

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ ІНСТИТУТ

«Затверджую»
Директор АДІДВНЗ«ДонНТУ»
_____ М.М. Чальцев
«14»березня 2011р.

Кафедра «Загальнонаукові дисципліни»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З РОЗДІЛУ КУРСУ ФІЗИКИ «МЕХАНІКА»
ГАЛУЗІ ЗНАНЬ 0701 "ТРАНСПОРТ І ТРАНСПОРТНА
ІНФРАСТРУКТУРА" ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ –
6.070106 "АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ",
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0601 – "БУДІВНИЦТВО І АРХІТЕКТУРА",
НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.060101 – "БУДІВНИЦТВО"
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0401 – "ПРИРОДНИЧІ НАУКИ"
НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.040106 – "ЕКОЛОГІЯ, ОХОРОНА
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ"**

15/27-2011-04

ЗАТВЕРДЖЕНО:
навчально-методична
комісія факультету
"Автомобільні дороги"
Протокол № 6 від 16.02.11

ЗАТВЕРДЖЕНО:
кафедра
«Загальнонаукові дисципліни»
Протокол № 5 від 31.01.11

ЗАТВЕРДЖЕНО:
навчально-методична
комісія факультету
" Автомобільний транспорт "
Протокол № 6 від 15.02.11

УДК 538 (07)

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з розділу курсу фізики «Механіка» галузі знань 0701 "Транспорт і транспортна інфраструктура" для студентів напряму підготовки – 6.070106 "Автомобільний транспорт", галузь знань 0601 – "Будівництво і архітектура", напрям підготовки 6.060101 – "Будівництво", галузь знань 0401 – "Природничі науки" напрям підготовки 6.040106 – "Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування" [Електронний ресурс]/ укладачі: А. М. Галіахметов, М. П. Єфремова, О.І. Уколов. Електрон. дані.– Горлівка: ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ, 2011. – 1 електрон. опт. диск (CD-R); 12 см. – Систем. вимоги: Pentium; 32 RAM; WINDOWS 98/2000/NT/XP; MS Word 2000. – Назва з титул. екрану.

Містять 8 лабораторних робіт, методику їхнього виконання, запитання і задачі для їх захисту. Наведено рекомендації для обробки експериментальних даних за допомогою ЕОМ та таблицю коефіцієнтів Стьюдента.

Укладачі:

Галіахметов А.М., к.ф. – м. н.,
доцент
Єфремова М.П.
Уколов О.І.

Відповідальний за випуск:

Галіахметов А.М., к.ф. – м. н.,
доцент

Рецензент:

Сирота В.М., к.т.н., доцент, каф.
«Технічна експлуатація автомо-
білів»

© Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
Автомобільно-дорожній інститут, 2011.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ.....	4
Лабораторна робота № 1. Відпрацьовування методики проведення вимірів і розрахунку їхніх помилок за допомогою установки для визначення питомого опору резистивного проводу.....	5
Лабораторна робота № 2. Перевірка другого закону ньютонa при поступальному русі.	14
Лабораторна робота № 3. Дослідження удару двох куль.....	22
Лабораторна робота № 4. Вивчення обертального руху твердого тіла.	30
Лабораторна робота № 5. Визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою крутильного маятника.	37
Лабораторна робота № 6. Вивчення законів динаміки обертального руху і визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою маятника максвелла.	42
Лабораторна робота № 7. Визначення моменту інерції маховика.	50
Лабораторна робота № 8. Визначення швидкості кулі за допомогою балістичного крутильного маятника.	54
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	61
ДОДАТОК А.....	62
ДОДАТОК Б	63

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

У фізиці інформація береться в основному з досліду. Усі задачі фізичного практикуму зв'язані з експериментальними дослідженнями фізичних законів та явищ. У процесі виконання лабораторних робіт студенти навчаються техніці експерименту, прилучаються до сучасного рівня дослідної роботи.

У теперішній час трактування робіт фізичного практикуму і способу їх виконання є найбільш загальними з фундаментальними дослідженнями. Мета будь-якого наукового дослідження – визначення конкретного об'єкта, достовірне вивчення його структури, характеристик, зв'язків на основі розроблених у науці принципів, методів пізнання, а також отримання корисних для діяльності людини результатів.

Наукове дослідження повинне розглядатися у безперервному розвитку, базуватися на ув'язці теорії з практикою. У залежності від мети, задач і об'єкта дослідження застосовують різні принципи і методи.

Мета цього практикуму – прищеплювати студентам навички самостійної роботи з приладами та установками, ознайомити з методами вимірювання фізичних величин, що вивчаються у розділі курсу фізики “Механіка”.

В описі кожної роботи наведені: її мета, теоретичне та практичне значення експериментів, що виконуються, методичні вказівки до виконання практикуму, рекомендації по статистичній обробці результатів вимірювань, оформленню роботи і її захисту.

Під час підготовки до лабораторної роботи студент повинен ознайомитися з теоретичними відомостями, наведеними в описі роботи, і законспектувати їх, проробити рекомендовану літературу, уміти відповісти на контрольні запитання. Без попередньої підготовки студенти не допускаються до виконання робіт. Якість підготовки контролює викладач.

Після виконання експерименту необхідно оформити протокол роботи і підписати його у викладача, а потім розпочати оформлення роботи у зошиті. Робота вважається захищеною після здавання викладачу звіту по теоретичному і практичному розділам.

Лабораторна робота № 1

Тема. відпрацювання методики проведення вимірів і розрахунку їхніх помилок за допомогою установки для визначення питомого опору резистивного проводу.

Мета. Ознайомлення з методами проведення вимірів і розрахунку помилок за допомогою установки для виміру питомого опору резистивного проводу.

Прилади і матеріали. Установка для визначення питомого опору резистивного проводу, штангенциркуль, мікрометр, міст постійного струму.

Теоретичні відомості

Питомий опір ρ резистивного проводу визначається за формулою

$$\rho = R \cdot S / \ell, \quad (1.1)$$

де R – активний опір резистивного проводу;

ℓ – довжина резистивного проводу;

S – площа поперечного перерізу.

У залежності від абсолютного значення і необхідної точності застосовують різні методи виміру опорів: непрямі (амперметра і вольтметра-амперметра), безпосереднього відліку (за допомогою омметра) і мостовий. У запропонованій лабораторній роботі студенти ознайомляться з деякими з цих методів.

Метод вольтметра-амперметра

Метод вольтметра-амперметра (рис. 1.1) використовують для виміру великих опорів резисторів. При положенні перемикача Π в точці A вольтметр вимірює напругу U , яка дорівнює спаданню напруги на міліамперметрі mA і на резисторі R_X . Вимірюваний опір резистора визначається формулою

$$R_X = (U_V / I_A) - R_A, \quad (1.2)$$

де U_V – показання вольтметра, I_A – показання міліамперметра, R_A – внутрішній опір міліамперметра.

Коли перемикач знаходиться в положенні B , струм через міліамперметр дорівнює сумі струмів

$$I_A = I_X + I_V, \quad (1.3)$$

де I_X – струм, що протікає через резистор R_X ,

I_V – струм, що протікає через вольтметр V .

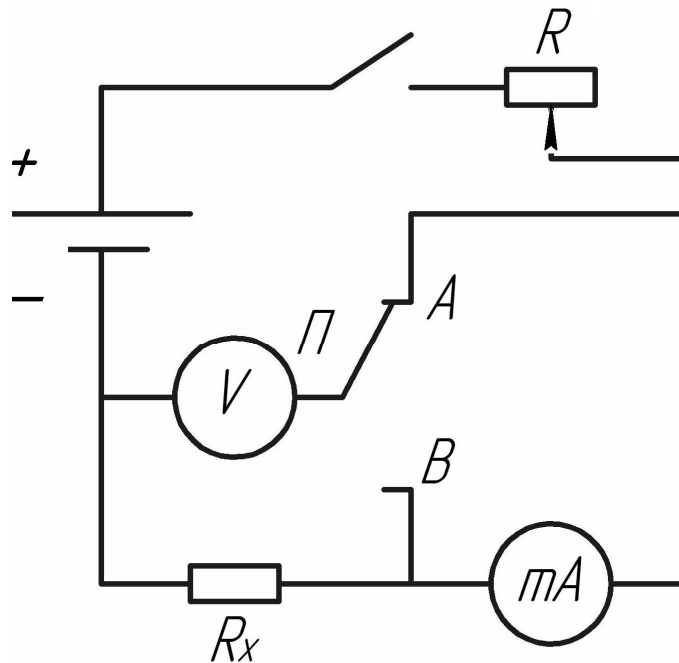


Рисунок 1.1 – Електрична схема для методу вольтметра-амперметра

Приймаючи до уваги, що

$$I_X = U_V / R_X, \quad I_V = U_V / R_V, \quad (1.4)$$

де R_V – внутрішній опір вольтметра, із формул (1.3) і (1.4) знаходимо R_X :

$$R_X = \frac{U_V}{I_A - (U_V / R_V)}. \quad (1.5)$$

Ця формула може бути використана тільки під час виміру малих опорів резисторів, що багато менші внутрішнього опору вольтметра.

Перевагою даного методу є можливість вимірювати опори резисторів, в умовах, що відповідають реальним режимам їхньої роботи, що істотно підвищує точність вимірів, тому що в більшості матеріалів резисторів питомий опір значно залежить від температури, тобто від сили струму, що протікає через них. Однак цей метод є досить грубим, тому що на результат вимірів впливають вхідні опори амперметра і вольтметра.

Мостовий метод

Мостовий метод (рис. 1.2) при якому невідомий вимірюваний опір порівнюють із трьома відомими, є найбільш точним методом виміру опорів середньої величини (від 1 Ом до 100 кОм). Чотири опори R_1 , R_2 , R_3 і R_x з'єднані в замкнутий чотирикутник, сторони якого утворюють плечі моста. В одну з діагоналей моста вмикають джерело напруги, а в іншу – магнітоелектричний індикатор високої чутливості.

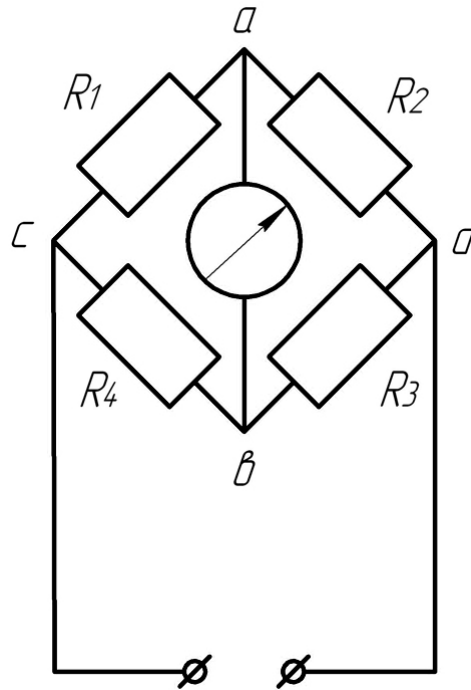


Рисунок 1.2 – Електрична схема мостового методу

Якщо в колі приладу струм відсутній, міст вважається урівноваженим. Це може бути тільки при рівності потенціалів у точках a і b . Урівноважують міст, підбираючи опір пліч. В урівноваженому мосту добутки опорів протилежних пліч однакові:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_x \quad (1.6)$$

Таким чином, вимірюваний опір R_x , увімкнений в одно з пліч моста,

$$R_x = R_1 \cdot R_3 / R_2 \quad (1.7)$$

В якості нульових індикаторів можуть бути використані стрілочні гальванометри; при цьому виходять з необхідної чутливості гальванометра, що визначається співвідношенням його внутрішнього опору і параметрів мостової схеми.

Враховуючи, що $S = \pi d^2 / 4$ (d – діаметр резистивного проводу), питомий опір резистивного проводу визначається за формулою:

$$\rho = \pi d^2 R_x / 4\ell, \quad (1.8)$$

де R_x визначається за (1.2) для методу з точним виміром струму, за (1.5) для методу з точним виміром напруги, за (1.7) для мостового методу.

Методика проведення вимірів і оцінка їхніх помилок

Методика проведення вимірів і оцінка їхніх помилок є у літературі з фізики. Нижче ми розглянемо її додаток для нашого конкретного випадку. Відповідно до цієї методики істинні значення вимірюваних величин I_A , U_V , R_A , R_V , d , ℓ подаємо в вигляді:

$$\begin{aligned} I_A &= \bar{I}_A \pm \Delta I_A, & U_V &= \bar{U}_V \pm \Delta U_V, & R_A &= \bar{R}_A \pm \Delta R_A, \\ R_V &= \bar{R}_V \pm \Delta R_V, & d &= \bar{d} \pm \Delta d, & \ell &= \bar{\ell} \pm \Delta \ell, \end{aligned} \quad (1.9)$$

де \bar{I}_A , \bar{U}_V , \bar{R}_A , \bar{R}_V , \bar{d} , $\bar{\ell}$ – відповідно середні обмірювані значення I_A , U_V , R_A , R_V , d , ℓ ; ΔI_A , ΔU_V , ΔR_A , ΔR_V , Δd , $\Delta \ell$ – помилки вимірюваних величин.

Помилки електровимірювальних приладів визначаються їхнім класом точності. Наприклад, максимальне значення сили струму, вимірюваного міліамперметром класу точності 1,5, дорівнює 250 мА. Систематична помилка міліамперметра складає 1,5% від 250 мА, тобто $\Delta I_A = 3,75$ мА.

Діаметр d резистивного проводу можна виміряти штангенциркулем або мікрометром. Під час виміру діаметра проводу штангенциркулем, очевидно, результат у різних місцях проводу буде однаковим. Помилка виміру діаметра буде визначатися точністю виміру штангенциркуля, тобто $\Delta d = 0,1$ мм (або 0,05 мм обумовлену ноніусом). Під час виміру діаметра резистивного проводу мікрометром можлива серія результатів: $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n, \dots$. У цьому випадку для визначення помилки виміру діаметра необхідно враховувати як випадкову, так і систематичну ($\Delta d = 0,01$ мм) помилки.

Точність виміру довжини резистивного проводу не менше 2 мм (за паспортом установки).

З урахуванням співвідношень (1.9) формулу (1.8) можна записати у вигляді

$$\rho = (\pi/4) \cdot (\bar{R}_x \pm \Delta R_x) \cdot (\bar{d} \pm \Delta d)^2 \cdot (\bar{\ell} \pm \Delta \ell)^{-1}. \quad (1.10)$$

Формулу (1.10) можна перетворити до виду

$$\rho = \left(\pi \bar{R}_x \bar{d}^2 / 4 \bar{\ell} \right) \cdot \left(1 \pm \Delta R_x / \bar{R}_x \right) \cdot \left(1 \pm \Delta d / \bar{d} \right)^2 \cdot \left(1 \pm \Delta \ell / \bar{\ell} \right)^{-1}, \quad (1.11)$$

де $\pi \bar{R}_x \bar{d}^2 / 4 \bar{\ell}$ – середнє значення питомого опору $\bar{\rho}$; $\Delta R_x / \bar{R}_x$, $\Delta d / \bar{d}$, $\Delta \ell / \bar{\ell}$ – відносні помилки виміру відповідних величин.

Під час вимірів, що виключають промахи, відносні помилки малі. Через це, використовуючи розкладання функцій у ряд Маклорена і, обмежуючись лінійними членами:

$$(1 \pm \Delta d / \bar{d})^2 = 1 \pm 2 \Delta d / \bar{d}; \quad (1 \pm \Delta \ell / \bar{\ell})^{-1} = 1 \mp \Delta \ell / \bar{\ell}$$

вираз (1.11) приведемо до вигляду

$$\rho / \bar{\rho} = (1 + \Delta R_x / \bar{R}_x) \cdot (1 + 2 \Delta d / \bar{d}) \cdot (1 + \Delta \ell / \bar{\ell}). \quad (1.12)$$

Тут для простоти запису покладемо, що ΔR_x , Δd , $\Delta \ell$ приймають і позитивні й негативні значення.

З (1.12), обмежуючись лінійними членами відносно малих величин, одержимо

$$\rho / \bar{\rho} = 1 + \Delta R_x / \bar{R}_x + 2 \Delta d / \bar{d} + \Delta \ell / \bar{\ell}.$$

Звідси знаходимо відносну помилку ε виміру ρ :

$$\varepsilon = \Delta \rho / \bar{\rho} = \Delta R_x / \bar{R}_x + 2 \Delta d / \bar{d} + \Delta \ell / \bar{\ell}, \quad (1.13)$$

де $\Delta \rho = \rho - \bar{\rho}$ – абсолютна помилка виміру ρ . Результат вимірів записується у вигляді

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta \rho, \quad \Delta \rho = \varepsilon \bar{\rho}. \quad (1.14)$$

Для методу вольтметра-амперметра помилка виміру R_x буде визначатися, зокрема, через помилки виміру ΔU_v і ΔI_A (див. формули (1.2) і (1.5)). Через те, що помилки ΔU_v , ΔI_A , Δd , $\Delta \ell$ визначаються в основному точністю самих вимірювальних приладів, для зменшення помилки $\Delta \rho / \bar{\rho}$ потрібно проводити виміри при найбільших значеннях \bar{U}_v , \bar{I}_A і $\bar{\ell}$.

Опис установки і методу виміру

Загальний вигляд установки для виміру питомого опору резистивного проводу (ФРМ-1) поданий на рис. 1.3. Основа (1) оснащена регульованими ніжками, що дозволяють зробити вирівнювання положення приладу. До основи прикріплена колона (2) із нанесеною метричною шкалою (3). На колоні

змонтовані два нерухомих кронштейни (4) і один рухомий кронштейн (5), що може переміщатися уздовж колони і фіксуватися в будь-якому положенні. Між верхнім і нижнім кронштейном натягнутий резистивний провід (6), що прикріплений до кубиків (7) за допомогою гвинтів. Через контактний затиск на рухомому кронштейні забезпечується надійне гальванічне з'єднання з резистивним проводом. На рухомому кронштейні нанесена риска, що полегшує визначення на шкалі довжини відрізка вимірюваного резистивного проводу. Нижні, верхні й центральні рухомі контакти резистивного проводу підведені за допомогою проводів низького опору до вимірювальної частини приладу (8),

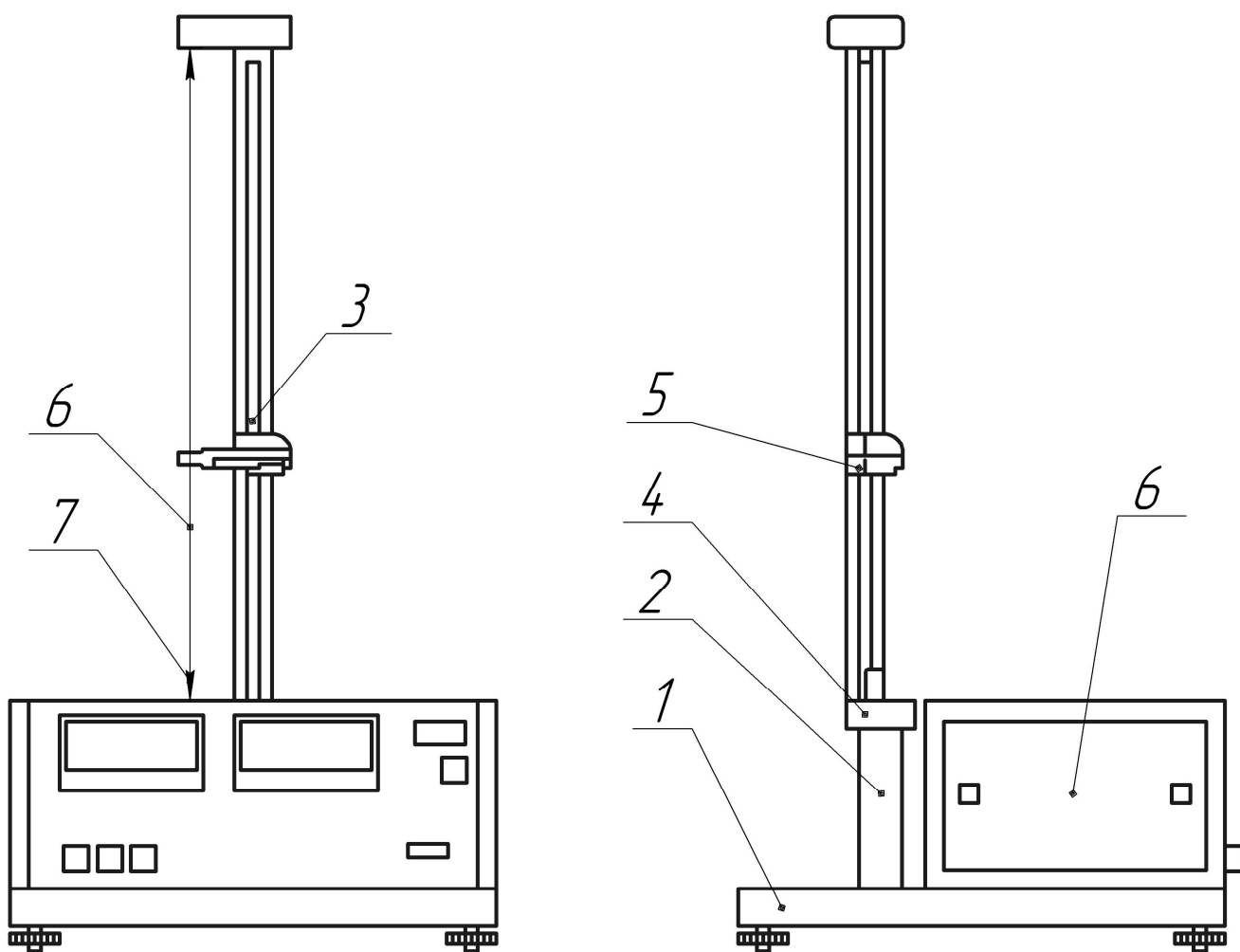


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд установки для виміру питомого опору резистивного проводу (FPM-1)

що поміщена в центральному корпусі й за допомогою гвинтів прикріплена до основи.

Вигляд передньої панелі вимірювального приладу FPM-1 поданий на рис. 1.4.

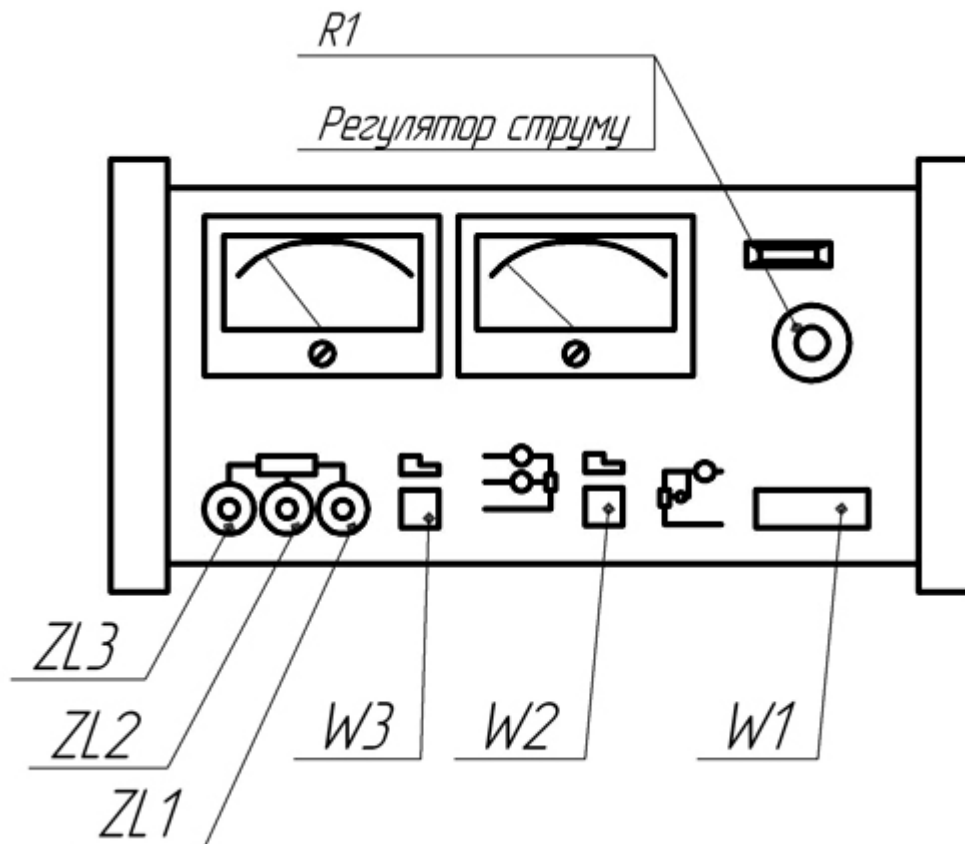


Рисунок 1.4 – Вигляд передньої панелі вимірювального приладу FPM-1

Порядок виконання роботи

1. Визначте за допомогою штангенциркуля діаметр d резистивного проводу по всій його довжині в 10 місцях. У протоколі вимірів запишіть точність виміру штангенциркуля.

2. Повторіть виміри діаметра проводу за допомогою мікрометра. Запишіть точність мікрометра.

3. Вимірте опір резистивного проводу методом вольтметра-амперметра (натисніть клавішу W3):

3.1 Відтисніть клавішу W2 (точний вимір струму).

3.2 Пересуньте рухомий кронштейн приблизно на 0,7 довжини резистивного проводу стосовно основи.

3.3 Ввімкніть тумблер W1 "Сіть", при цьому повинна загорітися індикаторна лампочка.

3.4 За допомогою ручки регулятора струму R1 установіть таке значення струму, щоб вольтметр показував $2/3$ вимірювального діапазону.

3.5 Запишіть показання вольтметра і амперметра.

3.6 Визначте довжину вимірюваного проводу за допомогою шкали на колоні. Результати вимірів занести в таблицю 1.1.

3.7 Натисніть клавішу W2. (точний вимір напруги) і повторіть пункт 3.5.

3.8 При постійній нарузі збільшіть довжину резистивного проводу. Запишіть показ міліамперметра.

4. Виміряйте опір резистивного проводу мостом постійного струму (відіжміть клавішу W3):

4.1 Підключіть міст постійного струму до затисків $Zl1$ і $Zl2$, описаних як R_x .

4.2 Пересуньте рухомий кронштейн приблизно на 0,7 довжини резистивного проводу стосовно основи.

4.3 Запишіть показання моста R_M .

4.4 Установіть рухомий кронштейн для гальванічного з'єднання з нижнім кронштейном.

4.5 Прочитайте показання моста R_{d0}

Таблиця 1.1

№ з/п	Метод точного виміру струму			Метод точного виміру напруги		
	l (м)	I (mA)	U (В)	l (м)	I (mA)	U (В)
1						
2						
3						
Середні значення величин						

5. Запишіть нижче таблиці систематичні помилки вимірів:

Опір вольтметра (Ом) –

Максимальне значення показання вольтметра (В) –

Клас точності вольтметра (%) –

Опір міліамперметра (Ом) –

Максимальне значення показання міліамперметра (mA) –

Клас точності міліамперметра (%) –

Кількість дослідів під час вимірів довжини проводу –

Коефіцієнт Стьюдента –

Кількість дослідів під час вимірів діаметру проводу –

Систематична помилка довжини (м) – $(\Delta \ell)_{\text{сист}} = 0,002$ м

Систематична помилка діаметра визначається точністю виміру мікрометра, або штангенциркуля(м)–

Обробка результатів експерименту

1. Розрахуйте середнє значення діаметра \bar{d} , систематичну помилку і відносну помилку $\Delta d/\bar{d}$ для вимірів за допомогою штангенциркуля і мікрометра та порівняйте отримані результати.

2. Проведіть розрахунки для випадку точного виміру струму ($R_A = 0,15$ Ом).

2.1 Використовуючи формулу (1.2), обчисліть опір резистивного проводу.

2.2 Обчисліть відносну помилку $\Delta R_x/\bar{R}_x$ за формулою

$$\frac{(\Delta R_x)_{\text{суст}}}{R_x} = \frac{U_v}{U_v - I_A R_A} \left(\frac{(\Delta U_v)_{\text{суст}}}{U_v} + \frac{(\Delta I_A)_{\text{суст}}}{I_A} \right). \quad (1.15)$$

2.3 Обчисліть відносну помилку ε виміру ρ за формулою (1.13).

2.4 Результат вимірів запишіть у вигляді (1.14).

3. Розрахунки проведіть для випадку точного виміру напруги ($R_v = 2500$ Ом).

3.1 Обчисліть за формулою (1.5) опір резистивного проводу.

3.2 Обчисліть за формулою (1.8) питомий опір резистивного проводу.

3.3 Обчисліть відносну помилку $\Delta R_x/\bar{R}_x$ за формулою

$$\frac{(\Delta R_x)_{\text{суст}}}{R_x} = \frac{I_A R_v}{I_A R_v - U_v} \left(\frac{(\Delta U_v)_{\text{суст}}}{U_v} + \frac{(\Delta I_A)_{\text{суст}}}{I_A} \right). \quad (1.16)$$

3.4 Обчисліть відносну помилку ε виміру ρ за формулою (1.13).

3.5 Результат вимірів запишіть у вигляді (1.14).

4. Використовуючи формулу (1.8) і враховуючи, що $R_x = R_M - R_{d0}$, обчисліть для виміру опору за допомогою моста постійного струму.

4.1 Обчисліть відносну помилку ε і результат подайте у вигляді: $\rho = \bar{\rho} \pm \Delta \rho$.

5. Проаналізуйте результати виміру питомого опору резистивного проводу за допомогою різних методів і зробіть висновки.

Контрольні запитання і завдання

1. Поясніть чим відрізняються прямі методи вимірювання від непрямих?
2. Поясніть які типи помилок існують?
3. Які помилки називаються систематичними. Які правила їх розрахунку під час користування лінійкою, мікрометром, амперметром або вольтметром, під час визначення ваги тіла.
4. Які помилки називаються випадковими. Які правила їх розрахунку для прямих і непрямих вимірювань.
5. У чому полягає суть методу амперметра-вольтметра виміру опорів?
6. У чому полягає суть мостового методу виміру опорів?
7. Які з використовуваних у роботі методів виміру опорів дають найменшу помилку?
8. Одержіть вираз для визначення систематичної помилки густини $\rho = m/\pi d^2 h$ циліндра масою m , діаметром d і висотою h .

Лабораторна робота № 2

Тема. Перевірка другого закону Ньютона при поступальному русі.

Мета. Перевірити другий закон Ньютона двома способами

Прилади і матеріали: установка для проведення експериментів – машина Атвуда FPM-02; набір перегрузків.

Опис установки

Загальний вигляд машини Атвуда і пульт керування показані на рисунку 2.1.

На вертикальній колоні 1, закріпленій в підставці 2, встановлені три кронштейни: нерухомий нижній кронштейн 3, і два рухомих – середній 4 і верхній 5, а також вузол кріплення 6.

Підставка 2 оснащена регульованими ніжками 7, що дозволяють вирівнювати положення машини.

У верхньому вузлі кріплення за допомогою втулки 8 і підшипників 9 закріплений легкий шків 10 і електромагніт 11. Через шків 10 перекинута нитка 12 із прив'язаними на її кінцях вантажами 13 і 14. Електромагніт, після увімкнення приладу в електричну мережу, за допомогою фрикційної муфти може утримувати шків 10 і вантажі 13,14 у нерухомому стані. Верхній 5 і середній 4 кронштейни можна переміщати уздовж колони і фіксувати в будь-якому положенні, встановлюючи таким чином довжину шляху, на якому відбувається рівномірний і нерівномірний рух. Для визначення величини шляху на колоні є міліметрова шкала 15.

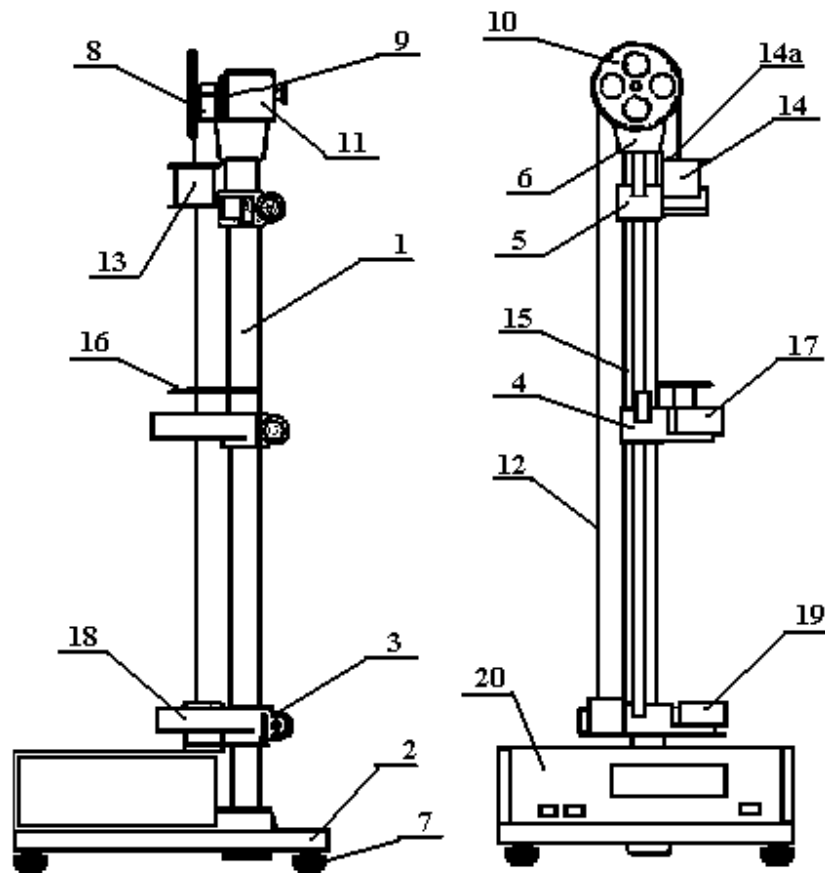


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд машини Атвуда

Усі кронштейни мають покажчики положень, а верхній кронштейн 5 має додаткову риску, що полегшує точне узгодження положення нижньої підставки вантажу 14 з визначеним початковим положенням на шкалі.

На середньому кронштейні 4 є знімний столик 16 для зняття перевантаження 14а і фотоелектричний датчик № 1-17, що вмикає секундомір у момент зняття перевантаження.

Оптична вісь фотоелектричного датчика № 1-17 (риска на корпусі) знаходиться на рівні покажчика положення середнього кронштейна 4. Нижній кронштейн 3 оснащений двома майданчиками 18 з амортизаторами, в які ударяються вантажі 13 і 14, і фотоелектричним датчиком № 2-19.

Фотоелектричний датчик № 2-19, з оптичною віссю на рівні покажчика положення кронштейна 3, після перетину якої, нижньою підставкою вантажу 14, вмикає секундомір.

Час руху вантажу 14 між кронштейнами 4 і 3 висвітлюється на шкалі секундоміра.

Опис пульта керування

Загальний вид пульта керування (передня панель) показаний на рисунку 2.2.

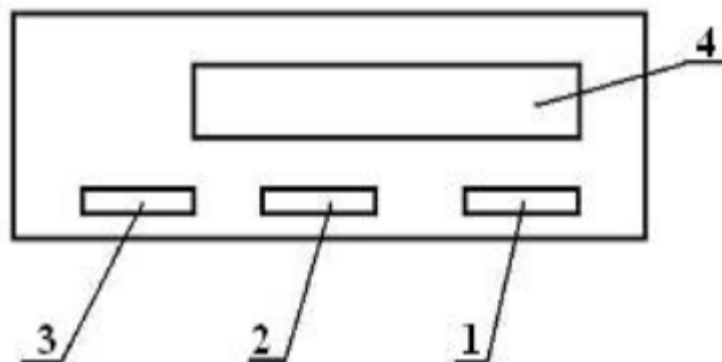


Рисунок 2.2 – Загальний вид пульта керування

На передній панелі розміщені клавіші керування:

№ 1 (STEP, мережа) – клавіша вмикання ? вимикання напруги від мережі. Під час увімкнення напруги відбувається автоматичне скидання інформації (на цифрових індикаторах 4 висвітлюються нулі та загоряються лампочки датчиків).

№ 2 (ZER, скидання) – натискання цієї клавіші викликає скидання цифрової інформації з індикаторів 4 (на цифрових індикаторах висвітлюються нулі).

№ 3 (START, пуск) – кнопка керування електромагніта і підготовки секундоміра до виміру часу. Натискання цієї клавіші вмикає електромагніт. Повторне натискання клавіші № 3 повертає установку у вихідний стан.

№ 4 – шкала цифрових індикаторів (шкала секундоміра) на якій висвітлюється час руху вантажу 14 без перевантаження.

Теоретичні відомості

На рис. 2.3 схематично показана машина Атвуда,

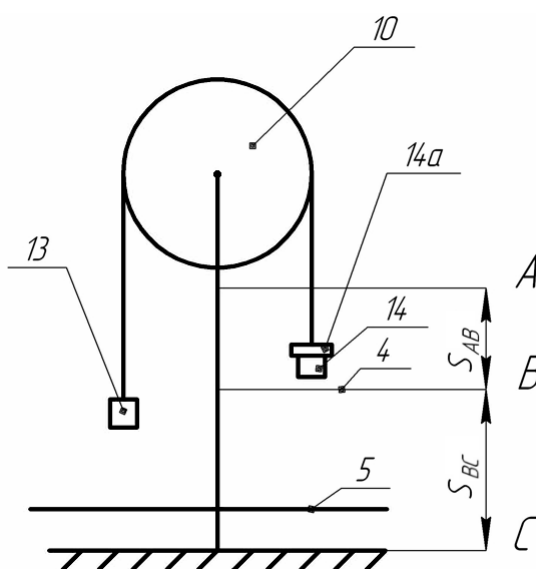


Рисунок 2.3 – Рух системи тіл на ділянках АВ і ВС

де S_{AB} – довжина ділянки АВ, на якій вантаж 14 рухається з перевантаженням 14а;

S_{BC} – довжина ділянки ВС, на якій вантаж 14 рухається без перевантаження 14а;

t_{AB} – час руху вантажу 14 з перевантаженням 14а по ділянці АВ;

t_{BC} – час руху вантажу 14 без перевантаження 14а по ділянці ВС;

M – маса вантажів 13 і 14;

m – маса перевантаження 14а;

g – прискорення вільного падіння;

Опишемо рух системи тіл на ділянках АВ і ВС окремо

Приймаємо, що шків 10 радіусом r невагомий. У системі відсутні сили тертя і опору. Нитка, що з'єднує вантажі 13 і 14 нерозтяжна.

Рух системи тіл на ділянці АВ (Рис.2.4).

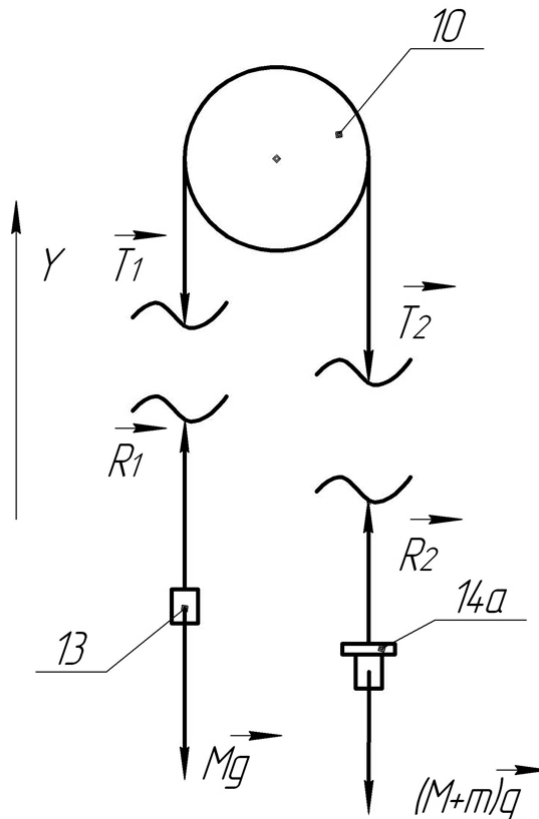


Рисунок 2.4 – Сили, які діють на тіла на ділянці АВ

На підставі третього закону Ньютона:

$$T_1 = R_1 \quad \text{і} \quad T_2 = R_2. \quad (2.1)$$

Тому що тіла 13,14 і 14а рухаються поступально і маси тіл постійні, для складання рівняння руху кожного тіла окремо застосуємо другий закон Ньютона у вигляді:

$$m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F}, \quad (2.2)$$

де m – маса тіла, що рухається;

\vec{a} – прискорення тіла, що рухається;

$\sum \vec{F}$ – векторна сума сил, діючих на тіло, що рухається.

Для тіла 13 маємо:

$$M \cdot \vec{a}_1 = M \cdot \vec{g} + \vec{R}_1. \quad (2.3)$$

Спроектувавши векторне рівняння (2.3) на вісь Y , одержимо:

$$M \cdot a_1 = R_1 - M \cdot g. \quad (2.4)$$

Для вантажу 14 з перевантаженням 14а маємо:

$$(M + m) \cdot \vec{a}_2 = (M + m) \cdot \vec{g} + \vec{R}_2. \quad (2.5)$$

Спроектувавши векторне рівняння (2.5) на вісь Y , одержимо:

$$F = R_2 - (M + m) \cdot g, \quad (2.6)$$

де $F = -(M + m) \cdot a_2$; \vec{a}_1 і \vec{a}_2 прискорення тіл 13, 14 і 14а відповідно.

Тому що нитка, що з'єднує вантажі є невагомою і нерозтяжною, то прискорення:

$$a = a_1 = a_2, \quad \text{сили} \quad R = R_1 = R_2. \quad (2.7)$$

Підставивши в рівняння (2.4) і (2.6), значення прискорень і сил (2.7), одержимо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} Ma &= R - Mg, \\ (M + m)a &= (M + m)g - R, \end{aligned} \quad (2.8)$$

з яких одержуємо:

$$\begin{aligned} (2M + m)a &= mg, \\ a &= mg / (2M + m) = \text{const} \end{aligned} \quad (2.9)$$

значить, рух на ділянці АВ равноприскоренний ($a = \text{const}$).

Систему рівнянь, що описують рух тіл без перевантажень, на ділянці ВС можна одержати із системи (2.8), якщо прийняти $m=0$:

$$\begin{aligned} Ma &= R - Mg, \\ Ma &= Mg - R, \end{aligned} \quad (2.10)$$

з яких випливає:

$$\begin{aligned} 2Ma &= 0, \\ a &= 0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Значить, рух на ділянці ВС рівномірний ($a=0$).

Тіла 13, 14 і 14а рухаються поступально.

Розглянемо рух на ділянці АВ для кожного тіла окремо

У системі діють сили:

\vec{T}_1, \vec{T}_2 – сили натягу нитки;

\vec{R}_1, \vec{R}_2 – сили, діючі на вантажі з боку нитки;

$m \cdot \vec{g}$ – сила ваги перевантаження;

$M \cdot \vec{g}$ – сили ваги вантажів 13 і 14;

Знаючи закони шляху і швидкості равноприскореного руху,

$$S = v_0 + at^2/2,$$

$$v = v_0 + at,$$

і закони шляху і швидкості рівномірного руху

$$S = v \cdot t,$$

$$v = \text{const},$$

запишемо закони руху на кожній ділянці (з урахуванням того, що при $t = 0$ $(v_0)_{AB} = 0$ і $(v_0)_{BC} = v_B$).

На ділянці АВ

$$v_{AB} = a_{AB} t_{AB}, \quad (2.12)$$

$$S_{AB} = a_{AB} t_{AB}^2 / 2. \quad (2.13)$$

На ділянці ВС

$$v_{BC} = v_B = \text{const}, \quad (2.14)$$

$$S_{BC} = v_B t_{BC}, \quad (2.15)$$

де v_B – швидкість руху тіл 13, 14 після зняття перевантаження 14а;

S_{AB} – довжина ділянки АВ;

S_{BC} – довжина ділянки ВС; t_{BC} – час руху тіла 14 на ділянці ВС.

На підставі формул (2.12), (2.13) і (2.15) одержимо формулу для визначення прискорення

$$\begin{aligned} v_B = v_{AB} = S_{BC}/t_{BC}; \quad t_{AB} = v_B/a_{AB} = \frac{S_{BC}}{t_{BC}a_{AB}}; \\ S_{AB} = \frac{a_{AB}S_{BC}^2}{2t_{BC}^2a_{AB}^2}; \quad a_{AB} = \frac{S_{BC}^2}{2t_{BC}^2S_{AB}}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

На підставі формул (2.9) і (2.16) одержуємо, що

$$a_{AB} = \frac{mg}{2M + m} = \frac{S_{BC}^2}{2t_{BC}^2S_{AB}}. \quad (2.17)$$

Другий закон Ньютона (2.2) перевіримо двома способами.

1 спосіб. Якщо відрізки шляху S_{AB} і S_{BC} приймаються постійними, а змінюються маси перегрузків.

Згідно (2.17), одержимо

$$\frac{m_1g}{2M + m_1} = \frac{S_{BC}^2}{2t_{(1)BC}^2 \cdot S_{AB}}, \quad (2.18)$$

$$\frac{m_2g}{2M + m_2} = \frac{S_{BC}^2}{2t_{(2)BC}^2 \cdot S_{AB}}. \quad (2.19)$$

Розділивши (2.19) на (2.18), одержимо

$$\frac{m_2(2M + m_1)}{m_1(2M + m_2)} = \frac{t_{(1)BC}^2}{t_{(2)BC}^2}. \quad (2.20)$$

Переконавшись в справедливості рівності (2.20), ми тим самим переконуємося в справедливості другого закону Ньютона (2.2).

2 спосіб. Якщо не міняється маса перегрузків, але міняються відрізки шляху S_{AB} і S_{BC} , то використовуючи формулу (2.17), одержимо

$$a = \frac{S_{(1)BC}^2}{2t_{(1)BC}^2S_{(1)AB}} = \frac{S_{(2)BC}^2}{2t_{(2)BC}^2S_{(2)AB}},$$

або

$$\left(\frac{t_{(2)BC}}{t_{(1)BC}} \right)^2 = \left(\frac{S_{(1)AB}}{S_{(2)AB}} \right) \cdot \left(\frac{S_{(2)BC}}{S_{(1)BC}} \right)^2. \quad (2.21)$$

Переконавшись в справедливості рівності (2.21), ми тим самим переконуємося в справедливості другого закону Ньютона (2.2).

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою – принципом дії і пультом керування.
2. Одержати від викладача допуск до виконання лабораторної роботи.
3. Виконати завдання.

Завдання № 1

Перевірити другий закон Ньютона *першим способом* (див. формулу 2.20)
Вихідна інформація – числові значення S_{AB} ; S_{BC} ; M ; m_1 ; m_2 і n (кількість дослідів).

1. Підключіть шнур машини до електричної мережі.
2. Установіть рухливі кронштейни 4 і 5 відповідно до значень S_{AB} і S_{BC} .
3. Зважити вантажі 13 і 14.
4. Натиснути клавішу «Мережа».
5. Покласти на вантаж 14 перевантаження m_1 .
6. Натиснути клавішу «Скидання».
7. Натиснути клавішу «Пуск».
8. Записати час, що на цифровому індикаторі.
9. Повторити експеримент n раз.
10. Провести експерименти з перевантаженням m_2 (див. пункти 3-9).

Результати вимірів записати в таблицю 2.1. Провести розрахунки за формулою (2.20). Зробити висновки, оцінити помилки.

Таблиця 2.1

№ з/п	$t_{1(BC)}$ (с)	$t_{2(BC)}$ (с)	m_1 (кг)	m_2 (кг)	Помилки вимірів	Вихідна інформація
					ΔS_{AB} (м)= ΔS_{BC} (м)= ΔM (кг)= Δm (кг)= Δt (с)=	$S_{AB} =$ $S_{BC} =$ $M =$ $n =$

Завдання № 2

Перевірити другий закон Ньютона другим способом (див. формулу 2.21).

Вихідна інформація – числові значення S_{AB} ; S_{BC} ; M ; m і n (кількість дослідів).

Пункти 1-9 виконуються аналогічно завданню 1 зі значеннями $S_{(1)AB}$ і $S_{(1)BC}$.

10. Експерименти повторюються зі значеннями $S_{(2)AB}$ і $S_{(2)BC}$.

Результати вимірів записати в таблицю 2.2. Провести розрахунки за формулою 2.21. Зробити висновок. Оцінити помилки.

Таблиця 2.2

№ з/п	$t_{1(BC)}$ (с)	$t_{2(BC)}$ (с)	$S_{1(BC)}$ (м)	$S_{2(BC)}$ (м)	Вихідна інформація
					$m_1 =$ $m_2 =$ $n =$

Контрольні запитання і завдання

1. Закони Ньютона.
2. Проведіть аналіз другого закону Ньютона.
3. Дати визначення поступальному рухові. Навести приклади.
4. Записати закони шляху і швидкості для рівномірного руху.
5. Записати закони шляху і швидкості для рівноприскореного руху.
6. Який фізичний зміст маси?
7. Коли тіло можна розглядати як матеріальну точку? Навести приклади.
8. Указати межі застосування законів Ньютона.

Лабораторна робота № 3

Тема. Дослідження удару двох куль.

Мета. Вивчити механічний удар і його фізичні характеристики.

Прилади і матеріали: експериментальна установка для дослідження зіткнення двох куль; набір куль; вимірювальна стрічка.

Теоретичні відомості

Удар – зміна стану тіл унаслідок їхньої короткочасної взаємодії під час зіткнення. Один з найпростіших видів удару – центральний удар двох куль, при якому лінія удару проходить через центри двох куль.

Лінія удару – це пряма, що проходить нормально до елементів поверхні в місцях зіткнення куль один з одним при їхньому зіткненні.

Процеси, що відбуваються під час удару, досить складні, а сила, що є результатом взаємодії тіл під час зіткнення, змінюється в загальному випадку по невідомому закону. Визначити його на підставі експерименту дуже складно, а часто взагалі не представляється можливим унаслідок короткочасності удару ($10^3 \dots 10^{-4}$ с). Тому вивчати явище механічного удару більш доцільно не на основі законів динаміки, а за допомогою законів збереження енергії та імпульсу. Такий підхід до вивчення удару дозволяє позбутися від розгляду складних процесів, що протікають безпосередньо в момент удару.

З фізичної точки зору двома крайніми випадками удару можуть бути абсолютно пружний і абсолютно непружний удари.

Непружний удар спостерігається унаслідок зіткнення двох тіл з пластичних матеріалів або пластичного і пружного тіл.

Непружним називається удар, після якого тіла рухаються з однаковими швидкостями. Ці швидкості можна визначити із закону збереження імпульсу, скалярний запис якого для центрального удару такий:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = U(m_1 + m_2), \quad (3.1)$$

де індексами 1 і 2 позначено величини мас і швидкостей відповідно до першого й другого тіла до удару, U – швидкість тіл після удару.

З (3.1) випливає:

$$U = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2). \quad (3.2)$$

Під час непружного удару закон збереження енергії може бути представлений у вигляді $W_k - W'_k = A$, де W_k і W'_k – кінетична енергія тіл відповідно до і після удару; A – робота неконсервативних сил унаслідок деформації тіл.

Це рівняння може бути записане і у більш конкретному вигляді:

$$m_1 v_1^2 / 2 + m_2 v_2^2 / 2 - (m_1 + m_2) U^2 / 2 = A. \quad (3.3)$$

Пружний удар спостерігається у результаті взаємодії двох тіл, виготовлених з пружних матеріалів (наприклад, двох кульок, виготовлених із твердих сортів сталі, кульок, виготовлених із деяких видів пластмас).

Пружний удар може бути розглянутий поетапно. Перший етап – після по-

чатку зіткнення. Сили, що діють на кулі, збільшуються в міру збільшення деформації. Збільшення деформації супроводжується зміною швидкості куль. Тіло, що мало велику швидкість, буде сповільнювати свій рух, а тіло з меншою швидкістю – прискорюватися. По досягненню максимального значення деформації швидкості обох куль стануть однаковими. З цього моменту, що характеризує початок другого етапу пружного удару, величини деформації починають зменшуватися внаслідок того, що сили пружності розштовхують кулі. Після того, як деформації зникнуть, кулі розійдуться, цілком відновивши свою первісну форму, і будуть рухатися з різними швидкостями. Таким чином, наприкінці другого етапу весь запас потенціальної енергії пружно деформованих тіл знову перетвориться в їхню кінетичну енергію. Сила пружної деформації за час удару τ змінюється за лінійним законом (рис. 3.1) і на першому, і на другому етапі.

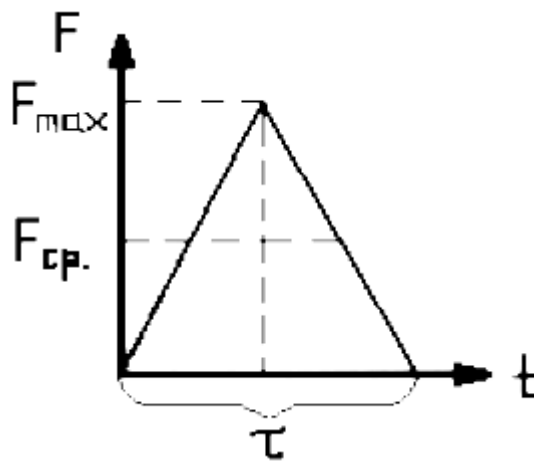


Рисунок 3.1 – Графік залежності $F(t)$ сили пружності деформації під час удару

Закони збереження імпульсу (у скалярній формі) і енергії в цьому випадку записуються в такому вигляді:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2, \quad (3.4)$$

$$m_1 v_1^2 / 2 + m_2 v_2^2 / 2 = m_1 U_1^2 / 2 + m_2 U_2^2 / 2. \quad (3.5)$$

З рівнянь (3.4) і (3.5) випливає, що швидкості U_1 першого і U_2 другого тіла після удару визначаються співвідношеннями:

$$U_1 = (2m_2 v_2 - (m_2 - m_1) v_1) / (m_1 + m_2), \quad (3.6)$$

$$U_2 = (2m_1 v_1 - (m_1 - m_2) v_2) / (m_1 + m_2). \quad (3.7)$$

Процеси, що відбуваються під час реальних ударів, завжди займають проміжне положення між абсолютно пружним і абсолютно непружним ударами.

Під час вивчення реальних ударів потрібно відповісти на запитання, в якій мірі реальний удар можна віднести до одного з розглянутих вище.

У випадку реального удару закон збереження енергії повинен врахувати, що після удару тіла рухаються з різними швидкостями (U_1 і U_2) і, крім того, частина енергії розсіюється у вигляді роботи A неконсервативних сил:

$$m_1 v_1^2 / 2 + m_2 v_2^2 / 2 = m_1 U_1^2 / 2 + m_2 U_2^2 / 2 + A. \quad (3.8)$$

Закон збереження імпульсу в цьому випадку буде таким же, як і в (3.4).

Якщо одна з куль до удару в стані спокою ($v_2 = 0$), то

$$m_1 v_1 = m_1 U_1 + m_2 U_2,$$

$$m_1 v_1^2 / 2 = (m_1 U_1^2 + m_2 U_2^2) / 2 + A. \quad (3.9)$$

Відношення розсіяної енергії A до кінетичної енергії системи W_k , до удару показує, яка частина кінетичної енергії не відновлюється після удару, тобто розсіюється:

$$\eta = A / W_{k1} = 1 - (m_1 U_1^2 + m_2 U_2^2) / m_1 v_1^2 \quad (3.10)$$

де η – ступінь пружності удару. Якщо

$$\eta \ll 1, \quad (3.11)$$

то удар з відомим ступенем точності можна вважати пружним.

Якщо виконується умова (3.11), то можна оцінити силу удару F , скориставшись тим, що результат дії сили пружної деформації, що змінювалася протягом удару за законом, графічно зображеному на рис. 3.1, адекватний результатів дії постійної сили F , рівній половині максимального значення F_{\max} (рис. 3.1). Імпульс сили приводить до зміни імпульсу кулі:

$$F \cdot \tau = m_1 (v_1 - U_1),$$

де τ – час зіткнення.

З останнього співвідношення випливає

$$F = m_1 (v_1 - U_1) / \tau. \quad (3.12)$$

Знаючи, чому дорівнює F , можна також оцінити середнє прискорення, що набувають кулі внаслідок зіткнення:

$$a = F / m_1 = (v_1 - U_1) / \tau,$$

де $(v_1 - U_1)$ зміна швидкості однієї з куль за час зіткнення τ . Якщо виконується умова (3.11), то з достатнім ступенем точності можна вважати, що

$$a = v_1/\tau. \quad (3.13)$$

за умови $m_1 \approx m_2$.

Опис експериментальної установки і підготовка приладу до вимірів

Загальний вид експериментальної установки показаний на рис. 3.2. В основі 1 закріплена колона 2, оснащена верхнім 4 і нижнім 3 кронштейнами. На верхньому кронштейні 4 змонтований пристрій для біфілярного підвішування куль 9 на струмопровідних нитках 5. Відстань між кулями регулюється воротком 6. Довжини струмопровідних ниток можуть бути відрегульовані за допомогою гвинтів на навісах 8. На нижньому кронштейні укріплена кутова шкала 10 і 11, а також електромагніт 12 для фіксації однієї з куль під час підготовки досліду. Електромагніт можна пересувати уздовж правої шкали і фіксувати висоту установки гвинтами 13 і 14.

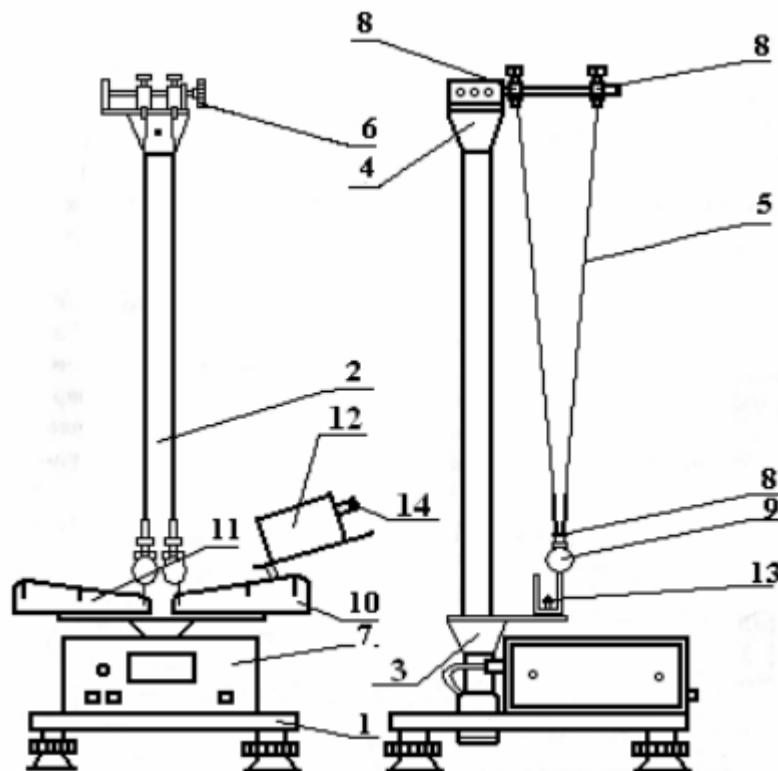


Рисунок 3.2 – Загальний вид експериментальної установки

В основі приладу укріплений мілісекундомір 7, що вимірює час зіткнення куль, а також блок живлення електромагніта.

На передній панелі мілісекундоміра розташована клавіша "Сіть", що вми-

кає прилад. При цьому повинна засвітитися шкала секундоміра. У результаті натискання клавіші "Пуск" вимикається живлення електромагніта і електронна схема секундоміра приводиться до готовності для підрахунку часу зіткнення куль.

Натисканням клавіші "Скидання" проводиться очищення цифрового табло секундоміра. Світлодіод "Переповнення" сигналізує, що вимірюваний час вишов за межі 999 мкс. Для очищення натиснути клавішу "Скидання".

Перед виміром кулі повинні бути встановлені на однаковій висоті й за допомогою біфілярних підвісів відрегульовані таким чином, щоб площина їхніх коливань збігалася з площиною кутомірної шкали, а лінія удару проходила через центр куль. У комплекті до приладу є вісім різних пар металевих куль. Під час виконання роботи одна з куль (ліва) буде завжди в стані спокою (до удару), а інша (права) починати свій рух з положення, обумовленого положенням електромагніта (рис. 3.3).

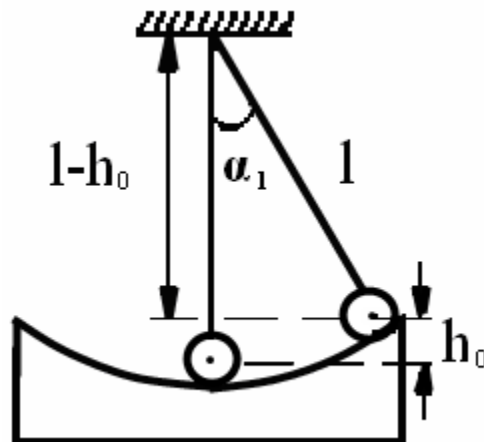


Рисунок 3.3 – Схема зіткнення куль

Швидкість v_1 цієї кулі безпосередньо перед ударом можна знайти з закону збереження механічної енергії. Коли права куля досягає свого найнижчого положення, то її потенціальна енергія перетворюється в кінетичну: $W_{\text{п}} = W_{\text{к}}$, тобто

$$mgh_0 = mv_1^2/2,$$

$$v_1 = \sqrt{2gh_0}, \quad (3.14)$$

де h_0 – висота підняття правої кулі, відхиленої на кут α_1 . З рис. 3.3 видно, що

$$l - h_0 = l \cos \alpha,$$

$$h_0 = 2l \sin^2(\alpha_1/2). \quad (3.15)$$

Враховуючи (3.15), формула (3.14) для визначення швидкості правої кулі прийме вигляд

$$v_1 = 2\sqrt{gl} \sin(\alpha_1/2), \quad (3.16)$$

де l – довжина підвісу кулі, вимірюваного в досліді;

α_1 – кут відхилення кулі до удару.

Аналогічно, застосовуючи закон збереження енергії, можна одержати вираз для післяударної швидкості куль:

$$\text{правої: } U_1 = 2\sqrt{gl} \sin(\alpha'_1/2), \quad (3.17)$$

$$\text{лівої: } U_2 = 2\sqrt{gl} \sin(\alpha'_2/2), \quad (3.18)$$

де α'_1 і α'_2 – кути відхилення після удару відповідно до правої і лівої куль.

Виконання роботи

Завдання. Визначити ступінь пружності удару η , силу удару F і прискорення a кулі під час удару.

Підготувати прилад до роботи. Визначити довжину ниток підвісу. Праву кулю зафіксувати за допомогою електромагніта у відхиленому на кут α_1 положенні. Потім натиснути клавішу "Пуск". Після удару помітити кут α'_1 і α'_2 максимального відхилення лівої і правої куль від положення рівноваги.

Примітка. Вимірювати одночасно кути α'_1 і α'_2 важко, тому дослід у тих самих умовах необхідно повторювати кілька разів, вимірюючи спочатку кут α'_1 , потім кут α'_2 .

У ході кожного досліді записувати показання τ мілісекундоміра, що фіксує час зіткнення куль.

Виміри проводити для трьох різних початкових положень (α_1) правої кулі. Результати вимірів занести в таблицю 3.1. Значення мас куль наведені в довідкових даних (таблиця 3.2).

Таблиця 3.1

№ з/п	α_1 (град)	α'_1 (град)	α'_2 (град)	τ (с)	η	F (Н)	a (м/с ²)

Увага! Забороняється залишати електромагніт на тривалий час увімкненим. Регулювання куль на біфілярних підвісах варто проводити із вимкненим з

мережі приладом. Забороняється доторкатися двох куль одночасно.

Таблиця 3.2 – Довідкові дані

Номер кулі	Маса кулі (10^{-3}) кг
1	115
2	175
3	115
4	178
5	110
6	177
7	110
8	180

Обробка результатів

За формулою (3.10) з урахуванням (3.16 – 3.18) розрахувати ступінь пружності η удару

$$\eta = 1 - \left[m_1 \sin^2(\alpha'_1/2) + m_2 \sin^2(\alpha'_2/2) \right] / m_1 \sin^2(\alpha_1/2).$$

Перевірити, чи виконується умова (3.11). Якщо виконується, то удар можна вважати пружним і, отже, справедливі міркування, що приводять до оцінки середньої сили удару за формулою (3.12) з урахуванням (3.16), (3.17)

$$F = 2m_1 \sqrt{gl} \left[\sin(\alpha_1/2) - \sin(\alpha'_1/2) \right],$$

а також прискорення за формулою (3.12) з урахуванням (3.16):

$$a = 2\sqrt{gl} \cdot \tau^{-1} \left[\sin(\alpha_1/2) - \sin(\alpha'_1/2) \right].$$

Виміри зробити для всіх різних пар куль. Отримані результати проаналізувати і зробити висновки.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається ударом?
2. Які є види ударів. Дайте їх характеристику.
3. Яким законам збереження підлягають пружний та непружний удари?
4. Чому явище механічного удару доцільно вивчати за допомогою законів збереження, ніж за допомогою законів динаміки?
5. Що таке ступінь пружності η удару?

Лабораторна робота № 4

Тема. Вивчення обертального руху твердого тіла.

Мета. 1. Вивчити принцип дії установки "Маятник Обербека".
2. Перевірити основний закон динаміки обертального руху.
3. Визначити момент інерції маятника.

Прилади і матеріали: експериментальна установка "Маятник Обербека" з набором тягарців.

Теоретичні відомості

Основним елементом експериментальної установки є маятник Обербека (рис. 4.1), призначений для дослідження обертального руху твердого тіла і для визначення його моменту інерції.

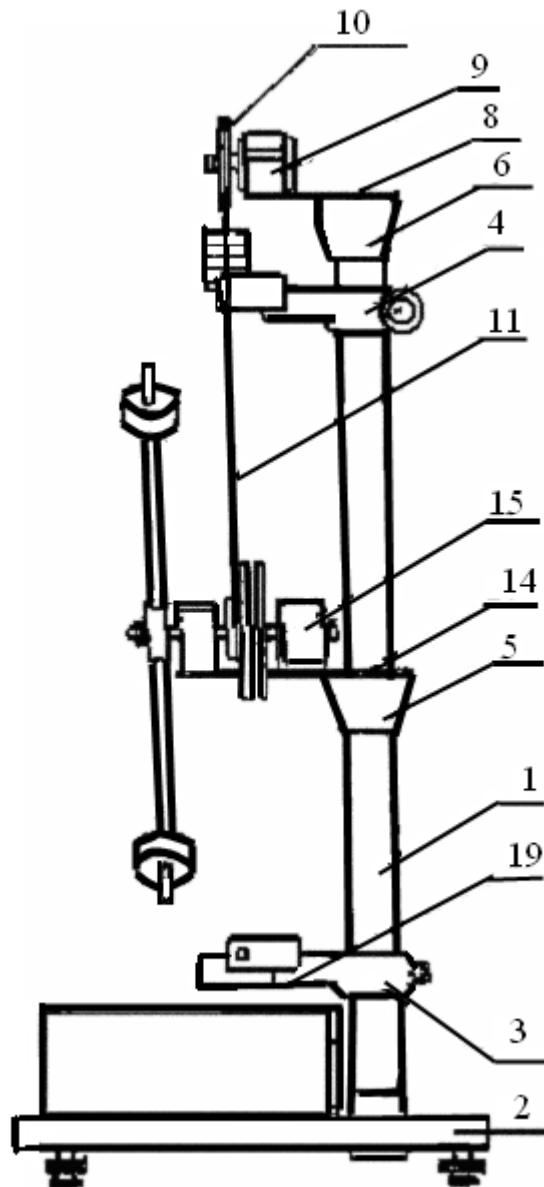


Рисунок 4.1 – Загальний вид маятника Обербека

Маятник, застосований у приладі, являє собою інерційне колесо у вигляді хрестовини. На чотирьох взаємно перпендикулярних стрижнях можуть переміщатися тягарці (рис. 4.2).

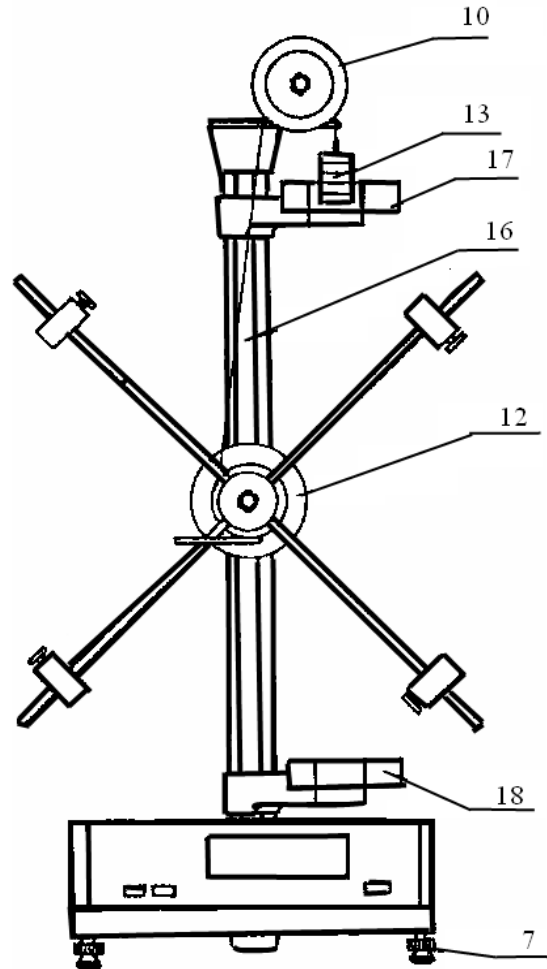


Рисунок 4.2 – Загальний вид маятника Обербека

На горизонтальній основі хрестовини є двоступінчастий диск, на який намотується нитка. Один кінець нитки прикріплений до диска, а на другому кінці нитки підвішений спадаючий тягарець. Під дією спадаючого тягарця нитка розмотується з диска і викликає обертальний рівномірно прискорений рух хрестовини. У разі зміни відстані переміщуваних тягарців від осі обертання хрестовини кутове прискорення тим менше, чим більше момент інерції системи щодо осі обертання (див. рис. 4.2). Відповідно до основного закону динаміки обертального руху:

$$\vec{M} = I\vec{\epsilon},$$

де M – момент зовнішніх сил щодо осі обертання; ϵ – кутове прискорення; I – момент інерції щодо осі обертання. Або можна записати:

$$\vec{\epsilon} = \vec{M}/I. \quad (4.1)$$

Одним із завдань даної роботи є перевірка співвідношення (4.1), яку можна здійснювати за допомогою експериментальної установки маятника Обербека.

Співвідношення (4.1) можна перевірити двома способами:

1 спосіб

Якщо момент сил, що діють на хрестовину, не змінюється ($M = \text{const}$), то в цьому випадку і $I \cdot \varepsilon = \text{const}$, тобто під час зміни моменту інерції можна записати:

$$I_1 \varepsilon_1 = I_2 \varepsilon_2, \quad (4.2)$$

або

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = I_2 / I_1,$$

де I_1, I_2 – моменти інерції маятника за різних положень тягарців на стрижнях.

Нехай момент інерції маятника без тягарців I_1 , момент інерції з тягарцями I_2 , тоді можна записати:

$$I_2 = I_1 + 4mR^2 = (I_0 + 4m_1 l^2 / 3) + 4mR^2, \quad (4.3)$$

де mR^2 – момент інерції одного тягарця на стрижні хрестовини,

I_0 – момент інерції без тягарців і стрижнів хрестовини;

$m_1 l^2 / 3$ – момент інерції одного стрижня довжиною l щодо осі обертання.

З урахуванням (4.3) вираження (4.2) приймає вигляд:

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = \left[(I_0 + 4m_1 l^2 / 3) + 4m_1 R^2 \right] / (I_0 + 4m_1 l^2 / 3). \quad (4.4)$$

Кутове прискорення маятника ε зв'язано з лінійним прискоренням тягарця, підвішеного до нитки, співвідношенням;

$$\varepsilon = a / r = 2h / r t^2, \quad (4.5)$$

де r – радіус диска, на який намотана нитка;

h – шлях, пройдений прискорено рухомим тягарцем m_2 , підвішеним до нитки;

t – час, за який тягарець проходить шлях h . Тоді

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = (t_2 / t_1)^2. \quad (4.6)$$

Вираз (4.4) з урахуванням результату (4.6) приймає вид:

$$(t_2 / t_1)^2 = (I_0 + 4m_1 l^2 / 3 + 4mR^2) / (I_0 + 4m_1 l^2 / 3). \quad (4.7)$$

Співвідношення (4.7) дозволяє перевірити справедливість (4.2). Але, переконавшись в справедливості рівності (4.2), ми тим самим переконуємося в справедливості вихідного співвідношення (4.1).

2 спосіб

Якщо момент інерції хрестовини не змінюється ($I = \text{const}$), то в цьому випадку $I\varepsilon_1 = M_1$, $I\varepsilon_2 = M_2$, тобто

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = M_1 / M_2. \quad (4.8)$$

Якщо врахувати, що $M = T \cdot r$, де T – сила натягу нитки; r – радіус шківів, (4.8) можна записати у вигляді:

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = T_1 / T_2. \quad (4.9)$$

З рівняння руху тягарця, підвішеного до нитки, можна знайти натяг нитки

$$T = m_2(g - a) = m_2(g - 2h / t^2), \quad (4.10)$$

де m_2 – маса тягарця, підвішеного до нитки. З урахуванням (4.10) і (4.6), для виразу (4.9) маємо:

$$(t_2 / t_1)^2 = m'_1 (g - 2h / t_1^2) / m'_2 (g - 2h / t_2^2). \quad (4.11)$$

Переконавшись у справедливості рівності (4.11), можемо одержати ще одне підтвердження справедливості рівності (4.1).

Наступним завданням даної роботи є визначення моменту інерції маятника.

Моментом інерції матеріальної точки щодо якої-небудь осі називається добуток маси m на квадрат відстані r до цієї осі: $I = mr^2$.

Моментом інерції тіла щодо осі називається сума моментів інерції всіх точок тіла щодо осі: $I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$.

Момент інерції характеризує міру інертності тіла до зміни ним кутової швидкості ω під дією моменту сили M .

Зі співвідношення (4.1) випливає, що момент інерції дорівнює:

$$I = M / \varepsilon = Tr / \varepsilon. \quad (4.12)$$

Якщо в (4.12) підставити (4.5) і (4.10), одержимо:

$$I_{\text{експ}} = m_2 r^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (4.13)$$

Виходить, значення моменту інерції хрестовини може бути розраховане за експериментальними даними вимірюваних величин: t , r , h , m_2 . Його можна порівняти зі значенням, отриманим із теоретичного визначення моменту інерції:

$$I_{\text{теор}} = I_0 + \frac{4m_1 l^2}{3} + 4mR^2, \quad (4.14)$$

де I_0 – момент інерції двоступінчастого диска, осі й втулки, тобто маятника без стрижнів хрестовини і тягарців на них;

m_1 – маса одного стрижня хрестовини;

l – довжина одного стрижня хрестовини;

m – маса одного тягарця, закріпленого на стрижні маятника;

R – відстань від тягарця m до осі обертання.

Механічна конструкція приладу

Загальний вид маятника Обербека зображений на рис. 4.1 і рис. 4.2. На вертикальній колоні (1), установленій на підставці (2), прикріплені два кронштейни: нижній нерухомий (3) і верхній рухомий (4) і дві нерухомі втулки: нижня (5) і верхня (6).

Підставка має регулюючі ніжки (7), що забезпечують горизонтальну установку приладу. На верхній втулці (6) за допомогою підставки (8) закріплений підшипниковий вузол диска (9) і диск (10).

Через диск намотується нитка (11). Один кінець нитки прикріплений до двоступінчастого диска (12), а на другому кінці закріплені тягарці (13).

На задній нижній втулці (5) за допомогою підставки (14) прикріплений електромагніт (15), що після підключення до нього напруги живлення, утримує за допомогою фрикційної муфти систему хрестовини разом з тягарцями в стані спокою. Рухомий кронштейн (4) можна переміщати уздовж колони і фіксувати його в будь-якому положенні, визначаючи, таким чином, довжину шляху спаду тягарців масою m_2 .

Для відліку довжини шляху на колоні нанесено міліметрову шкалу (16). На рухомому кронштейні (4) закріплений фотоелектричний датчик № 1 (17). На нерухомому кронштейні (3) закріплений фотоелектричний датчик № 2 (18), що виробляє електроімпульси для зупинки відліку часу. І одночасно з цим датчик вмикає гальмівний електромагніт.

До кронштейна (3) прикріплений кронштейн (19) із гумовими амортизаторами, що обмежують рух тягарців.

На підставці приладу є мілісекундомір. До гнізд мілісекундоміру підключені відповідно фотоелектричні датчики № 1 і № 2.

Увімкнення приладу здійснюється клавішею "Сіть". Керування приладом здійснюється натисканням клавіш "Пуск" і "Скидання". Якщо клавіша "Пуск" знаходиться у віджатому положенні, то хрестовина маятника притиснута фрикційною муфтою електромагніта і не може вільно обертатися. Під час натискання клавіші "Пуск" муфта гальмівного електромагніта віджата, і хрестовина може вільно обертатися. Натисканням клавіші "Скидання" здійснюється скидання показань табло секундоміра на нуль.

Порядок роботи з приладом

1. Натиснути клавішу "Сіть". При цьому освітлюється цифрове табло індикації часу.
2. Натиснути клавішу "Пуск" і намотати нитку на диск. Треба уважно прослідкувати, щоб нитка не мала вузлів, а також перевірити жорстке кріплення тягарців на стрижнях хрестовини.
3. Платформа з тягарцями на вільному кінці нитки при цьому піднімається вгору. Маса тягарців, що знаходяться на платформі, повинна бути незмінна. Установивши її на потрібному рівні, що повинен залишитися незмінним для різних вимірів, віджати клавішу "Пуск", при цьому хрестовина буде нерухома.
4. Зробити обнуління табло секундоміра, натиснувши клавішу "Скидання".
5. Натиснути клавішу "Пуск". Маятник Обербека при цьому прийде у рух.
6. Відлік часу закінчується, маятник зупиняється унаслідок спрацьовування нижнього фотодатчика.
7. Для повторних вимірів повторити дії, починаючи з п. 2.

Довідкові дані по установці "Маятник Обербека":

маса одного постійного тягарця на хрестовині – 200 г.
 маса перевантажень – зазначена на перевантаженнях;
 маса одного стрижня без тягарця – 50 г.
 момент інерції маятника без тягарця і стрижнів хрестовини

$$I_0 = 2,31 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

максимальна довжина шляху руху тягарців – 490 мм.

Порядок виконання роботи

Робоче завдання 1. Перевірити закон динаміки обертального руху твердого тіла першим способом. ($M = \text{const}$)

1. Виміряти величини, що входять у формулу (4.7), при $M = \text{const}$. Виміри провести 3-5 разів.
2. Результати дослідів занести в таблицю 4.1. Зробити розрахунки, висновки, оцінити помилки.

Таблиця 4.1

№ з/п	t_1 (с)	t_2 (с)	\bar{t}_1 (с)	\bar{t}_2 (с)	R (м)	$\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2$	$\frac{I_1 + 4mR^2}{I_1}$	ε (%)

Робоче завдання 2. За допомогою маятника Обербека перевірити закон обертального руху твердого тіла другим способом. ($I = \text{const}$)

1. Виміряти величини, що входять у формулу (4.11) при $I = \text{const}$. Виміри провести 3-5 разів.

2. Результати вимірів записати в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

№ з/п	t_1 (с)	t_2 (с)	\bar{t}_1 (с)	\bar{t}_2 (с)	h (м)	$\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2$	$\frac{m'_1 \left(g - \frac{2h}{t_1^2} \right)}{m'_2 \left(g - \frac{2h}{t_2^2} \right)}$	ε (%)

Робоче завдання 3. Визначити момент інерції маятника Обербека.

1. Виміряти величини, що входять у формулу (4.13). Повторити виміри 3-5 разів.

2. Результати вимірів записати в табл. 4.3. Провести розрахунки за формулами (4.13), (4.14). Зробити висновки, оцінити помилки.

Таблиця 4.3.

№ з/п	R (м)	t (с)	I експер. (кг·м ²)	I теорет. (кг·м ²)	E (%)

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке момент сили, момент інерції точки, момент інерції тіла, кутове прискорення? (Формули, одиниці вимірювання, напрям векторів \vec{M} , $\vec{\epsilon}$).
2. Напишіть основний закон динаміки обертального руху в диференціальній формі.
3. Сформулюйте основний закон динаміки обертального руху.
4. Укажіть способи перевірки закону динаміки обертального руху. Який з цих способів дає найменшу помилку?
5. Напишіть зв'язок між лінійним прискоренням і кутовим.
6. Вал масою $m=100\text{кг}$ і радіусом $R=5\text{ см}$ обертася з частотою $n=8\text{ с}^{-1}$. До циліндричної поверхні вала притиснули гальмівну колодку силою $F=40\text{ Н}$, під дією якої вал зупинився через $t=10\text{ с}$. Визначити коефіцієнт тертя.

Лабораторна робота № 5

Тема. Визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою крутильного маятника.

Мета. Ознайомлення студентів з одним із практичних методів визначення моментів інерції твердих тіл, що мають певну симетрію.

Обладнання: крутильний маятник FPM-05; досліджувані тіла; тіло еталон; штангенциркуль; технічні терези з набором тягарців.

Теоретичні відомості

Крутильні коливання використовуються для визначення моментів інерції різних тіл. Момент інерції – аналог маси. Як маса – міра інертності при поступальному русі, так і момент інерції – міра інертності тіл при обертальному русі. Величина моменту інерції щодо якої-небудь осі визначається просторовим розподілом маси тіла – геометрією маси. Аналітичне обчислення моменту інерції виконують шляхом інтегрування виразу $I = \int_V r^2 \rho dv$, де ρ – густина речовини в елементі об'єма dv , що знаходиться на відстані r від осі обертання. За складної форми поверхні й нерівномірному розподілі густини обчислення величини моменту інерції є складною задачею. У таких випадках момент інерції можна визначити експериментально на установці, яка аналогічна тій, що використовується в даній роботі.

Метод визначення моменту інерції, використовуваний у роботі, заснований на залежності періоду крутильних коливань маятника, підвішеного на дроті, від пружних властивостей матеріалу дроту і моменту інерції самого маятника.

Якщо коливне тверде тіло здійснює обертальний рух, то до нього може

бути застосований основний закон динаміки обертального руху:

$$I \cdot \ddot{\phi} = \vec{M}, \quad (5.1)$$

де I – момент інерції маятник $I \cdot \ddot{\phi} = \vec{M}$ а щодо осі OO ;

M – обертальний момент (момент сили) щодо тієї ж осі;

$\ddot{\phi}$ – кутове прискорення.

При малих кутах за законом Гука:

$$M = -k\phi, \quad (5.2)$$

де k – коефіцієнт пружності дроту.

З урахуванням (5.2) вираз (5.1) представимо у вигляді:

$$\ddot{\phi} + (k / I)\phi = 0. \quad (5.3)$$

Рівняння (5.3) відповідає диференціальному рівнянню гармонічних крутильних коливань:

$$\ddot{\phi} + \omega_0^2 \phi = 0. \quad (5.4)$$

Період таких крутильних коливань знаходиться за формулою

$$T = 2\pi\sqrt{I/k}. \quad (5.5)$$

У виразі (5.5) дві невідомі I і k , які є сталими для цього крутильного маятника. Щоб їх визначити необхідно використовувати тіло – еталон – тіло з відомим моментом інерції, або момент інерції якого легко визначити за формулами. Записують (5.5) для двох випадків

$$T_{\text{пр}} = 2\pi\sqrt{I_{\text{пр}}/k}, \quad T_{\text{ет}} = 2\pi\sqrt{(I_{\text{пр}} + I_{\text{ет}})/k}, \quad (5.6)$$

де $T_{\text{пр}}, I_{\text{пр}}$ – період коливань і момент інерції приладу,

$T_{\text{ет}}, I_{\text{ет}}$ – період коливань і момент інерції приладу разом з еталоном.

Розв'язавши систему рівнянь (5.6), можна одержати:

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{ет}} \cdot T_{\text{пр}}^2 / (T_{\text{ет}}^2 - T_{\text{пр}}^2), \quad k = 4\pi^2 I_{\text{ет}} / (T_{\text{ет}}^2 - T_{\text{пр}}^2). \quad (5.7)$$

Тепер, знаючи константи крутильного маятника, можна знайти момент інерції досліджуваного тіла (зразка). Для цього еспериментально знаходять період крутильних коливань маятника зі зразком і розраховують момент інерції з рівняння:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{(I_{\text{пр}} + I_1) / k}. \quad (5.8)$$

$$\text{Звідки} \quad I_1 = kT_1^2 / 4\pi^2 - I_{\text{пр}}. \quad (5.9)$$

Підставляючи в (5.9) вирази для $I_{\text{пр}}$ і k з (5.7), одержимо:

$$I_1 = I_{\text{ет}}(T_1^2 - T_{\text{пр}}^2) / (T_{\text{ет}}^2 - T_{\text{пр}}^2). \quad (5.10)$$

Еталоном $I_{\text{ет}}$ беруть, як правило момент інерції кулі, диска або куба.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка «Крутильний маятник FRM-05» представлена на рис.5.1.

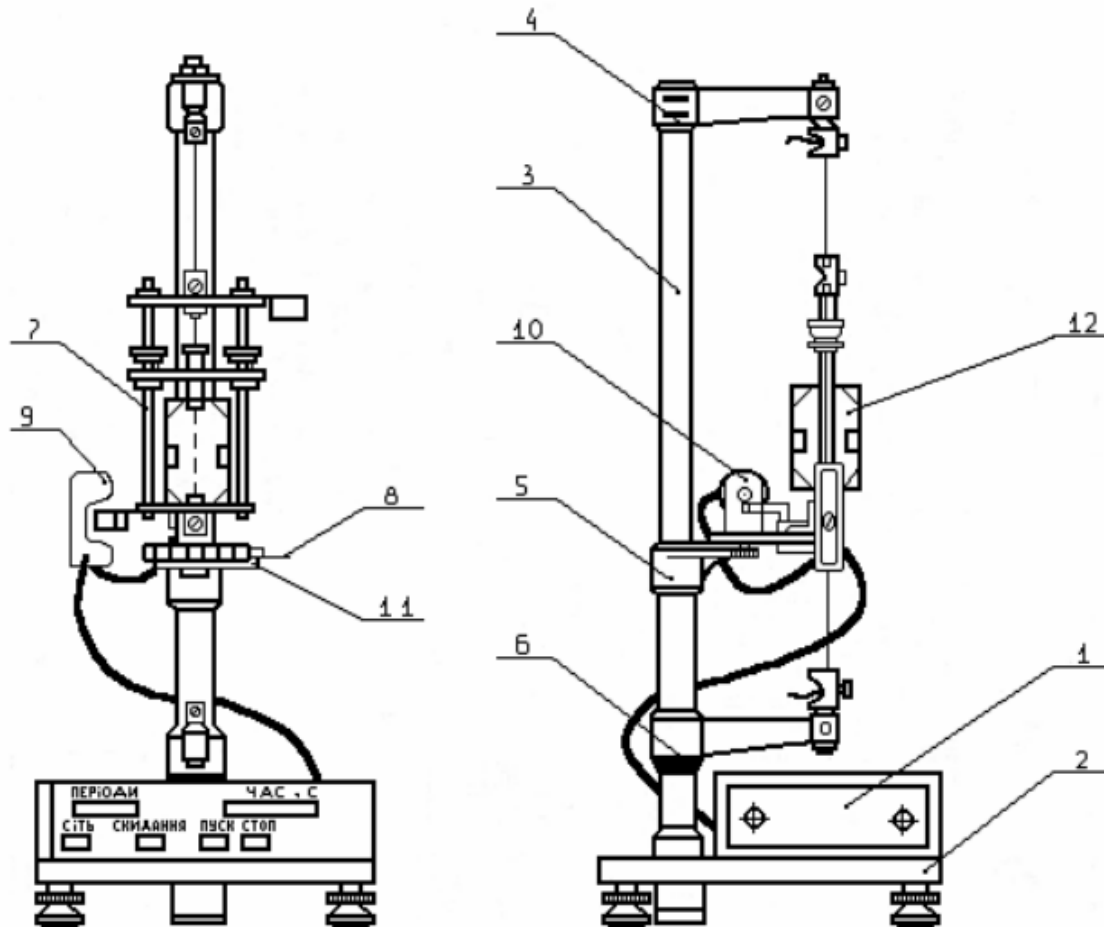


Рисунок 5.1 – Загальний вид установки «Крутильний маятник FRM-05»

На підставці 2, оснащєній чотирма ніжками з регульованою висотою, прикріплений мілісекундомір 1. У підставці закріплєна колона 3, на якій за допомогою притискних гвинтів закріплєні кронштейни 4,5,6. Кронштейни 4 і 6

мають затиски, що служать для закріплення сталевго дроту, на якому підвішена рамка 7. На кронштейні 5 закріплена сталева плита 8, що служить підставкою фотоелектричному датчику 9, електромагніту 10 і шкалі 11. Електромагніт 10 може змінювати положення на плиті, а його положення щодо фотоелектричного датчика, показує на шкалі стрілка, прикріплена до електромагніта. У рамці кріпляться досліджувані тіла 12. Тіла кріпляться за допомогою рухливої балки, що переміщується по напрямним між нерухомими балками. За допомогою фотоелектричного датчика можна змінювати число повних коливань тіла. Для виміру початкового кута ϕ закручування дроту користуються шкалою 11.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути прилад натисканням кнопки «Сіть». Установити електромагніт у положення, що відповідає початковому куту відхилення ϕ . Для цього закрутити рамку до зіткнення пластинки з осердяем електромагніту. Натиснути кнопку «Пуск». Після того, як на лічильнику числа коливань з'явиться цифра «9», натиснути кнопку «Стоп». За формулою $T = t / n$ визначити період коливань маятника $T_{пр}$ (t -час коливань, n - число повних коливань). Повторити виміри декілька разів і результат занести в таблицю 5.1.

2. Далі установити за допомогою лаборанта в рамку еталон і повторити зазначені вище операції, щоб знайти $T_{ет}$. Потім витягти еталон з рамки і виміряти його розміри (масу еталона визначити зважуванням, розміри еталона виміряйте штангенциркулем) і занести в таблицю 5.1.

3. Після цього закріпити у рамці друге тіло-зразок і знову повторити зазначені вище операції (попередньо натиснувши клавішу «Скидання») для виміру періоду коливань T_1 . Результати вимірів занести в таблицю 5.1

4. Нижче таблиці запишіть дані для розрахування помилок.

Таблиця 5.1

№ з/п	$n_{пр}$	$t_{пр}$ (с)	$n'_{ет}$	$t_{ет}$ (с)	n_1	t_1 (с)	m (кг)	r (м)

Кількість дослідів –

Коефіцієнт Стьюдента –

Систематична помилка виміру маси еталону (кулі) (кг) –

Систематична помилка виміру еталону (м) –

Систематична помилка періоду (с):

$$\Delta T_{\text{пр}} -$$

$$\Delta T_{\text{ет}} -$$

$$\Delta T_1 -$$

Обробка результатів вимірів

1. У роботі розрахуйте такі величини:

$T_{\text{пр}}$ – період крутильних коливань приладу;

$T_{\text{ет}}$ – період крутильних коливань приладу з еталоном;

T_1 – період крутильних коливань приладу зі зразком;

$I_{\text{ет}}$ – момент інерції еталона (для кулі $I_{\text{ет}} = (2/5)mR^2$, для диска

$I_{\text{ет}} = (1/2)mR^2$; для куба $I_{\text{ем}} = (1/6)ma^2$ (а – довжина сторони куба));

2. Знайти систематичну помилку виміру моменту інерції еталона за формулою:

$$\Delta I_{\text{ет}} = I_{\text{ет}} (\Delta m / m + 2\Delta R / R). \quad (5.11)$$

3. Момент інерції зразка I_1 , розрахувати за формулою (5.10).

4. Систематичну помилку виміру моменту інерції зразка знайти за формулою

$$\begin{aligned} \frac{(\Delta I_1)_{\text{пр}}}{\bar{I}_1} = & \frac{(\Delta I_{\text{ет}})_{\text{пр}}}{\bar{I}_{\text{ет}}} + 2 \frac{\bar{T}_1 (\Delta T_1)_{\text{пр}}}{\bar{T}_1^2 - T_{\text{пр}}^2} + \\ & + 2 \frac{\bar{T}_{\text{ет}} (\Delta T_{\text{ет}})_{\text{пр}}}{\bar{T}_{\text{ет}}^2 - \bar{T}_{\text{пр}}^2} + 2 \frac{(\bar{T}_1^2 - T_{\text{ет}}^2) \bar{T}_{\text{пр}} (\Delta T_{\text{пр}})}{(\bar{T}_1^2 - \bar{T}_{\text{пр}}^2)(\bar{T}_{\text{ет}}^2 - \bar{T}_{\text{пр}}^2)}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

5. Далі обробку результатів вимірів провести згідно з існуючими правилами.

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке момент інерції тіла?
2. Що таке крутильні коливання?
3. Як визначити момент інерції тіла довільної форми, користуючись крутильним маятником?
4. З якою метою під час вимірів тіло закручують на невеликий кут?
5. Записати рівняння динаміки обертального руху.

6. Як співвідносяться моменти інерції двох гогеетрично подібних тіл, якщо відношення їхніх лінійних розмірів дорівнює n , а густина однакова?

7. Порівняти теоретичне значення моменту інерції досліджуваного тіла з експериментальним.

8. Чи може бути в одного тіла кілька різних значень моменту інерції? Наведіть приклади.

Лабораторна робота № 6

Тема. Вивчення законів динаміки обертального руху і визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою маятника Максвелла.

Мета. Вивчити закони руху маятника Максвелла і визначити за його допомогою момент інерції твердих тіл.

Обладнання: маятник Максвелла FRM-03; комплект змінних кілець

Теоретичні відомості

Кожен складний рух абсолютно твердого тіла може бути представлений як сукупність простих рухів : поступального і обертального.

Поступальним рухом твердого тіла називають такий його рух, при якому кожна його лінія, що з'єднує дві будь-які точки тіла, переміщається паралельно сама собі. Під час поступального руху зміщення усіх точок тіла за будь-який проміжок часу однакове. Тому під час поступального руху твердого тіла всі його точки мають у даний момент часу однакові швидкості й прискорення. Таким чином, знаючи рух якоїсь однієї точки, ми можемо визначити рух всіх інших точок тіла.

Обертальним рухом називається такий рух, при якому траєкторії всіх точок тіла є концентричні кола з центром на одній прямій, що називається віссю обертання. Вісь обертання може лежати поза тілом чи проходити крізь нього. Обертання тіла характеризується кутовою швидкістю і кутовим прискоренням. Причиною, що викликає обертальний рух тіла, є наявність моментів сил, що діють на тіло. Моментом сили \vec{M} щодо довільної точки називається векторний добуток:

$$\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}], \quad (6.1)$$

де \vec{F} – діюча сила;

\vec{r} – радіус – вектор, що характеризує положення точки прикладання сили щодо довільно обраної точки.

Унаслідок обертання тіла навколо нерухомої осі всі частинки тіла роблять плоский рух, тобто переміщуються в паралельних площинах; причому лінійні швидкості та прискорення різних частинок різні й тим більші, чим далі час-

тинка від осі обертання. Кутова ж швидкість $\vec{\omega}$ однакова для всіх частинок тіла при його обертанні навколо нерухомої осі. Зміна кутової швидкості характеризується величиною кутового прискорення :

$$\vec{\beta} = d\vec{\omega} / dt. \quad (6.2)$$

Зв'язок між лінійною швидкістю \vec{v} і кутовою $\vec{\omega}$ задається співвідношенням:

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \vec{r}]. \quad (6.3)$$

Тангенціальне прискорення \vec{a}_τ і кутове прискорення $\vec{\beta}$ зв'язані співвідношенням :

$$\vec{a}_\tau = [\vec{\beta} \vec{r}]. \quad (6.4)$$

Зв'язок між кутовим прискоренням і моментом сил, що діють на тіло, яке обертається навколо нерухомої осі z задається співвідношенням:

$$I_Z \beta_Z = M_Z, \quad (6.5)$$

чи

$$I_Z d\omega_Z / dt = M_Z, \quad (6.6)$$

де M_Z – проекція моменту сил, що діє на тіло, на вісь z;

β_Z і ω_Z – проекція кутового прискорення і кутової швидкості на вісь z;

I_Z – момент інерції щодо даної осі обертання z:

$$I_Z = \sum m_i r_i^2, \quad (6.7)$$

де m_i – маса i-ої точки тіла;

r_i – відстань цієї точки від осі обертання.

Вирази (6.5) і (6.6) представляють основний закон динаміки для твердого тіла, що обертається навколо нерухомої осі. Він аналогічний другому закону динаміки для поступального руху тіла, тільки замість сили тут входить момент сил щодо осі, замість лінійного прискорення – кутове, момент інерції тіла щодо осі обертання замість маси.

Момент інерції – аналог маси. Як маса – міра інертності під час поступального руху, так і момент інерції – міра інертності під час обертального руху. Під час обертання тіла навколо різних осей моменти інерції різні. Величина моменту інерції визначається просторовим розподілом мас. Кожне тіло, незалежно від того, обертається воно чи знаходиться у стані спокою, має певний

момент інерції щодо будь-якої осі, подібно тому, як тіло має масу незалежно від того, чи рухається воно, чи знаходиться у стані спокою. Аналітичне обчислення моменту інерції виконується шляхом інтегрування виразу:

$$I = \int_v r^2 \rho dV, \quad (6.8)$$

де ρ – густина речовини в елементі об'єму dV , що знаходиться на відстані r від осі обертання.

У разі складної форми поверхні, що обмежує тіло і нерівномірному розподілі густини, аналітичний підрахунок моменту інерції може бути досить складною задачею. Експериментально ж момент інерції визначається легко. У цій роботі момент інерції визначається за допомогою маятника Максвелла.

Якщо яким-небудь способом визначити момент інерції тіла щодо осі, що проходить через центр мас I_c , то момент інерції щодо будь-якої паралельної їй осі I , буде визначатися за теоремою Штейнера:

$$I = I_c + md^2, \quad (6.9)$$

де d – відстань між осями;
 m – маса тіла.

Виходячи з вищесказаного, будемо представляти плоский рух твердого тіла як сукупність поступального руху й обертального руху щодо осі, що проходить через центр мас. При цьому кінетична енергія твердого тіла буде визначатися як сума енергії поступального руху зі швидкістю, рівною швидкості центра мас V_c і енергії обертання навколо осі, що проходить через центр мас тіла і рівною $I_c \omega^2 / 2$, де I_c – момент інерції тіла щодо осі обертання:

$$E_k = mV_c^2 / 2 + I_c \omega^2 / 2. \quad (6.10)$$

1.1 Рух маятника Максвелла

Маятник Максвелла являє собою тіло з віссю, що проходить через центр мас і рухається під впливом сили ваги на двох нитках, попередньо намотаних на вісь обертання (рис.6.1). Нитки під час руху вниз розмотуються до повної довжини. Маятник, що розкрутився, продовжує обертальний рух у цьому напрямку і намотує нитку на вісь, унаслідок чого він піднімається угору, сповільнюючи при цьому обертання. Дійшовши до верхньої точки, маятник знову буде опускатися вниз тощо. Вісь маятника буде робити зворотно-поступальний рух.

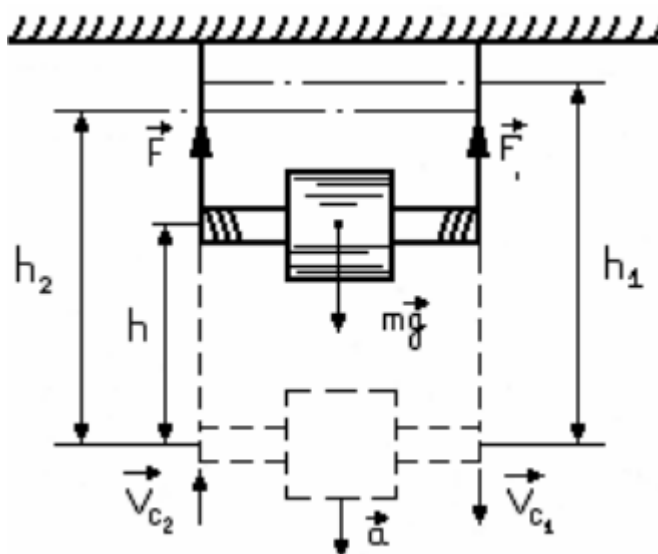


Рисунок 6.1 – Схема маятника Максвелла

Рух маятника може бути підрозділений на три стадії, а саме: його опускання, удар, підйом угору. Відповідно до цього сили, що діють на маятник, повинні бути підрозділені на сили тривалої дії (під час опускання і підйому) і сили короточасної дії (під час удару). У першому випадку ці сили не змінюються у разі обертання, у другому – вони різко збільшуються і зменшуються.

Удар під час опускання маятника відрізняється від удару, наприклад кульки об плиту. Кінетична енергія тіла, що падає (кульки) у першу стадію зникає цілком. Під час удару маятника цього не відбувається, тому що залишається кінетична енергія його обертання.

Рівняння руху маятника без урахування сил тертя об повітря і відхилення ниток від вертикалі (воно дуже мале) під час плоского руху маятника мають вигляд:

$$ma = mg - 2F, \quad (6.11)$$

$$I_0\beta = DF, \quad (6.12)$$

$$a = \beta D / 2, \quad (6.13)$$

де m – маса маятника;

I_0 – момент інерції маятника щодо осі обертання;

D – зовнішній діаметр осі маятника разом з намотаною на неї ниткою підвіски;

$2F$ – сила натягу ниток.

Ці рівняння застосовні як у першій, так і в третій стадії руху маятника.

Початкові умови для них у різних стадіях різні. Якщо опускати маятник,

початкова швидкість його центра мас буде дорівнювати нулю, під час його підйому вона відмінна від нуля.

Для швидкості опускання центра інерції мас маятника безпосередньо перед його ударом маємо:

$$V_{c1} = at_1 = 2h_{1/} / t_1 , \quad (6.14)$$

де t_1 – час руху маятника до удару;

$h_{1/}$ – відстань, на яку опускається маятник за цей час.

Під час підйому маятника угору він рухається рівноуповільнено з прискоренням a , спрямованим як під час його опускання вниз.

Швидкість руху його центра мас задається рівнянням:

$$-V_c = -V_{c2} + at , \quad (6.15)$$

де V_c – швидкість маятника через час t

V_{c2} – початкова швидкість руху маятника угору;

t – час, відлічуваний від початку цього руху;

Поява швидкості V_{c2} обумовлена триваючим по інерції обертанням маятника в нижній точці його траєкторії. Намотування при цьому обертанні ниток на його стрижень і приводить до підйому з початковою швидкістю V_{c2} .

Величина цієї швидкості визначається з умови рівності нулю кінцевої швидкості: $V_c = 0$, тоді

$$V_{c2} = at_2 = 2h_2 / t_2 , \quad (6.16)$$

де t_2 – час підйому маятника до його зупинки;

h_2 – відстань, пройдена ним за цей час.

Відстань, пройдена віссю маятника під час його підйому, менша, ніж під час його опусканні. Різниця цих відстаней характеризує зменшення механічної енергії у разі опускання (чи підйому) маятника.

$$mgh = mV_c^2 / 2 + I_c \omega^2 / 2. \quad (6.17)$$

З урахуванням співвідношення (6.14) чи (6.16), одержуємо для моменту інерції :

$$I_c = (mD^2 / 4)(gt_{1,2}^2 / 2h_{1,2} - 1) , \quad (6.18)$$

де $t_{1,2}$ – час опускання (чи підйому) маятника;

$h_{1,2}$ – відстань, на яку опускається (піднімається) маятник.

Друга стадія руху – удар. Явище удару тіл, як уже згадувалося,

супроводжується різкою зміною сил взаємодії при дуже малому часі цих змін. Ці сили спочатку (перша стадія удару) наростають, а потім (друга стадія) зменшуються. Залежність цих сил від часу, як правило, невідома. Застосування рівняння руху в явному вигляді стає неможливим.

Опис експериментальної установки

Загальний вигляд установки зображений на рис.6.2. Підставка 1 оснащена регульованими ніжками 2, якими дозволяють зробити вирівнювання приладу. У підставці закріплена колона 3, до якої прикріплений нерухомий верхній кронштейн 4 і рухомий нижній кронштейн 5. На верхньому кронштейні знаходиться електромагніт 6, фотоелектричний датчик №1 (7) і вороток 8 для закріплення і регулювання довжини біфілярної підвіски маятника. Нижній кронштейн разом із прикріпленим до нього фотоелектричним датчиком №2 (9) можна переміщати уздовж колони і фіксувати в довільно обраному положенні. Маятник 10 приладу – це ролик, закріплений на осі й підвішений на біфілярному підвісі, на який накладаються змінні кільця 11, змінюючи таким чином момент інерції системи.

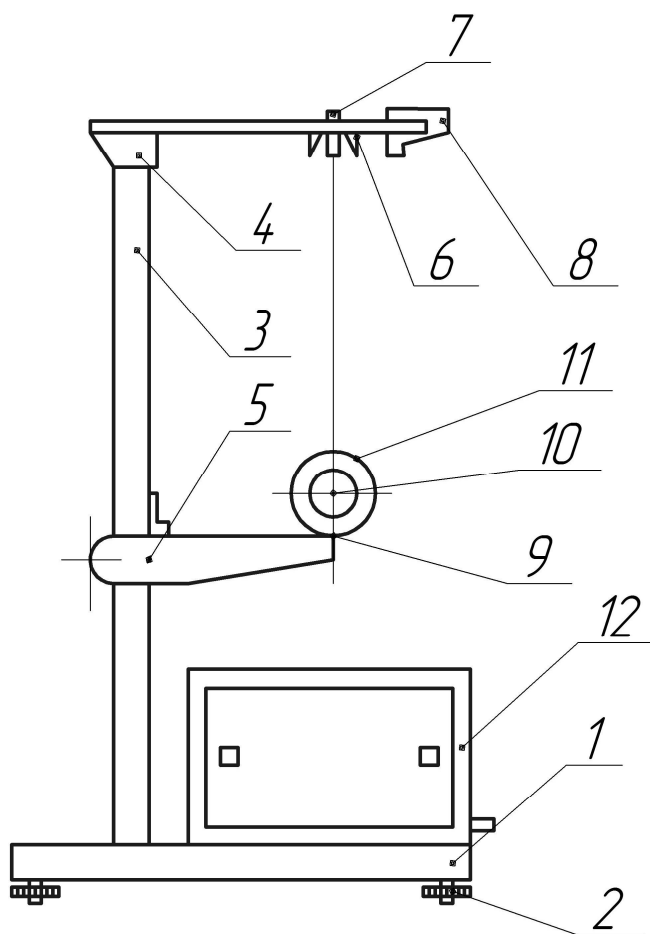


Рисунок 6.2 – Загальний вигляд установки
"Маятник Максвелла FRM-03"

Маятник з накладеним кільцем утримується у вертикальному положенні електромагнітом. Довжина маятника визначається за міліметровою шкалою на колоні приладу. З метою полегшення цього виміру нижній кронштейн оснащено червоним покажчиком, поміщеним на висоті оптичної осі нижнього фотоелектричного датчика.

Порядок виконання роботи

Перед початком роботи необхідно провести вирівнювання приладу. Нижній кронштейн приладу зафіксувати в крайнім нижнім положенні. На ролик маятника накласти кільце, притискаючи його до упору. На вісь маятника намотати нитку підвіски і зафіксувати її. Перевірити, чи відповідає нижній край кільця нулю шкали на колоні. Якщо ні, відгвинтіть верхній кронштейн і відрегулюйте його висоту. Пригвинтити верхній кронштейн. Натиснути кнопку “ПУСК” мілісекундоміра. Деблокувати гайку воротка для регулювання довжини біфілярної підвіски. Вибрати довжину нитки таким чином, щоб край сталевого кільця після опускання маятника знаходився на 1 мм нижче оптичної осі нижнього фотоелектричного датчика. Одночасно провести корегування установки маятника, звертаючи увагу на те, щоб вісь його була паралельною підставці приладу. Блокувати вороток. Віджати клавішу “Пуск” мілісекундоміра.

Намотати на вісь маятника нитку підвіски, звертаючи увагу на те, щоб вона намотувалася рівномірно – виток до витка. Фіксувати маятник за допомогою електромагніту, звертаючи увагу на те, щоб нитка при цьому положенні була не дуже затягнута. Повернути маятник у напрямку його руху на кут близький 5° . Натиснути клавішу “Скидання”. Натиснути клавішу “Пуск”. Порахувати обмірюване значення часу падіння маятника. Провести вимір часу не менш 5 разів. За шкалою на вертикальній колоні приладу визначити довжину маятника. Визначим діаметр осі разом з намотаною на неї ниткою за формулою:

$$D = D_o + 2D_n, \quad (6.19)$$

де D_o – діаметр осі маятника;

D_n – діаметр нитки.

Визначити масу маятника разом з кільцем за формулою:

$$m = m_o + m_k + m_p, \quad (6.20)$$

де m_o – маса осі маятника;

m_k – маса кільця,

m_p – ролика.

Значення мас окремих елементів нанесені на них.

За формулою (6.18) визначити момент інерції маятника. Виміри провести з великою обережністю, тому що маятник легко пошкодити, якщо навіть незначно погнути його стрижень. Роботу провести, суворо дотримуючись правил техніки безпеки.

Отримані дані експерименту занесіть в таблицю (таблиця складається самим студентом). Нижче таблиці запишіть дані для розрахування помилок:

Кількість дослідів –

Коефіцієнт Стьюдента –

Систематична помилка виміру часу (с) –

Систематична помилка виміру висоти (м) –

Систематична помилка виміру діаметра нитки (м) –

Систематична помилка виміру діаметра осі (м) –

Систематична помилка виміру діаметра кільця (м) –

Обробка результатів вимірів

Обчисліть за експериментальними даними значення моменту інерції маятника, а також відносну й абсолютну помилки його визначення:

$$\Delta I = |\bar{I}_C - I_T|, \quad (6.21)$$

$$\varepsilon = (\Delta I / I_T) 100\%, \quad (6.22)$$

де \bar{I}_C – середнє значення моменту інерції, визначеного експериментально;

I_T – теоретичне значення, розраховане за формулою:

$$I_T = I_o + I_p + I_k, \quad (6.23)$$

де I_o – момент інерції осі маятника;

I_p – момент інерції ролика;

I_k – момент інерції кільця.

Значення окремих моментів інерції визначаються за формулами:

$$I_o = (1/8)m_o D_o^2, \quad (6.24)$$

$$I_p = (1/8)m_p (D_o^2 + D_p^2), \quad (6.25)$$

$$I_k = (1/8)m_k(D_p^2 + D_k^2), \quad (6.26)$$

де D_o – діаметр осі маятника ($D_o = 10\text{мм}$);

D_p – зовнішній діаметр ролика ($D_p = 86\text{мм}$);

D_k – зовнішній діаметр кільця ($D_k = 105\text{мм}$).

Остаточний результат подайте у вигляді:

$$I_c = \bar{I}_c \pm \Delta I_c, \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$\varepsilon = (\Delta \bar{I}_c / \bar{I}_c) \cdot 100 \%$$

Контрольні запитання і завдання

1. Сформулюйте умови рівноваги твердого тіла, що має нерухому вісь.
2. Дайте аналіз основного рівняння динаміки обертального руху.
3. Який фізичний зміст моменту інерції твердого тіла?
4. Сформулюйте теорему Гюйгенса-Штейнера.
5. Як визначається кінетична енергія тіла, що здійснює поступальний і обертальний рух?
6. Виведіть формулу для моменту інерції твердого тіла, що визначається за допомогою маятника Максвелла.

Лабораторна робота № 7

Тема. Визначення моменту інерції маховика.

Мета. Навчитися визначати момент інерції тіл щодо нерухомої осі обертання, правильно вести спостереження, виміри, розрахунок помилок, враховувати сили тертя в реальних системах.

Практичне значення. Досліджувані закони, явища лежать в основі роботи машини, механізмів машин.

Теоретичні відомості

Систему, момент інерції якої визначається в даній роботі, зображено на рисунку 7.1 – горизонтально розташований вал. З ним жорстко зв'язаний маховик 2 і шків 1, на який намотується тонка нитка (нерозтяжна), до вільного кінця нитки прикріплена гиря 3. Під час намотування нитки на шків гиря 3 піднімається над підлогою на висоту h , при цьому вал повертається на n_1 оборотів.

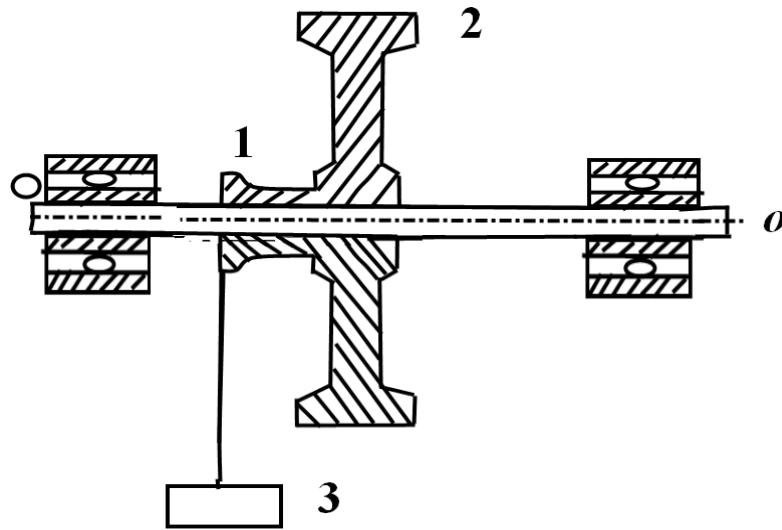


Рисунок 7.1 – Схема експериментальної установки

Надавши систему самої собі, гиря опускається, вал разом з маховиком прискорено обертається. При цьому кутова швидкість системи залежить від висоти h підняття гирі 3, її маси і від моменту інерції системи. При розрахунку необхідно врахувати дію сили тертя в опорних підшипниках вала і розрахувати роботу сили тертя A за n_1 , оборотів. Спостерігаючи сповільнене обертання системи після того, як гиря досягла підлоги, а нитка зісковзнула зі шківів і на систему діє тільки сила тертя, відраховують число оборотів n_2 до повної зупинки системи.

Система, в якій діють сили тертя, називається дисипативною. У цьому випадку зміна повної механічної енергії дорівнює роботі сили тертя, тобто $dW = dA_{\text{дис}}$.

Розглядаючи систему, ми бачимо, що вона складається з гирі масою m і маховика (зі шківом і валом) з моментом інерції I . У той момент, коли гиря піднята над підлогою на висоту h , система має потенціальну енергію mgh . У результаті падіння гирі потенціальна енергія перетворюється в кінетичну енергію гирі й маховика (не цілком, тому що є сила тертя). Коли гиря досягла підлоги, повна механічна енергія системи складається з кінетичної енергії поступального руху гирі $mv^2/2$ і кінетичної енергії обертального руху маховика $I\omega^2/2$.

Зміна повної механічної енергії за цей час дорівнює роботі сили тертя

$$(mv^2/2 + I\omega^2/2) - mgh = A_1, \quad (7.1)$$

де v – її швидкість безпосередньо перед ударом об підлогу;

ω – кутова швидкість маховика в той же момент часу;

A_1 – робота сили тертя за n_1 оборотів.

Силу тертя приблизно можна вважати постійною, і тоді рух гирі буде рівноприскореним, для якого

$$v = at; \quad h = at^2/2, \quad (7.2)$$

де a – лінійне прискорення гирі;

t – час падіння гирі до підлоги;

З цих рівнянь виходить:

$$v = 2h/t. \quad (7.3)$$

Кутова швидкість обертання $\omega = v/r$. Отже,

$$\omega = 2h/rt, \quad (7.4)$$

де r – радіус шківів.

Величини t , n , r безпосередньо вимірюються, v і ω обчислюються.

Для визначення моменту інерції потрібно за формулами знайти роботу сили тертя за час падіння тягарця. Якщо сила тертя постійна, то робота її пропорційна числу оборотів за час падіння гирі.

Робота за n_1 і n_2 оборотів відповідно дорівнює:

$$A_1 = -\alpha n_1; \quad A_2 = -\alpha n_2,$$

де α – позитивний коефіцієнт,

n_1 – число оборотів системи за час падіння, гирі

n_2 – число оборотів від моменту, коли гиря досягла підлоги і нитка зісковзнула зі шківів до повної зупинки системи.

Робота сили тертя негативна, отже:

$$\alpha = I\omega^2/2n_2,$$

$$A_1 = -n_1 I\omega^2/2n_2. \quad (7.5)$$

Підставимо A_1 в рівність (7.1):

$$(mv^2/2 + I\omega^2/2) - mgh = -n_1 I\omega^2/2n_2.$$

Після перетворення одержуємо:

$$I = \frac{mr^2(gt^2 - 2h)}{2h(1 + n_1/n_2)}. \quad (7.6)$$

Формулу (7.6) можна спростити, оскільки в даній лабораторній роботі величина $gt^2 \gg 2h$. Крім того, $r = d/2$, де d – діаметр шківів. У підсумку одержимо:

$$I = \frac{mgd^2t^2}{8h(1 + n_1/n_2)}. \quad (7.7)$$

Порядок виконання роботи

1. Штангенциркулем кілька разів виміряйте діаметр шківів у різних місцях.

2. Надягніть петлю, що є на вільному кінці нитки, прив'язаної до тягарця 3 на шків 1; обертаючи маховик, підніміть гирю над підлогою на висоту h . Причому h повинна відповідати цілому числу оборотів n_1 . Для цього при нижнім положенні гирі, при натягнутій нитці, на маховику крейдою наносять горизонтальну риску. За цією рискою потрібно стежити під час намотування нитки на шків.

3. Виміряйте висоту підняття гирі h від підлоги до її нижньої підставки, маховик дотримуйте рукою.

4. Відпустіть маховик і одночасно увімкніть секундомір. Зупиніть його в той момент, коли гиря торкнеться підлоги. Показання секундоміра t занесіть у таблицю 7.1.

5. Підрахуйте число оборотів маховика n_2 після удару гирі об підлогу до повної зупинки. Досліди 3, 4, 5 повторіть не менш п'яти разів. Результати вимірів занесіть у таблицю 7.1.

6. Нижче таблиці запишіть дані для розрахунків помилок.

Таблиця 7.1

№ з/п	m (кг)	h (м)	n_1	n_2	d (м)	t (с)	I (кг · м ²)

Кількість дослідів =

Коефіцієнт Стьюдента =

Систематична помилка маси гирі, що падає (кг) =

Систематична помилка замірів висоти (м) =

Систематична помилка під час виміру часу (с) =

Систематична помилка під час виміру діаметра шківів (м) =

Маса маховика (кг) =

Радіус маховика (м) =

Δn_1 і Δn_2 практично можна знехтувати.

Обробка результатів вимірів

Обробку результатів вимірів проведіть згідно з існуючими правилами.

Контрольні запитання і завдання

1. Які системи називаються консервативними?
2. Які системи називаються дисипативними?
3. За рахунок дії яких сил міняється механічна енергія системи? Як підраховуються ці зміни?
4. Що таке момент інерції? Який фізичний зміст моменту інерції?
5. Чи може бути в одного тіла кілька різних значень моменту інерції? Наведіть приклади.
6. Які сили впливають на кутову швидкість обертання маховика? Як спрямовані вектори моментів цих сил?
7. Як зміниться кутове прискорення, якщо натяг нитки збільшити в 2 рази?
8. Довести формулу для обчислення систематичної помилки моменту інерції.
9. Запишіть і сформулюйте закон збереження і перетворення енергії для систем, в яких поряд з поступальним рухом має місце і обертальний рух.

Лабораторна робота № 8

Тема. Визначення швидкості кулі за допомогою балістичного крутильного маятника.

Мета. Вивчення принципу дії балістичного маятника і визначення швид-

кості кулі методом крутильного маятника.

Прилади і матеріали: експериментальна установка.

Теоретичні відомості

Основним елементом експериментальної установки є крутильний маятник (рис. 8.1). Куля масою m попадає в чашечку А, наповнену пластиліном, що поміщена на кінці горизонтального стрижня. Горизонтальний стрижень з рухомими тягарцями М і сталевим вертикальним дротом утворить крутильний маятник.

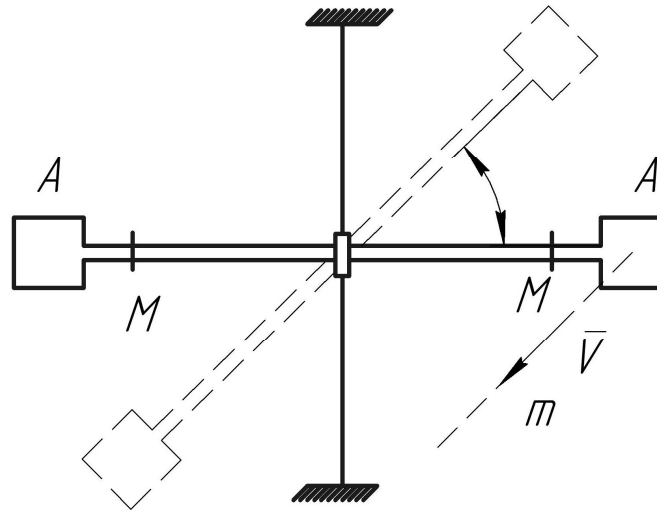


Рисунок 8.1 – Схема крутильного маятника

Унаслідок влучення кулі маятник починає обертатися навколо вертикальної осі. За умови, що час гальмування кулі в чашечці А багато менше періоду коливань маятника, можемо скористатися законом збереження моменту імпульсу:

$$mvl = (I_K + I)\Omega, \quad (8.1)$$

де v, m – відповідно швидкість і маса кулі;

l – відстань від осі коливання маятника до місця влучення кулі в пластилін;

I_K – момент інерції кулі щодо осі коливання маятника;

I – момент інерції маятника щодо осі коливання;

Ω – кутова швидкість маятника безпосередньо після удару. З урахуванням, що $I \gg ml^2$ з (8.1) одержуємо

$$v = I\Omega / ml. \quad (8.2)$$

У разі повороту маятника з положення рівноваги на деякий кут ϕ на нього з боку нитки діє момент пружної сили

$$M_{\text{пр}} = -D\phi \quad (8.3)$$

пропорційний кутові повертання ϕ ; D – постійна, що характеризує момент пружних сил.

Для визначення періоду коливань, скористуємося рівнянням руху твердого тіла, що обертається

$$M_{\text{пр}} = I\varepsilon, \quad (8.4)$$

де $\varepsilon = d^2\phi/dt^2$ – кутове прискорення. Рівняння (8.4) з урахуванням (8.3) приймає вигляд

$$I\ddot{\phi} + D\phi = 0. \quad (8.5)$$

Приведемо рівняння (8.5) до виду:

$$\ddot{\phi} + (D/I)\phi = 0. \quad (8.6)$$

Рівняння (8.6) має рзв'язок $\phi = \phi_0 \cos(\omega_0 t + \alpha_0)$,

де ϕ_0 – амплітуда,

$\omega_0 = \sqrt{D/I}$ – власна частота коливань (циклічна), зв'язана з періодом T формулою ;

α_0 – початкова фаза,

$$\omega_0 = 2\pi/T. \quad (8.7)$$

Для визначення величини Ω застосуємо закон збереження енергії: максимальна кінетична енергія маятника $E_{k\text{max}} = I\Omega^2/2$ буде дорівнювати максимальній потенціальній енергії $E_{\text{пmax}} = D\phi_{\text{max}}^2/2$.

$$I\Omega^2/2 = D\phi_{\text{max}}^2/2. \quad (8.8)$$

Слід зазначити, що (8.8) отримано для незатухаючих коливань, у той час як насправді коливання завжди загасають (через тертя об повітря, не цілком твердого закріплення точки підвісу тощо). Якщо, однак, загасання невелике, тобто зміна амплітуди коливань за період багато менше самої амплітуди, то співвідношенням (8.8) можна користуватися. Критерієм його застосовності служить нерівність

$$N \gg 1, \quad (8.9)$$

де N – число повних коливань, після яких амплітуда зменшується в 2 рази.

З (8.7) і (8.8) маємо

$$\Omega = 2\pi\phi_{\max}/T. \quad (8.10)$$

Підставляючи (8.10) у (8.2), одержимо

$$v = 2\pi I\phi_{\max}/Tm\ell. \quad (8.11)$$

Момент інерції маятника визначається

$$I = I_0 + 2MR^2, \quad (8.12)$$

де I_0 – момент інерції маятника (без тягарців) щодо осі обертання;

$2M$ – маса двох наявних на маятнику рухомих тягарців;

R – відстань від центра мас кожного з цих тягарців до осі обертання.

Період коливань маятника

$$T = 2\pi\sqrt{(I_0 + 2MR^2)/2} \quad (8.13)$$

залежать від R . Для двох значень R маємо:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{(I_0 + 2MR_1^2)/D}, \quad T_2 = 2\pi\sqrt{(I_0 + 2MR_2^2)/D}. \quad (8.14)$$

З (8.14) неважко знайти I_0 :

$$I_0 = 2M(R_2^2T_1^2 - R_1^2T_2^2)/(T_2^2 - T_1^2). \quad (8.15)$$

Для зменшення помилки, з якою визначається величина I_0 , відстань

R_1 варто вибрати мінімальною до осі обертання, а R_2 – максимальною від неї.

Підставляючи (8.12) і (8.15) у (8.11), знаходимо остаточну формулу для розрахунку v :

$$v = 4\pi MT_1\phi_{\max} (R_2^2 - R_1^2)/m\ell (T_2^2 - T_1^2). \quad (8.16)$$

Опис установки

Загальний вигляд балістичного маятника показано на рис. 8.2. Підставка 1 приладу оснащена регульованими ніжками 2, що дозволяють виставити горизонтальне положення приладу.

У підставці закріплена колона 3, на якій знаходяться верхній 4, нижній 5 і середній 6 кронштейни. До середнього кронштейна прикріплений стріляючий пристрій 7, а також прозорий екран, із нанесеною на нього кутовою шкалою 8 і

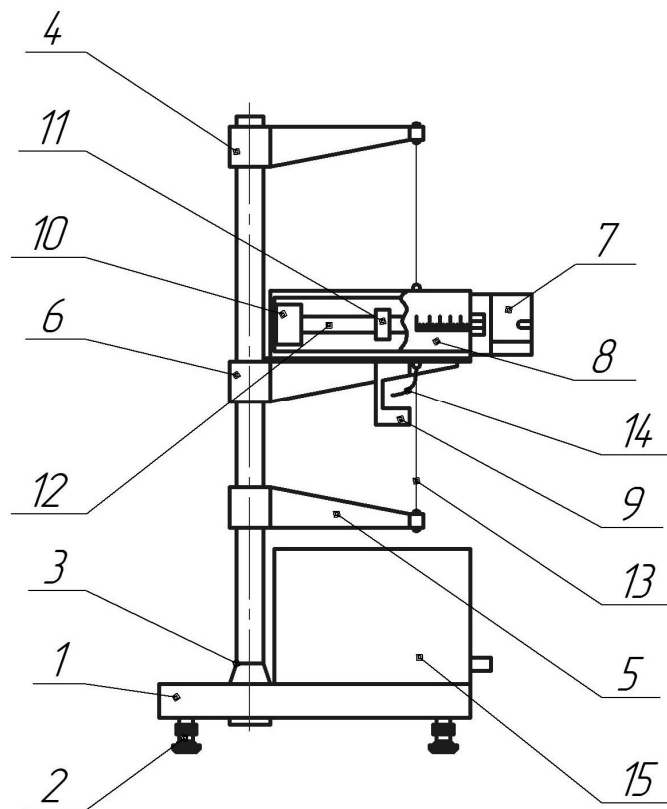


Рисунок 8.2 – Загальний вигляд балістичного маятника

Кронштейни 4 і 5 мають затиски для кріплення сталевого дроту 13. На дроті підвішений маятник, що складається з двох чашечок, наповнених пластиліном 10, двох переміщуваних тягарців 11, двох стрижнів 12 і водилки 14. Фотоелектричний датчик з'єднаний з універсальним мілісекундоміром 15. Вигляд передньої панелі мілісекундоміра представлений на рис. 8.3.

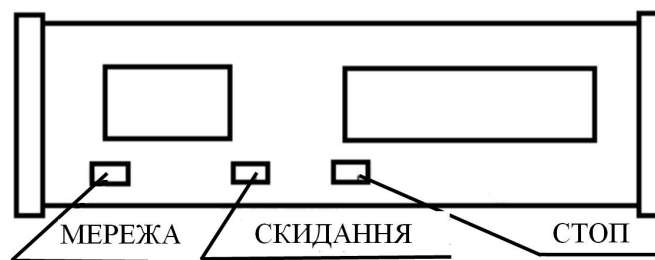


Рисунок 8.3 – Вигляд передньої панелі мілісекундоміра

Порядок виконання роботи

1. Приведіть установку в горизонтальне положення.
2. Рухомі тягарці M , що знаходяться на стрижні маятника, максимально наблизьте один до одного. Виміряйте значення $R_1 = R_{\min}$.

3. Поставте маятник у такому положенні, щоб риска на чашечці показувала кут відхилення $\phi = 0$.
4. Вистріліть кулею зі стріляючого пристрою.
5. Виміряйте відхилення маятника $\phi = \phi_{\max}$ і прицільну відстань ℓ .
6. Увімкніть прилад (кнопка "Сіть") та обнулите показання мілісекундоміра (кнопка "Скидання").
7. Відхилите маятник на кут $\phi = \phi_{\max}$.
8. Натисніть кнопку "Скидання", деблокувавши тим самим вимірник часу і відпустіть маятник.
9. Виміряйте час 10-ти коливань і знайдіть їхній період $T_1 = t_1/10$ (для фіксування потрібного числа періодів користуйтеся кнопкою "Стоп").
10. Виміряйте число повних коливань N , після яких амплітуда зменшиться в 2 рази. Перевірте, чи виконується нерівність (8.9).
11. Максимально віддаліть один від одного тягарці M ($R_2 \approx R_{\max}$) та повторіть дії згідно з пп.7-8.
12. Виміряйте час 10-ти коливань і обчисліть їхній період $T_2 = t_2/10$.
13. Виміри виконайте декілька разів і результати вимірів занесіть у таблицю 8.1.
14. Нижче таблиці 8.1 запишіть дані для розрахунку помилок.

Таблиця 8.1

№ з/п	ϕ_{\max} (рад)	ℓ (м)	N	R_1 (м)	R_2 (м)	T_1 (с)	T_2 (с)	v (м/с)

Кількість дослідів –

Коефіцієнт Стьюдента –

Маса одного тягарця на маятнику $M = 0,2$ кг

Маса кулі $m = 2,12 \cdot 10^{-3}$ кг

Систематична помилка замірів кута (рад) –

Систематична помилка замірів прицільної відстані (м) –

Систематична помилка замірів періодів коливань T_1 і T_2 (с) –

Систематична помилка замірів відстаней R_1 і R_2 (м) –

Систематична помилка замірів маси кулі (кг) –

Обробка результатів експериментів

Проведіть статистичну обробку результатів експерименту згідно з існуючою

ДВНЗ «ДонНТУ» Автомобільно-дорожній інститут

чими правилами. Систематичну помилку швидкості кулі визначте за формулою:

$$\frac{(\Delta V)_{\text{пр}}}{\vec{V}} = \frac{(\Delta \phi_{\text{max}})_{\text{пр}}}{\vec{\phi}_{\text{max}}} + \frac{(\Delta \ell)_{\text{пр}}}{\vec{\ell}} + 2 \frac{(\Delta R)_{\text{пр}}}{\vec{R}_2 - \vec{R}_1} + \frac{2(\bar{T}_1 + \bar{T}_2)^2 \Delta T_{\text{пр}}}{(\bar{T}_2^2 - \bar{T}_1^2)^2 \bar{T}_1}.$$

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається моментом імпульсу?
2. Сформулюйте закон збереження моменту імпульсу.
3. Виведіть розрахункову формулу для визначення швидкості кулі.
4. При яких припущеннях, що спрощують, розвинута теорія досліджу?
5. На підставі експериментальних даних оцініть постійну моменту пружних сил D .
6. За експериментальними результатами оцініть кінетичну енергію маятника $E_{\text{kmax}} = D\phi/2$. Визначте, яка частина кінетичної енергії кулі під час удару переходить у теплоту.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Загальна фізика: лабораторний практикум: навч. посібник. / В.М. Барановський, П.В. Бережний, І.Т. Горбачук та ін. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика. Молекулярная физика : учебн. пособ.[2-е изд.] / И.В. Савельев. – М.: Наука . Главная редакция физико- математической литературы, 1982. – 432с.
3. Трофимова Т. И. Курс физики: учебник для студентов вузов / Т. И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 432с.
4. Детлаф А. А. Справочник по физике / А. А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
5. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 351с.
6. Физический энциклопедический словарь / [гл. ред. А.М. Прохоров; ред. кол. Д. М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др.]. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
7. Руководство к лабораторным занятиям по физике. / Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. – М.: Наука, 1973. – 687 с.

ДОДАТОК А

Обробка експериментальних даних за допомогою ЕОМ

1. Увімкнути ЕОМ та принтер. Уставити папір.
2. Увійти в каталог МЕХАНІКА.
3. Запустити потрібний файл:
4. Ввести: прізвище, ім'я та по батькові, назву групи, дату виконання розрахунків.
5. Результати комп'ютерної обробки лабораторної роботи показати викладачу, а потім підклеїти їх в зошит.

Таблиця А.1

Назва лабораторної роботи	Назва exe - файла	Назва xls - файла
МЕХАНІКА		
1м	1m.exe	1m.xls
2м		
3м		
4м	4m.exe	4m.xls
5м	5m.exe	
6м	6m.exe	
7м	7m.exe	
8м	8m.exe	

6. Ввести: прізвище, ім'я та по батькові, назву групи, дату виконання розрахунків.
7. Результати комп'ютерної обробки лабораторної роботи показати викладачу, а потім підклеїти їх в зошит.

ДОДАТОК Б

Коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha,n}$

Таблиця Б.1

n	α	
	0,9	0,95
2	6,31	12,7
3	2,92	4,3
4	2,35	3,18
5	2,13	2,78
6	2,02	2,57
7	1,94	2,45
8	1,90	2,37
9	1,86	2,31
10	1,83	2,26
11	1,81	2,23
12	1,80	2,20
13	1,78	2,18
14	1,77	2,16
15	1,76	2,15
16	1,75	2,13
17	1,75	2,12
18	1,74	2,11
19	1,73	2,10
20	1,73	2,09
21	1,73	2,09
22	1,72	2,08
23	1,72	2,07
24	1,71	2,07
25	1,71	2,06
26	1,71	2,06
27	1,71	2,06
28	1,70	2,05
29	1,70	2,05
30	1,70	2,05
31	1,70	2,04