e^{-a\tau}. \quad (1)$$

Величина a у формулі (1) називається темпом нагрівання (чи охолодження) і пов'язана з властивостями тіла:

$$a = \frac{\lambda S}{cm}, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, c – питома теплоємність тіла; m – маса тіла, S – площа поверхні тіла.

Таким чином, визначення коефіцієнта теплопровідності λ зразка з відомими густиною речовини ρ та питомою теплоємністю c полягає у визначенні темпу нагрівання a . З цією метою вимірюють різницю температур між зразком і зовнішнім середовищем у різні моменти часу.

Згідно з рівнянням (1),

$$\ln \Delta T = \ln A - a\tau.$$

Залежність $\ln \Delta T = f(\tau)$ після настання регулярного режиму на графіку має вигляд прямої з кутовим коефіцієнтом a (рис. 2.3.1).

Щоб знайти темп нагрівання a , на прямолінійній ділянці графіка вибирають довільно (але на досить великій відстані одна від одної) точки 1 і 2. Для цих точок визначають моменти часу τ_1 та τ_2 , а також відповідні їм значення логарифмів різниці температур $\ln \Delta T_1$ і $\ln \Delta T_2$.

Тоді темп нагрівання розраховують за формулою:

$$a = \frac{\ln \Delta T_1 - \ln \Delta T_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (3)$$

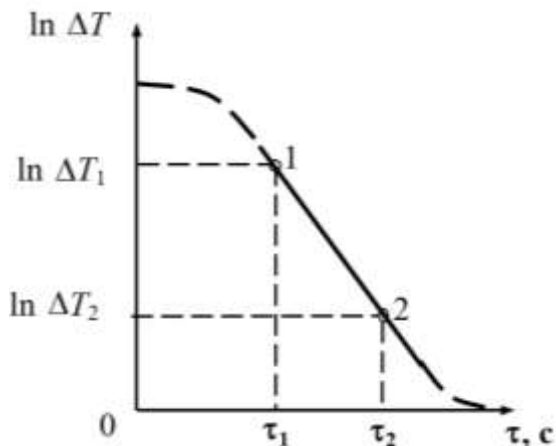


Рис. 2.3.1 – Графік охолодження

Після визначення темпу нагрівання можна знайти коефіцієнт теплопровідності λ за формулою (2).

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

Температуру вимірюють за допомогою термометра або датчика термостата.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою, загальний вид якої представлено на рис. 2.3.2. Увімкнути термостат та довести воду у посудині до потрібної температури (задається викладачем). Температура води протягом усього дослідження підтримується автоматично після досягнення потрібного значення.

2. Виміряти масу досліджуваного тіла, знайти площу поверхні, визначити опір термодатчика за кімнатної температури, питома теплоємність тіла визначається з довідника.

3. Занурити тіло у воду. Температуру зразка T вимірювати за допомогою індикатора термостата.



Рис. 2.3.2 – Загальний вид лабораторної установки

4. Після ≈ 3 хвилин нагріву зразка зафіксувати опір термодатчика за сталої температури термостата.

5. Далі вийняти зразок з термостата, підвісити на штатив і проводити вимірювання опору датчика, пропорційного температурі, кожні 2 хвилини. Тривалість дослідження має тривати до охолодження зразка до кімнатної температури (досягнення значення опору з п. 2).

6. Результати записати в табл. 1.

7. Розрахувати різницю між температурою зразка та водою $\Delta T = T - T_0$ і записати її в табл. 1.

8. Побудувати графік залежності $\ln \Delta T = f(\tau)$ та за формулою (3) визначити темп нагрівання a .

9. За формулою (2), знаючи S , c , m , a , розрахувати коефіцієнт теплопровідності тіла.

Таблиця 1

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

Контрольні запитання

1. Які явища переносу вам відомі?
2. Дайте визначення явища теплопровідності.
3. Запишіть закон Фур'є для явища теплопровідності.
4. Що називається коефіцієнтом теплопровідності? Поясніть його фізичний зміст.
5. Від чого залежить теплопровідність твердих тіл?
6. Дайте визначення градієнта температури.
7. Поясніть фізичний зміст знаку «мінус» в законі Фур'є.
8. Що таке регулярний режим нагрівання? Запишіть закон зміни температури залежно від часу за регулярного режиму.
9. Поясніть практичне значення коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів.

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Савельєв И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1987. 416 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2. М.: Наука, 1977. 551 с.
4. Телеснин Р. В. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1973. 287 с.
5. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
6. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 4

Градування напівпровідникового термоперетворювача опору

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи термостата і з методикою градування напівпровідникових перетворювачів опору; використовуючи отримані результати, побудувати залежність опору від температури, визначити коефіцієнти, які використовуються в апроксимуючій кривій.

Прибори й принадлежности: циркуляційний термостат WCB-11, термоперетворювач MF58-502/3950, цифровий мультиметр.

Схема роботи термостата

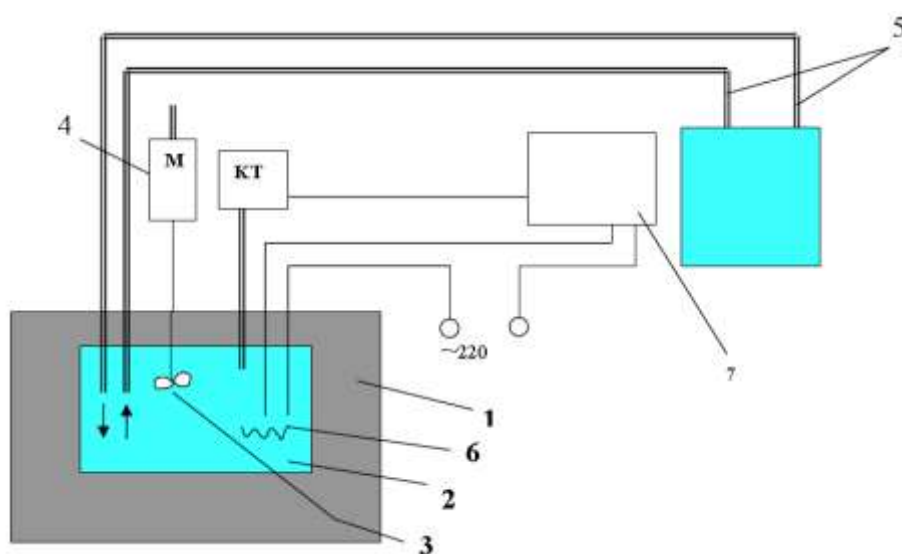


Рис. 2.4.1 – Схема рідинного термостата

Термостатом називається пристрій для підтримання температури у визначеному об'ємі. Є різні методи класифікації термостатів, які поділяють за наступними основними ознаками: за тривалістю експлуатації (активні, пасивні), типом теплового захисту, типом регулюючого впливу, типом регуляторів й іншими ознаками.

У лабораторній роботі використовується рідинний циркуляційний термостат з мікропроцесорним керуванням (див. рис. 2.4.1).

Термостат являє собою ізольований від зовнішнього середовища резервуар 1, наповнений термостатною рідиною 2. Залежно від умов роботи й діапазону регульованих температур, у ролі термостатної рідини може використовуватися дистильована вода (0–100 °С), метиловий або етиловий спирт (–60–30 °С), чистий або з домішками води гліцерин (+30–160 °С), мінеральні мастила (+70–200 °С).

Рідина у термостаті інтенсивно перемішується мішалкою 3, що приводиться в обертання електромотором 4. Одночасно мотор змушує працювати подвійний насос, конструктивно виконаний разом з мішалкою (на схемі не наведений).

У результаті дії насоса рідина може прокачуватися через будь-яку систему, підключену до вхідного і вихідного патрубків 3 термостата. Нагрівання термостатної рідини здійснюється за



Рис. 2.4.2 – Схема циркуляційного термостата WCB6/11

температуру з точністю до $\pm 0,5$ К.

Схема регулятора включає в себе: підсилювач, реле, що керує увімкненням силового ланцюга, й силовий ланцюг, що складається з двох увімкнених зустрічно тиристорів й нагрівача. Якщо температура рідини у термостаті нижче заданого значення, то струм через контактний термометр не проходить. У цьому випадку з підсилювача йде постійна напруга на реле, яке відкриває тиристорний ключ і, таким чином, через нагрівач йде струм. Температура рідини у термостаті буде збільшуватися. Якщо температура рідини буде більшою за задане значення, струм, що йде через контактний термометр, буде створювати зміщення підсилювача, сигнал на реле не буде йти, тиристорний ключ закриється, струм через нагрівач не піде, й температура рідини у термостаті буде зменшуватися.

Схема циркуляційного термостата WCB6/11 показана на рис. 2.4.2.

татної рідини здійснюється за допомогою електропідігрівача 6. Температура рідини у резервуарі контролюється ртутним термометром.

Регулювання і підтримання температури на необхідному рівні виконується автоматично. Чутливим елементом схеми автоматичної стабілізації температури є ртутно-скляний електроконтактний термометр типу ТПК з магнітним налаштуванням верхнього контакту.

Контактний термометр входить до електричного ланцюга автоматичного регулятора. У термостаті використовується двопозиційна схема автоматичного регулювання, яка дозволяє підтримувати

Напівпровідникові термоперетворювачі опору (ТО)

Для вимірювання у середньому діапазоні температур широко використовуються напівпровідникові ТО. Напівпровідникові термоперетворювачі опору належать до найбільш простих напівпровідникових пристроїв. Простота пристрою у поєднанні з різко вираженою нелінійною залежністю величини опору від температури привела до широкого використання ТО в автоматичній, електроніці, термометрії та інших галузях.

Робочий діапазон напівпровідникових ТО визначається наступним чином: нижня межа повинна відповідати температурі, за якої напівпровідник стає ізолятором, а верхня межа – так званої допустимої температури, вище якої в напівпровіднику відбуваються незворотні зміни.

Основними параметрами напівпровідникових ТО є:

- 1) величина опору $R_{ном}$ за температури навколишнього середовища 20 °С;
- 2) величина температурного коефіцієнта опору (т. к. о.) B – у відсотках на 1 К;
- 3) постійна величина τ , яка характеризує теплову інерційність ТО;
- 4) максимально допустима температура t_{max} ;
- 5) максимально допустима потужність розсіювання P_{max} тощо.

Температурна залежність опору є головною характеристикою напівпровідникових ТО.

Для більшості типів ТО з негативним т. к. о., з достатньою для практики точністю, температурна залежність опору апроксимується виразом:

$$R = Ae^{B/T}. \quad (1)$$

Постійна A залежить від фізичних властивостей матеріалу й габаритів ТО, постійна B залежить від фізичних властивостей матеріалу, вона називається температурним коефіцієнтом опору.

Температурний коефіцієнт опору визначається за формулою:

$$B = \frac{d \ln R}{d(\frac{1}{T})}. \quad (2)$$

За формулами (1), (2) визначають постійні A і B для такого типу напівпровідникового ТО.

Істотним недоліком напівпровідникових матеріалів є відсутність відтворюваності градууювальної характеристики. Отож, напівпровідникові ТО навіть одного й того ж типу не взаємозамінні й мають індивідуальне градуювання.

У лабораторній роботі проводиться градуювання напівпровідникових ТО типу ММТ-4 і КМТ-4. ТО типу КМТ зроблені на основі кобальто-марганцевих,

а ММТ – мідно-марганцевих оксидних напівпровідників. Робочий діапазон температур ММТ-4 і КМТ-4 від -60 до 125 °С.

Загальний вид лабораторної установки показано на рис. 2.4.3.

Порядок підготовки і проведення експерименту. Обробка результатів

1. Ознайомитися з принципом роботи циркуляційного термостату згідно з його інструкцією з експлуатації.

2. Ввімкнути цифровий мультиметр у режимі вимірювання опору й виміряти опір ТО за кімнатної температури.

3. Занурити ТО, що досліджується, у термостат, підключити до цифрового мультиметра, закрити кришку термостата.

4. Увімкнути термостат кнопкою «Power» (з дозволу викладача!) і впевнитися у циркуляції рідини по шлангу.

5. Налаштувати температуру нагріву термостата («heating») на $+60$ °С.

6. Увімкнути нагрівач термостата.

7. Провести градування ТО через 5 °С до максимальної температури, встановленої раніше, спостерігаючи за поточною температурою нагріву на дисплеї термостата й фіксуючи величину опору ТО з цифрового мультиметра.

8. Завершивши роботу, вимкнути термостат.

9. Використовуючи отримані результати, побудувати залежність опору напівпровідникових ТО від температури в координатах $\ln R - \frac{1}{T}$, визначити постійні A і B .



Рис. 2.4.3 – Загальний вид лабораторної установки

Питання для допуску

1. Які величини вимірюються в роботі?
2. Поясніть порядок виконання роботи.

Контрольні питання

1. Поясніть роботу термостата і електроконтактного термометра.
2. Поясніть фізичний зміст зміни опору ТО залежно від температури.
3. Чи можна діелектрики використати як термоперетворювачі опору?
4. Чи можна метали використати як термоперетворювачі опору?

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
3. Шефтель И. Т. Терморезисторы. М.: Наука, 1973. 470 с.
4. Геращенко О. А., Гордов А. Н., Лах В. И. Температурные измерения. Справочник. Киев: Наукова думка, 1984. 303 с.
5. Руководство по эксплуатации циркуляционного термостата WCB-6/11/22.
6. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 5

Вимірювання швидкості звуку у твердих тілах

Мета роботи: вимірювання швидкості звуку у твердих тілах резонансним методом.

Приналежності: металеві стрижні, резонатор, генератор синусоїдальних електричних коливань, осцилограф.

Теоретичні відомості й опис прибору

Розглянемо циліндричний стрижень з однорідного матеріалу. Будемо впливати на один з кінців стрижня періодичною, наприклад, синусоїдальною силою, викликаючи почергове стиснення і розтягнення у напрямку довжини стрижня. Тоді внаслідок взаємодії між частинками стрижня поздовжні коливання будуть поширюватися уздовж стрижня від частинки до частинки. Уздовж стрижня буде розповсюджуватися пружна хвиля. Частота хвилі збігається з частотою зовнішньої сили.

Дійшовши кінця стрижня, пружна хвиля відіб'ється від межі розділу стрижень–повітря і буде рухатися в зворотному напрямку. При накладанні зустрічних хвиль однакової амплітуди і частоти виникнуть особливі коливання.

Особливості їхні полягають у тому, що коливатися будуть не всі точки стрижня. Частина з них залишиться нерухомими. Їх називають *вузлами* хвилі.

Між сусідніми вузлами частинки матеріалу коливаються в однаковій фазі, але з різними амплітудами в різних точках. Точки, в яких амплітуда досягає максимального значення, називаються *пучностями* хвилі.

Такий тип коливань з характерним просторовим розподілом амплітуд – чергуванням вузлів (нулів) і пучностей (максимумів) – отримав назву *стоячої хвилі*.

Нехай, наприклад, стрижень жорстко закріплений посередині і вільний на кінцях. При порушенні поздовжніх коливань у місці затиску стрижня частки знаходяться в спокої, їхня амплітуда коливань дорівнює нулю. Тут знаходиться вузол зміщення частинок. На вільних кінцях стрижня досягаються максимальні амплітуди зсувів – пучності (рис. 2.5.1 а), б)).

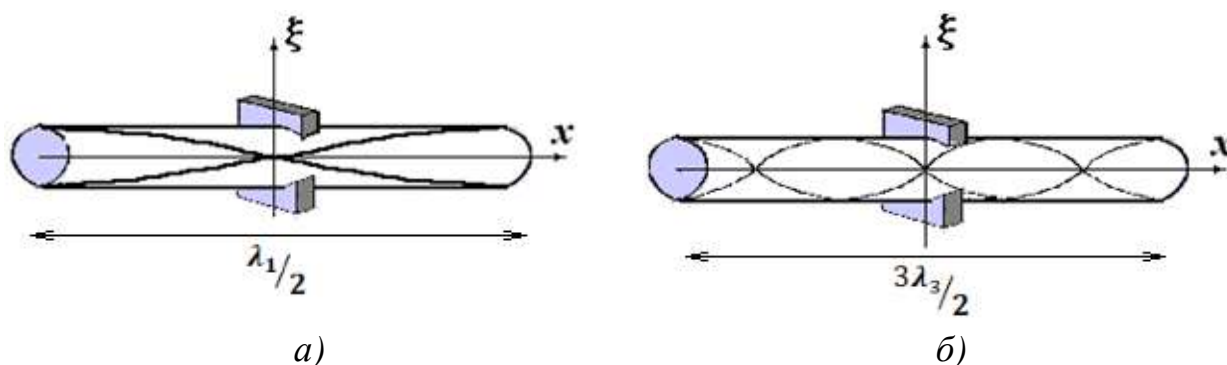


Рис. 2.5.1 – Розподіл вузлів і пучностей вздовж стрижня

На рисунку синусоїдами показані зміщення ξ різних частинок стрижня через половину періоду. Відстань між двома сусідніми пучностями дорівнює половині довжини хвилі. Отже, в стрижні збуджуються тільки такі коливання, половина довжини хвилі $\lambda/2$ яких укладається на довжині стрижня непарне число разів $n = 1, 3, 5, \dots$.

$$L = n \frac{\lambda}{2}. (n = 1, 3, 5 \dots). \quad (1)$$

На рис. 2.5.1а) показаний випадок $n = 1$, на рис. 2.5.1б) – випадок $n = 3$. Перепишемо формулу (1) інакше

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}.$$

Таким довжинам хвиль відповідають частоти f_n :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L} n, (n = 1, 3, 5 \dots), \quad (2)$$

де v – фазова швидкість пружної хвилі або швидкість звуку в речовині. Частоти f_n називаються *власними частотами* стрижня.

У випадку $n = 1$ частота $f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L}$ називається основною власною частотою. Саме ця частота використовується у роботі. З останньої формули можна знайти швидкість звуку

$$v = 2Lf. \quad (3)$$

Суть резонансного методу визначення швидкості звуку полягає у наступному. Частоту зовнішньої сили, яка прагне почергово стиснути або розтягнути стрижень, підбирають так, щоб вона дорівнювала власній частоті коливань стрижня. В цьому випадку амплітуда вимушених коливань сильно зростає – спостерігається резонанс. Цього й досягають у роботі. Зафіксувавши резонансну частоту, а отже і власну частоту, можна за формулою (3) визначити швидкість розповсюдження поздовжніх хвиль (швидкість звуку) у стрижні.

Прибор (рис. 2.5.2) складається з жолоба-резонатора і стрижня з матеріалу, у якому вимірюється швидкість розповсюдження звукової хвилі.

Металевий циліндричний стрижень жорстко закріплюється в центрі ваги всередині резонатора.

На кінцях резонатора встановлені електромагнітні джерело поздовжніх коливань D і приймач P .

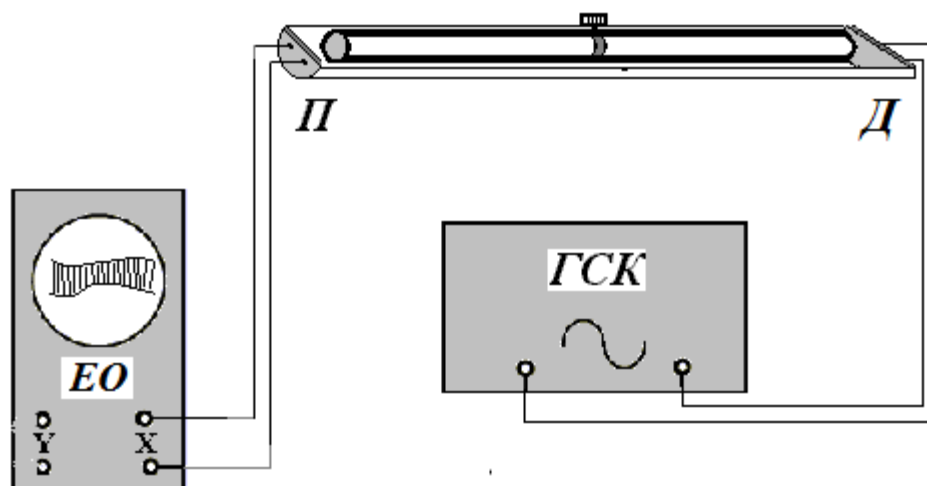


Рис. 2.5.2 – Схема з'єднання пристроїв

Щоб збудити поздовжні коливання в стрижні, джерело повинно викликати на правому кінці позмінне стиснення і розтягнення в напрямку довжини. Для цього від генератора до котушки збудження джерела підводиться змінна електрична напруга. У котушці виникає змінне магнітне поле, яке проходить крізь тонкий повітряний зазор і діє на правий кінець феромагнітного (сталевого) стрижня. У поздовжньому магнітному полі в стрижні виникають механічні сили, що змінюють його довжину. Це явище деформації феромагнетиків при їхньому намагнічуванні називається *магнітострикцією*.

Звернений до джерела кінець стрижня починає коливатися з частотою генератора, яку в досліді можна змінювати.

Приймач П розташований поблизу протилежного кінця стрижня і відокремлений від нього також тонким повітряним зазором. Поздовжні коливання лівого кінця стрижня перетворюються електромагнітом приймача в електричний сигнал, амплітуда якого пропорційна амплітуді поздовжніх коливань стрижня. Величина сигналу вимірюється за допомогою осцилографа.

Очевидно, сигнал приймача буде максимальним при резонансі. Якщо стрижні виготовлені зі слабкомагнітних матеріалів (алюміній, латунь), то для збудження коливань на кінцях їх запресовуються шайби з феромагнітного матеріалу.

Порядок роботи

1. Встановити у резонатор (жолоб) один з досліджуваних стрижнів.
2. Закріпити стрижень затиском на його середині. Неточне закріплення впливає на результат вимірювань.
3. За допомогою щупа й відповідних регуляторів встановити повітряні зазори між джерелом, приймачем коливань й торцями стрижня приблизно 0,1 мм.

4. Увімкнути тумблер «Мережа» (з дозволу викладача!) на задній панелі ГСК і на осцилографі. На дисплеї ГСК показується режим роботи «Метал» і значення частоти коливань.

5. «Рівень» сигналу встановити на 100 % (натиснувши на ручку генератора й потім обертаючи її).

6. Плавнo змінюючи ручками «Частота грубо-точно» частоту збудження джерела й слідкуючи по осцилографу за сигналом приймача, досягти різкого значного збільшення амплітуди сигналу на екрані осцилографа. Записати значення резонансної (а, відповідно, і власної) частоти стрижня.

7. Дослід повторити п'ять разів.

8. За формулою (3) вирахувати швидкість звуку у стрижні. Довжину стрижнів прийняти $L = 300 \pm 1$ мм.

9. Зазначені виміри зробити зі стрижнями зі сталі, дюралюмінію і латуні, отримані і вираховані дані занести до таблиці 1.

Таблиця 1

Матеріал зразка	L , мм	$f_{\text{рез}}$, Гц	v , м/с	$\langle v \rangle$, м/с	σ_v , м/с	$\frac{\sigma_v}{v}$, %
Сталь	300					
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
Алюміній	300					
1.						
Латунь	300					

Контрольні питання

1. Як виникає стояча хвиля? Які умови виникнення стоячої хвилі? Що таке вузли й пучності стоячої хвилі?
2. Чим стояча хвиля відрізняється від бігучої?
3. Чому дорівнює відстань між двома сусідніми вузлами стоячої хвилі, між двома сусідніми пучностями, між сусідніми пучністю й вузлом?
4. Що називається власними частотами стрижня? Який зі стрижнів, що досліджуються у роботі, має найбільшу частоту основного тону?

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987. 395 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1979. 551 с.
4. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. С. 203–207, 209.
5. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
6. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 6

Вимірювання швидкості звуку у повітрі фазовим методом

Мета роботи: виміряти швидкість звуку у повітрі фазовим методом.

Приналежності: хвилевід з динаміком і мікрофоном, генератор синусоїдальних електричних коливань, цифровий двоканальний осцилограф.

Теоретичні відомості й опис установки

Між швидкістю звуку v , його частотою f й довжиною звукової хвилі λ є співвідношення

$$v = \lambda f. \quad (1)$$

Частоту звуку в лабораторних умовах визначають за частотою коливань джерела звуку. Задача знаходження швидкості звуку зводиться до експериментального визначення довжини звукової хвилі λ . Це досягається методом зсуву фаз.

Схема установки зображена на рис. 2.6.1.

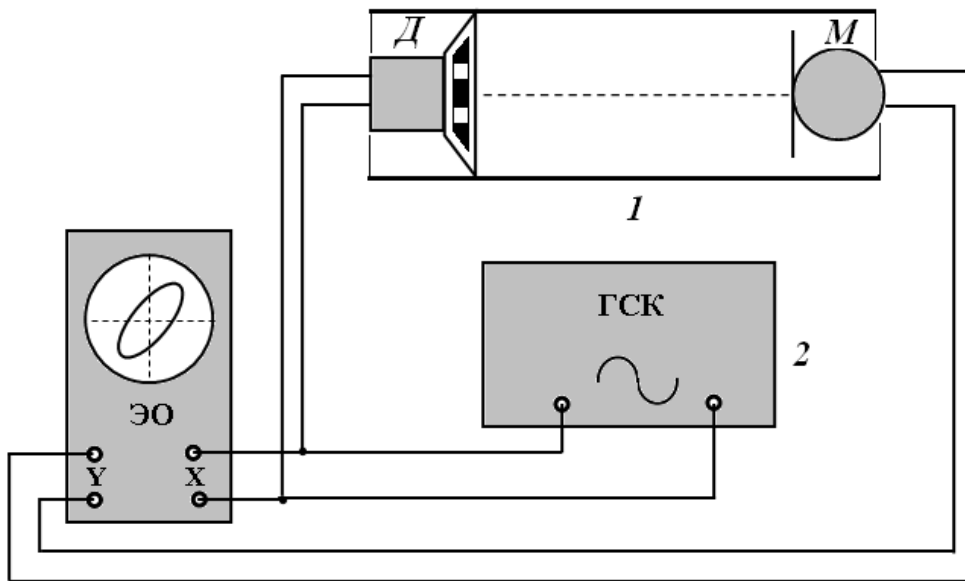


Рис. 2.6.1 – Схема з'єднання пристроїв

На штативі закріплений акустичний хвилевід (1) – труба, уздовж осі якої у повітрі можуть розповсюджуватися звукові хвилі.

Джерелом звукових хвиль є електродинамічний гучномовець – динамік (Д). Динамік отримує струм від генератора синусоїдальних коливань ГСК (2). Під дією електричного струму, сила котрого змінюється з деякою частотою f , динамік випромінює звукові хвилі тієї ж частоти.

Динамік нерухомо закріплений на лівому кінці труби. На іншому кінці повітряного каналу знаходиться *приймач* звуку – мікрофон (M), який може переміщуватися уздовж труби. Для виміру відстані між динаміком і мікрофоном передбачена міліметрова шкала.

В акустичному хвилеводі встановлюється режим бігучої хвилі. Динамік збуджує коливання частинок повітря, породжуючи у повітрі згущення й розрідження частинок – «гребні» і «западини» хвилі, котрі біжать у напрямі розповсюдження хвилі зі швидкістю v . Звукові хвилі досягають мікрофону M і породжують у його ланцюгу змінну напругу тієї ж частоти f , котру випромінює динамік.

За час, який дорівнює періоду коливань, «гребінь» хвилі проходить відстань, яка називається довжиною хвилі λ

$$\lambda = vT,$$

де v – швидкість хвилі, T – період коливань.

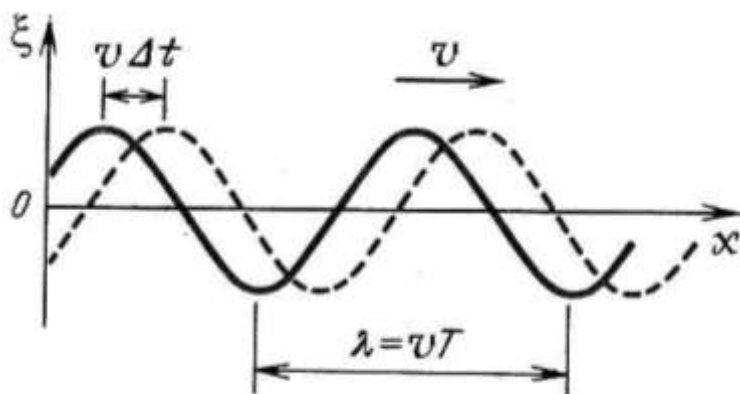


Рис. 2.6.2 – Схема розповсюдження хвилі

Довжину хвилі можна визначити також як відстань між найближчими точками середовища, які коливаються з різницею фаз, що дорівнює 2π .

На рис. 2.6.2 суцільна крива зображує зміщення ξ з положення рівноваги різних точок (частинок) у деякий момент часу. У наступний момент часу розповсюдження зміщень зображується штриховою лінією.

Картину розповсюдження хвилі можна уявити собі, якщо синусоїду привести у рух зі швидкістю v уздовж осі X .

Якщо між динаміком і мікрофоном на довжині ℓ вкладається ціле число $n = 1, 2, 3, \dots$ довжин хвиль λ

Якщо між динаміком і мікрофоном на довжині ℓ вкладається ціле число $n = 1, 2, 3, \dots$ довжин хвиль λ

$$\ell = n\lambda,$$

то коливання у динаміку і мікрофоні будуть відбуватися в однаковій фазі, таким чином різниця фаз коливань буде дорівнювати $2\pi, 4\pi$ і т. д.

Задача експерименту полягає у тому, щоб дослідним шляхом визначити положення точок середовища, які знаходяться на відстані $n\lambda$ від динаміка.

Цю задачу можна розв'язати методом зсуву фаз.

Подамо електричні коливання від динаміка і мікрофона на осцилограф (ЕО) наступним чином:

- від динаміка на вхід горизонтально відхиляючих пластин («Вхід X »);
- від мікрофона на вхід вертикально відхиляючих пластин («Вхід Y »).

Тоді промінь електронно-променевої трубки осцилографа буде брати участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях однакової частоти.

Якщо матеріальна точка бере участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях з однаковими частотами

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_1), \quad y = B \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (2)$$

то траєкторія результуючого руху точки являє собою еліпс, рівняння якого має вигляд:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - 2 \frac{xy}{AB} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (3)$$

Форма еліпса на площині (x, y) залежить від різниці фаз $\delta = (\varphi_2 - \varphi_1)$. У окремому випадку, коли складаються синфазні коливання, (різниця їхніх фаз дорівнює нулю або парному числу π : $\delta = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$), рівняння (3) набуває вигляд:

$$\left(\frac{x}{A} - \frac{y}{B}\right)^2 = 0,$$

звідки виходить рівняння прямої:

$$y = \frac{B}{A} x. \quad (4)$$

Пряма проходить через початок координат й лежить у першому й третьому квадрантах (рис. 2.6.3). Точка – відбиття електронного променя на екрані осцилографа – рухається уздовж цієї прямої.

Це відбувається, коли на шляху між динаміком і мікрофоном вкладається ціле число довжин хвиль.

Якщо змінити відстань між динаміком и мікрофоном на $\lambda/2$, то різниця фаз двох взаємноперпендикулярних коливань, у яких бере участь електронний промінь, складе π , й рівняння траєкторії результуючого коливання прийме вид

$$y = -\frac{B}{A} x, \quad (5)$$

а на екрані осцилографа буде пряма лінія, яка проходить через початок координат і другий й четвертий квадранти (рис. 2.6.3).

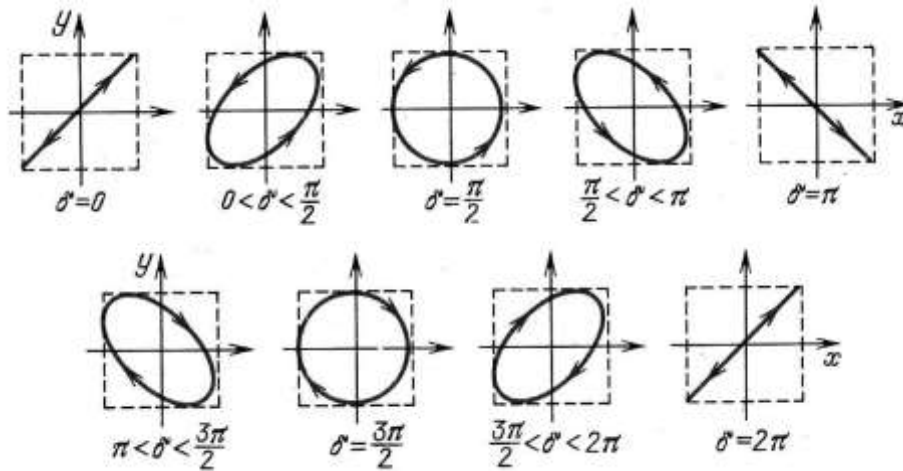


Рис. 2.6.3 – Фігури Ліссажу для різних зсувів фаз

При плавному переміщенні мікрофона виникає безперервна зміна різниці фаз, і форма еліпса також змінюється безперервно, вироджуючись по черзі то в одну, то в іншу пряму (рис. 2.6.3).

Картина на екрані повторюється при зміні різниці фаз на 2π радіан, коли положення мікрофона, задовольняє умову $\ell = n\lambda$. Звідси $\lambda = \ell/n$, і за формулою (1) швидкість звуку у повітрі за умов експерименту дорівнює

$$v = \frac{\ell}{n} f. \quad (6)$$

Загальний вигляд установки показано на рис. 2.6.4.

Порядок роботи

1. Увімкнути осцилограф, генератор ГСК установки (з дозволу викладача!), дати їм прогрітися.
2. На дисплеї ГСК при увімкненні буде режим «Метал». Щоб змінити на «Повітря», необхідно натиснути й утримувати ручку «Частота–режим» на ГСК. На дисплеї повинен з'явитися «Рівень 50 %», далі натиснути ще, з'явиться «Режим», поворотом ручки обрати «Повітря», буде добре чути звук з динаміка. Для повернення до основного екрана натисніть ручку на ГСК ще раз.
3. Ручкою «Частота грубо–точно» встановити частоту коливань джерела звуку 1 500 Гц. Значення частоти з'явиться на дисплеї.
4. Регулюючи ручкою «Рівень» (з п. 2) й ручками підсилення каналу осцилографа, упевнитися в тому, що амплітуда сигналів на осцилографі при пересуванні мікрофона уздовж хвилеводу достатня для проведення вимірів.

5. Отримати на екрані осцилографа стійке зображення еліпса.

6. Пересуваючи мікрофон M , отримати на екрані пряму, яка проходить через перший й третій квадранти декартових координат ($\Delta\varphi = 0$). Записати положення ℓ_0 мікрофона по шкалі.

7. Оскільки кожне наступне повторення первісної картини буде відповідати зміні різниці фаз на 2π радіан, то, повільно переміщуючи мікрофон відносно динаміка (починаючи з мінімальної відстані), виміряти положення ℓ_n мікрофона, при якому на екрані осцилографа буде видно ту ж саму пряму лінію. Порахувати число n повторних появ такої прямої на екрані осцилографа. Очевидно

$$\ell = \ell_n - \ell_0.$$

8. Дослід повторити для трьох частот в діапазоні між 1 000 і 3 000 Гц (частота задається викладачем).

9. Виконати обрахунки швидкості звуку у повітрі за формулою (6) і знайти похибку вимірювання швидкості.

10. Порівняти отримані результати з теоретичними $v = v_0\sqrt{1 + \alpha t}$, де t – температура повітря у градусах Цельсія, v_0 – швидкість звуку при нулі градусів Цельсія ($v_0 = 331$ м/с), $\alpha = 0,004$. Результати вимірювань записати в таблицю.

№ з/п	f , Гц	ℓ_0 , м	ℓ_n , м	ℓ , м	n	v , м/с	$\langle v \rangle$, м/с	σ_v , м/с	E , %
1.									
2.									
3.									



Рис. 2.6.4 – Загальний вид установки

Контрольні питання

1. Який механізм розповсюдження звукових хвиль у повітрі? Звукові хвилі у повітрі поздовжні чи поперечні? Чому?
2. Що називається довжиною хвилі? Який зв'язок між довжиною хвилі, швидкістю і періодом?
3. Чи вплине на кінцевий результат врахування наступних двох факторів:
 - а) хвилі, що випромінюються динаміком, не є плоскими;
 - б) при розповсюдженні цих хвиль у повітрі виникає поглинання енергії.

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987. 395 с.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1987. 416 с.
4. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1967. 352 с.
5. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
6. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.
7. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 7
Вивчення броунівського руху на основі комп'ютерної моделі.
Дослід Перрена та визначення постійної Больцмана

Мета роботи: визначити часову залежність середнього квадрата зміщення броунівської частинки, перевірити співвідношення Ейнштейна для коефіцієнта дифузії.

Прилади й принадлежности: комп'ютер з ПО Mathcad.

Опис установки

Програма на комп'ютері в пакеті MathCad генерує випадкові блукання броунівської частинки. Час блукання фіксується числом випадкових стрибків уздовж декартових осей тривимірного простору. Це число фіксоване і задає усі випадкові зміни швидкості і координати частинки (див. рис. 2.7.1).

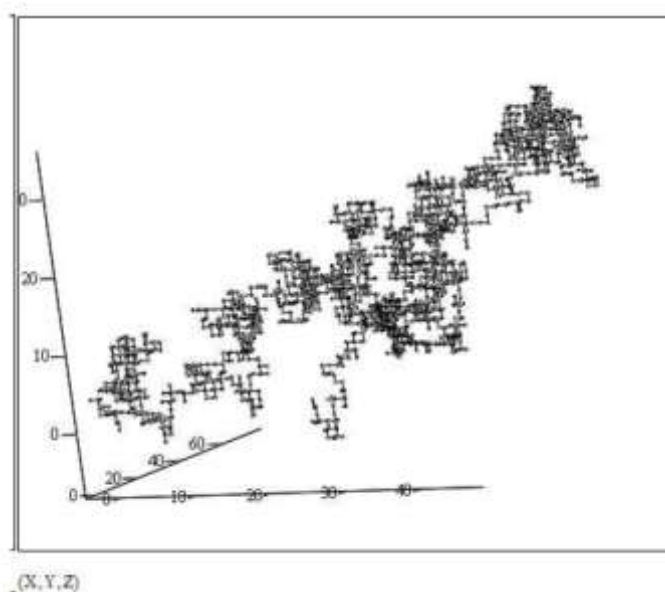


Рис. 2.7.1 – Траєкторія руху броунівської частинки

У реальному експерименті така ситуація не реалізується, оскільки неможливо візуально зафіксувати такий хаотичний рух. Під час експерименту Перрена кожні 30 с визначалося положення частинки на координатній сітці з масштабом 3.125 мкм на одну поділку. Для спостережень Перрен використовував винайдений у 1902 р. ультрамікроскоп, який дозволяв бачити найдрібніші частинки завдяки розсіюванню на них світла від потужного бокового освітлювача. Частинки гуммігута (згущений сік деяких тропічних дерев) були практично однакового розміру радіусом $a = 0.53$ мкм. Під мікроскопом спостерігалось величезне число жовтих кульок. У воду додавався гліцерин, щоб була підвищена в'язкість і були

відсутні внутрішні потоки, які спотворюють броунівський рух. Програма фіксує положення частинки кожні 30 умовних секунд і проектує її зміщення на координатну площину xu подібно мікроскопу (див. рис. 2.7.2).

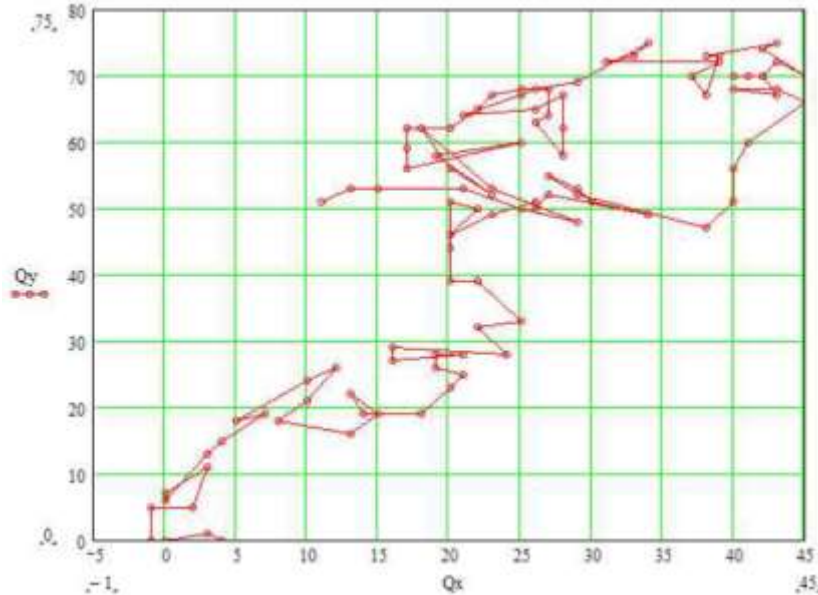


Рис. 2.7.2 – Фрагмент траєкторії броунівської частинки у збільшеному форматі

Нагадаємо, що одиниці поділу сітки відповідає 3.125 мкм. Курсором мишки можна визначити координати кожного положення частинки і знайти в результаті довжину кожної ділянки шляху. Необхідно обчислити суму квадратів довжин усіх ділянок шляху за певний час. Відзначимо, що кожну i -у ділянку шляху r_i частка проходить за 30 с. Обробивши зазначені вимірювання, будемо графік залежності $\langle r^2(t) \rangle = \sum (r_i^2)$ від часу. За нахилом прямої $\langle r^2(t) \rangle = 4Dt$ визначається коефіцієнт дифузії D , який згідно зі співвідношенням Ейнштейна, дорівнює $D = k_B T v$, де k_B – стала Больцмана, T – температура в Кельвінах, v – рухливість частинки, яка визначається як $v = \frac{V}{F}$, де V – швидкість частинки, F – сила, що діє на частинку. Враховуємо, що у нас двовимірний простір. Рухливість частинки визначається за формулою Стокса: $F = 6\pi\eta aV$, звідси

$$v = \frac{1}{6\pi\eta a}, \quad (1)$$

де η – в'язкість рідини, a – радіус частинки.

Методичні вказівки

Відомо, що дифузійний потік частинок $J = nv$ визначається законом Фіка:

$$J = -D \frac{dn}{dx}, \quad (2)$$

де n – об’ємна концентрація частинок, v – швидкість частинки, D коефіцієнт дифузії. Броунівський рух описує стохастичне диференціальне рівняння Ланжевена (одновимірний випадок):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{1}{v} \frac{dx}{dt} + F(t). \quad (3)$$

Перший член праворуч описує силу тертя, обумовлену в’язкістю рідини з коефіцієнтом $\frac{1}{v}$ за швидкості $\frac{dx}{dt}$, v – рухливість частинки. Другий доданок – це випадкова сила $F(t)$, викликана взаємодією молекул рідини з броунівською частинкою. При цьому середня сила $\langle F(t) \rangle = 0$, а корелятор $\langle F(t_1)F(t_2) \rangle = b\delta(t_1-t_2)$, де $\delta(t_1-t_2)$ – дельта-функція Дірака. З рівняння (3) випливає, що середня швидкість $\langle v \rangle = 0$, а середній квадрат швидкості $\langle v^2 \rangle = \frac{bB}{2m}$. Середня кінетична енергія частинки

$$\langle E \rangle = \frac{m\langle v^2 \rangle}{2} = \frac{k_B T}{2}, \quad (4)$$

тобто

$$\langle v^2 \rangle = \frac{k_B T}{m}. \quad (5)$$

Можна показати, що $\langle x \frac{dx}{dt} \rangle = mv \langle v^2 \rangle$. Тоді, з огляду на попереднє рівняння, маємо

$$\frac{d\langle x^2(t) \rangle}{dt} = 2\langle x \frac{dx}{dt} \rangle = 2mv \langle v^2 \rangle. \quad (6)$$

Підставляючи у (6) вираз (5) для середнього від квадрата швидкості, отримаємо

$$\frac{d\langle x^2(t) \rangle}{dt} = 2vk_B T. \quad (7)$$

Інтегруючи (7), маємо для одновимірного випадку

$$\langle x^2(t) \rangle = 2Bk_B Tt. \quad (8)$$

Таким чином, середнє значення квадрата зміщення броунівської частинки пропорційне часу спостереження, тобто те, що і спостерігав Перрен у своєму експерименті. У двовимірному просторі (наш випадок) маємо

$$\langle r^2(t) \rangle = 4\nu k_B Tt, \quad (9)$$

у тривимірному просторі

$$\langle r^2(t) \rangle = 6\nu k_B Tt.$$

Очевидно, що співвідношення Ейнштейна $D = k_B T\nu$ для коефіцієнта дифузії не залежить від розмірності простору.

Порядок виконання роботи

1. Завантажити програму BrownLabModel.mcd в пакеті MathCad.
2. У робочому вікні програми клікнути мишкою у поле формули

$$W^{<K+1>} := W^{<K>} + Step^{<floor(rnd(6))>}$$

і натиснути клавішу F9 для генерації випадкового блукання частинки.

3. Розрахувати в'язкість краплі, вважаючи, що в краплі 99,8 % води і 0,2 % гліцерину. В'язкість води $\eta = 1.002 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, в'язкість гліцерину $\eta = 1.49 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

4. За формулою Стокса (1) розрахувати рухливість ν броунівської частинки.

5. Внести в таблицю координати частинки за кожні 30 секунд. На фото траєкторії частинок під мікроскопом помістити курсор в поле графіка і клікнути правою кнопкою миші. Відкриється контекстне меню. Клацнути в ньому на підменю «Слід» (Trace). Відкриється таблиця координат точки. Курсором мишки клікнути на початковій точці руху (координата (0,0)). На клавіатурі клавішею правої стрілки фіксуємо положення 15–20 точок. За цими координатами знаходимо квадрат довжини пройденого шляху за час $30 \cdot n$, де n – число прямих відрізків шляху частинки.

6. Побудуйте графік залежності квадрата пройденої відстані від часу.

7. Знайдіть тангенс кута нахилу лінійної залежності. Отриману величину нахилу прямої прирівняти до $4 k_B T\nu$. Очевидно, що її чверть дорівнює коефіцієнту дифузії. За співвідношенням Ейнштейна, знаючи величину рухливості за температури 20 °С, знайти сталу Больцмана k_B .

8. Зі співвідношення $k_B N_A = R$, де $R = 8.31$ Дж/моль · К газова стала, знайти число Авогадро N_A .

9. Знайти число молекул у краплині води масою 1 г.

10. Визначити кінетичну енергію броунівської частинки за температури 20 °С, якщо її маса дорівнює $290 \cdot 10^{-15}$ кг.

Питання для допуску

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Що називається броунівським рухом.
3. Як фіксував положення частинок Перрен в експерименті.
4. Як визначався пройдений частинкою шлях і які масштаби вимірювань.
5. Розрахувати похибку вимірювання сталої Больцмана k_B .

Контрольні питання

1. Який механізм руху броунівської частинки.
2. Чи є цей рух доказом справедливості молекулярно-кінетичної теорії Максвелла–Больцмана?
3. Записати рівняння, яке описує рух броунівської частинки.
4. Записати співвідношення Ейнштейна для коефіцієнта дифузії.
5. Чому дорівнює середня швидкість броунівської частинки.
6. Як визначити середню кінетичну енергію частинки.
7. Як залежить від часу середня відстань від початку шляху і середній квадрат пройденого частинкою шляху.
8. Знаючи число Авогадро, знайти число атомів вуглецю в 1 г.

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1987. 416 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2. М.: Наука, 1977. 551 с.
4. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
5. Русаков В. Ф. Молекулярна фізика. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 68 с.
6. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 8

Вимірювання універсальної газової сталої

Мета роботи: визначити універсальну газову сталу.

Прилади й принадлежности: скляний балон з відростком, манометр, насос, технічні терези з важелями.

Опис установки

Загальний вигляд установки представлений на рис. 2.8.1. Балон *Б* має кран *К*, що дозволяє з'єднати його з манометром *М* і насосом *Н*.

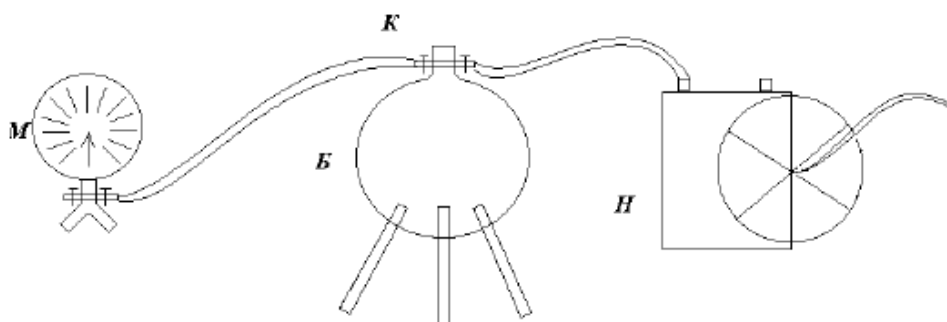


Рис. 2.8.1 – Схема з'єднання пристроїв установки

Методичні вказівки

Тиск P , об'єм V і абсолютна температура T ідеального газу маси m пов'язані рівнянням Клапейрона–Менделєєва:

$$PV = \frac{m}{\mu}RT, \quad (1)$$

де μ – молярна маса газу, R – універсальна газова стала. Запишемо рівняння (1) для двох станів газу в балоні об'ємом V після двох відкачувань повітря за температури T :

$$P_1V = \frac{m_1 - m_0}{\mu}RT,$$

$$P_2V = \frac{m_2 - m_0}{\mu}RT,$$

де P_1 і P_2 – тиск газу в балоні після першого і другого відкачування відповідно, m_1 і m_2 – маси балона з газом (повітрям) після відкачування, m_0 – маса

порожнього балона. Виключаючи m_0 з цих рівнянь, отримуємо для R наступну формулу:

$$R = \frac{\mu(P_1 - P_2)V}{(m_1 - m_2)T} \quad (2)$$

Порядок виконання роботи

1. Балон B об'ємом $V = 2,5$ л з відкритим краном зважити на технічних терезах і визначити початкову масу m_1 балона з повітрям.

2. Помістити балон в утримувач балона, з'єднати його трубками з манометром і насосом. Відкачати з балона повітря. Дослід повторити п'ять разів, змінюючи ступінь відкачування. Манометр дозволяє виміряти різницю тисків $\Delta P = P_1 - P_2$.

3. Закрити кран K , ізолювавши балон від навколишнього середовища, від'єднати трубки, що з'єднують балон з манометром і насосом, і визначити масу m_2 балона з повітрям після відкачування.

4. Виміряти температуру повітря в лабораторії. В результаті проведення трьох вимірювань були отримані наступні результати:

№ з/п	m_1 , г	m_2 , г	$\Delta P \cdot 10^5$ Па	T , К	R Дж/(моль · К)	σ_R
1	323,5	321,0	0,85	293		
2	323,6	320,9	0,90	293		
3	323,6	329,8	0,94	293		

5. Використовуючи отримані дані за формулою (2), обчислити значення універсальної газової сталої R .

6. Отримати формулу для стандартної похибки σ_R і обчислити σ_R . Результат представити у стандартній формі.

Питання для допуску

1. Який фізичний зміст універсальної газової сталої R ?
2. Вивести формулу для підрахунку похибки величини R .
3. Що є джерелом похибок експерименту?
4. Як перевести міліметри водяного стовпа у Паскалі?
5. Чому дорівнює тиск в 1 кгс/см² у Паскалях?

Контрольні питання

1. Що називають ідеальним газом?
2. Як зображуються графіки ізопроцесів в координатах (P, V) ; (P, T) ; (V, T) ? Сформулюйте закони: а) Бойля–Маріотта; б) Гей-Люссака; в) Шарля; г) Авогадро; д) Дальтона.
3. Що називають: а) ізотермічним коефіцієнтом стисливості χ ; б) ізобаричним коефіцієнтом об'ємного розширення (коефіцієнтом теплового розширення) α ; в) температурним (термічним) коефіцієнтом тиску β ?
4. Що називають числом Лошмідта?
5. Виведіть формулу (2).
6. Виведіть основне рівняння МКТ і слідства з нього.

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2. М.: Наука, 1977. 551 с.
4. Телеснін Р. В. Молекулярна фізика. М.: Вища школа, 1973. С. 16–35, 98–100.
5. Русаков В. Ф. Молекулярна фізика. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 68 с.
6. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

Лабораторна робота № 9

Вимірювання відношення молярних теплоємностей повітря

Мета роботи: виміряти відношення молярних теплоємностей повітря методом, заснованим на адіабатичному розширенні газу.

Прилади й принадлежности: скляний балон, U-подібний манометр, насос, секундомір.

Увага! У цій лабораторній роботі необхідно виконати тільки розрахункову частину, побудувати графіки на міліметровому папері і відповісти на контрольні питання. Для звіту необхідно:

1. Після виконання розрахунків заповнити протокол вимірювань (див. Додаток), в який вже внесені результати вимірювань.
2. Графіки побудувати на міліметровці.
3. Дати короткі письмові відповіді на контрольні питання. Необхідний матеріал можна знайти в лекціях або в рекомендованій літературі.

Опис експериментальної установки

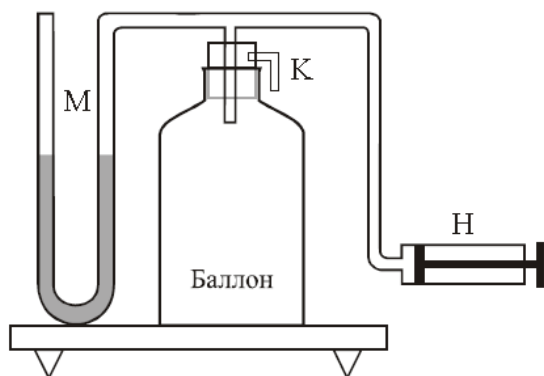


Рис. 2.9.1 – Загальний вигляд установки

Установка складається зі скляного балона, з'єданого з відкритим U-подібним манометром M і насосом H (рис. 2.9.1). Балон закритий пробкою, в яку вставлений клапан K .

Адiabатичний (адіабатний) процес – це процес, який відбувається без теплообміну з зовнішнім середовищем. Адіабатні процеси протікають у системах, оточених теплоізолюючою (адіабатною) оболонкою, але їх можна реалізувати і за відсутності такої оболонки. Для цього процес має протікати настільки швидко, що за час його

здійснення не відбулося теплообміну між системою і навколишнім середовищем.

У балон нагнітається повітря до певної різниці рівнів рідини в колінах манометра. Через 3–4 хвилини температура повітря в балоні буде дорівнювати температурі навколишнього середовища. При цьому об'єм газу буде V_1 , тиск P_1 і температура T_1 (стан 1 на рис. 2.9.2). Потім на короткий час відкривається клапан до балона, і повітря адіабатично переходить у стан 2 (рис. 2.9.2). Для адіабатного переходу з першого стану у другий виконується рівняння Пуассона:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma, \quad (1)$$

де γ – відношення молярної теплоємності газу за сталого тиску до його молярної теплоємності за сталого об'єму. Цей коефіцієнт називають *показником адіабати*. При цьому $\Delta T < 0$, оскільки робота з розширення газу відбувається за рахунок внутрішньої енергії. Через 3–4 хвилини після закриття клапана повітря нагрівається ізохорно до кімнатної температури T_1 , причому тиск підвищується до величини P_3 (стан 3 на рис. 2.9.2).

Порівнюючи третій стан газу з першим станом, ми бачимо, що вони належать одній ізотермі. Згідно із законом Бойля–Маріотта:

$$P_1 V_1 = P_3 V_2. \quad (2)$$

З рівнянь (1) і (2) можна знайти γ . Для цього підносимо рівняння (2) у ступінь γ і ділимо його на рівняння (1):

$$\frac{P_1^\gamma V_1^\gamma}{P_1 V_1^\gamma} = \frac{P_3^\gamma V_2^\gamma}{P_2 V_2^\gamma}.$$

Логарифмуючи цей вираз, знаходимо γ :

$$\gamma = \frac{\ln \frac{P_1}{P_2}}{\ln \frac{P_1}{P_3}}. \quad (3)$$

Отриману формулу можна спростити. Позначимо різницю рівнів рідини у манометрі у першому стані (1) через H , а в третьому – (3, рис. 2.9.2) через h_0 . В цьому випадку:

$$P_1 = P_2 + \alpha H, \quad P_3 = P_2 + \alpha h_0, \quad (4)$$

де α – перевідний коефіцієнт для переходу від різниці рівнів рідин Δh до тиску P . У кожному з цих виразів другий доданок в правій частині малий порівняно з першими доданками. Зі співвідношення (4) отримаємо:

$$P_2 = P_1 - \alpha H, \quad P_3 = P_1 - \alpha(H - h_0)$$

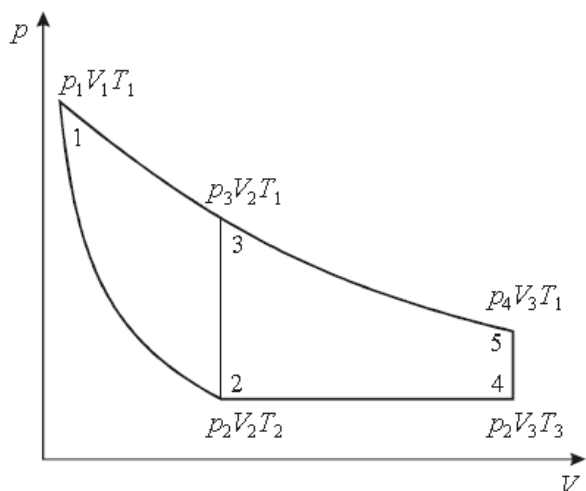


Рис. 2.9.2 – Діаграма P–V

і підставимо у формулу (3).

$$\gamma = \frac{\ln \frac{P_1}{P_1 - \alpha H}}{\ln \frac{P_1}{P_1 - \alpha(H - h_0)}}.$$

Розділивши почленно чисельник і знаменник на p_1 , отримаємо:

$$\gamma = \frac{\ln \frac{1}{1 - \frac{\alpha H}{P_1}}}{\ln \frac{1}{1 - \frac{\alpha(H - h_0)}{P_1}}}.$$

Величини $\frac{\alpha H}{P_1}$ і $\frac{\alpha(H - h_0)}{P_1}$ багато менше одиниці. Для малих значень x справедливий вираз: $\ln(1 - x) \approx -x$.

Застосовуючи його, отримуємо:

$$\gamma = \frac{\frac{\alpha H}{P_1}}{\frac{\alpha(H - h_0)}{P_1}} = \frac{H}{H - h_0}. \quad (5)$$

За цією формулою проводиться обчислення γ . Величина h_0 , що входить у формулу (5), отримана з припущенням, що клапан K закривається у момент закінчення адіабатичного процесу 1–2. Якщо клапан закрити до або після завершення процесу 1–2, то це призведе відповідно до завищення або заниження величини γ порівняно з її дійсним значенням. Для отримання правильного результату вимірювань клапан необхідно закрити у той момент, коли газ знаходиться у стані 2, що не представляється можливим. Зважаючи на це, ординату 2–3, відповідну різниці рівнів h_0 , доводиться визначати непрямым шляхом. Розглянемо з цією метою процес адіабатичного розширення при відкритому клапані з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем під час протікання процесу 2–4 (рис. 2.9.2). Припустимо, що газ знаходиться у стані 1. Натисканням клапана K зробимо адіабатичне розширення (1–2). При цьому температура газу знизиться відносно кімнатної температури T_1 до величини T_2 , тиск буде дорівнювати атмосферному P_2 . Якщо клапан залишити відкритим протягом часу τ після закінчення процесу 1–2, то температура газу в балоні за цей час дещо підвищиться за рахунок теплообміну до величини T (ізобаричний процес 2–4). Закриємо після цього клапан і залишимо балон на деякий час, поки температура всередині балона не буде дорівнювати температурі навколишнього середовища T_1 (ізохоричний процес 4–5). При цьому тиск газу в посудині підвищиться на величину Δp , яку

визначимо манометром як різницю рівнів рідини. Зі зменшенням часу τ величина h , як це видно з рис. 2.9.3, зростає, і коли $\tau \rightarrow 0$, вона прагне до згаданого значення h_0 . Отже, величину h_0 , можна визначити, маючи отриманий експериментально графік залежності $\ln h$ від τ . Можна показати, що в умовах нашого досліду має місце співвідношення: $\ln h = \ln h_0 - A\tau$, тобто спостерігається лінійна залежність $\ln h$ від часу τ , причому початкова ордината дорівнює логарифму шуканої величини h_0 . Тут A – кутовий коефіцієнт прямої, що залежить від умов досліду. Отримавши на досліді ряд значень $\ln h$, які відповідають різним значенням τ від одного і того ж початкового тиску P , можна побудувати графік залежності $\ln h = f(\tau)$. Знаючи, що графік являє собою лінійну функцію (у чому ми переконаємося безпосередньо на підставі експериментально отриманих точок), можемо екстраполювати його до перетину з віссю ординат. Ордината точки перетину

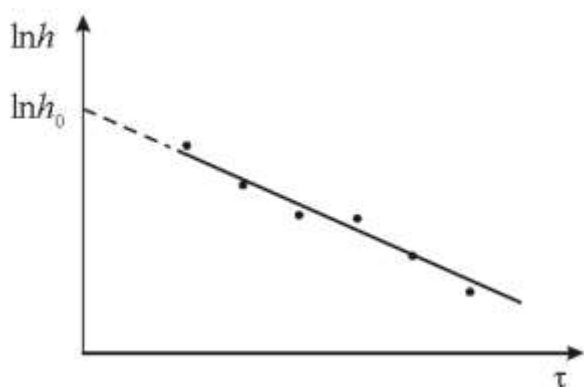


Рис. 2.9.3 – Залежність логарифма різниці рівнів рідини від часу

відповідає логарифму шуканої величини h_0 (рис. 2.9.3).

Порядок виконання роботи

1. Накачати у балон повітря так, щоб різниця рівнів рідини в манометрі стала дорівнювати 25–30 см. Залишити балон на 3–4 хвилини, поки температура всередині його не буде дорівнювати температурі навколишнього середовища. Після цього відрахувати показання манометра L_1 і L_2 . Вимірювання робити

по нижньому краю меніска.

2. Швидким натисканням відкрити клапан K і одночасно включити секундомір. Витримати клапан відкритим $\tau = 5$ секунд і закрити. Тиск в балоні буде дорівнювати атмосферному (рівні рідини зрівнялися), а температура знизиться. Почекавши 3–4 хвилини, щоб температура в балоні підвищилася до кімнатної (рівні рідини розійшлися), відрахувати показання манометра ℓ_1 і ℓ_2 .

3. Повторити вимірювання згідно з п. 1–2, відкриваючи клапан на $\tau = 10, 15, 20, 25$ і 30 секунд. При цьому початковий рівень рідини в колінах манометра кожен раз встановлювати на ту ж поділку, що і в першому досліді.

4. Розрахувати $H = L_1 - L_2$.

5. Розрахувати $h = \ell_1 - \ell_2$.

6. Знайти значення $\ln h$.

7. За отриманими даними побудувати графік $\ln h = f(\tau)$.

8. Знайти значення $\ln h_0$, відповідне $\tau = 0$ (рис. 2.9.3), і визначити h_0 .
9. Розрахувати показник адіабати за формулою (5).

Контрольні питання (відповіді представити у письмовому вигляді)

1. У чому полягає мета роботи?
2. За якою формулою Ви будете розраховувати показник адіабати? Поясніть сенс позначень, що входять у формулу.
3. Який процес називається адіабатичним (адіабатним)?
4. Запишіть рівняння, що описує адіабатний процес (рівняння Пуассона). Наведіть схематичний графік цього процесу.
5. Розрахуйте теоретичне значення показника адіабати повітря і порівняйте його зі значенням, знайденим експериментально. Зробіть висновок.

Рекомендована література

1. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
2. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987. 395 с.
3. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «МАТНСАД». К.: НУХТ, 2011. 114 с.
4. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
5. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

ПРОТОКОЛ

вимірювань до лабораторної роботи

Вимірювання відношення молярних теплоємностей повітря

Виконав(ла) _____

Група _____

№, з/п	τ , с	L_1 , см	L_2 , см	H , см	l_1 , см	l_2 , см	h , см	$\ln h$
1	5	10,0	31,0		18,2	22,8		
2	10				18,9	22,2		
3	15				19,3	21,8		
4	20				19,6	21,4		
5	25				19,9	21,2		
6	30				20	21,1		

 $\ln h_0 =$ _____

ЗМІСТ

Загальні положення щодо оформлення лабораторних робіт та розрахунків похибок.....	3
МЕХАНІКА.....	6
Лабораторна робота № 1. Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою машини Атвуда	6
Лабораторна робота № 2. Вивчення законів обертового руху за допомогою маятника Обербека	10
Лабораторна робота № 3. Вимірювання швидкості польоту «кулі» балістичним методом за допомогою крутильного маятника.....	15
Лабораторна робота № 4. Вивчення законів зіткнення тіл.....	21
Лабораторна робота № 5. Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника.....	26
Лабораторна робота № 6. Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою фізичного маятника.	29
Лабораторна робота № 7. Вимірювання швидкості польоту кулі за допомогою балістичного маятника	36
Лабораторна робота № 8. Гіроскоп.....	40
Лабораторна робота № 9. Вимірювання моменту інерції твердого тіла методом крутильних коливань.....	48
Лабораторна робота № 10. Вимірювання модуля зсуву за допомогою пружинного маятника	52
Лабораторна робота № 11. Вимірювання модуля Юнга методом вигину....	55
МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА.....	59
Лабораторна робота № 1. Вимірювання швидкості звуку в повітрі методом стоячих хвиль	59
Лабораторна робота № 2. Вимірювання питомої теплоємності металів методом охолодження.....	64
Лабораторна робота № 3. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом нагріву і охолодження	68

Лабораторна робота № 4. Градування напівпровідникового термоперетворювача опору	72
Лабораторна робота № 5. Вимірювання швидкості звуку у твердих тілах ..	77
Лабораторна робота № 6. Вимірювання швидкості звуку в повітрі фазовим методом	82
Лабораторна робота № 7. Вивчення броунівського руху на основі комп'ютерної моделі. Дослід Перрена та визначення постійної Больцмана	88
Лабораторна робота № 8. Вимірювання універсальної газової сталої.....	93
Лабораторна робота № 9. Вимірювання відношення молярних теплоємностей повітря.....	96

Навчальне видання

Русаков Володимир Федорович
Пицюга Володимир Григорович
Пишкін Роман Олександрович
та інші.

**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»)

За загальною редакцією Русакова В. Ф.

Редактор
Технічний редактор

А. О. Цяпало
Т. О. Важеніна

Підписано до друку 27.12.2019
Формат 60 x 84/16. Папір офсетний.
Друк – цифровий. Умовн. друк. арк. 6,04
Тираж 50 прим. Зам. 108

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