

М.О. Галушак, А.Г. Калугін, С.А. Татарина

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

МЕХАНІКА

Лабораторний практикум

Частина I

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу**

Кафедра загальної та прикладної фізики

М.О. Галушак, А.Г. Калугін, С.А. Татарина

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

МЕХАНІКА

Лабораторний практикум

Частина I

**Івано-Франківськ
2012**

УДК 531/534
ББК 22.2
Г-16

*Рекомендовано методичною радою університету
(протокол № 14 від 20.10.2011 р.)*

Упорядники: М.О. Галушак, А.Г. Калугін, С.А. Татарина.

Г-16 Загальна фізика. Механіка. Лабораторний практикум.
Частина 1. - Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2012. – 88 с.

МВ 02070855-3676-2012

Лабораторний практикум містить методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з розділу курсу загальної фізики – «Механіка». До кожної роботи подаються короткі теоретичні відомості, методика і послідовність виконання роботи. Значна увага приділяється з'ясуванню природи та практичному застосуванню фізичних явищ. Лабораторний практикум відповідає чинній навчальній програмі й призначений для студентів технічних спеціальностей та викладачів фізики вищих навчальних закладів.

УДК 531/534
ББК 22.2

МВ 02070855-3676-2012

©ІФНТУНГ, 2012

ЗМІСТ

	Ст.
Вступ	5
Методичні вказівки до лабораторних занять з фізики...	7
Правила обробки результатів вимірювання.....	9
Вимірювальні прилади.....	14
Лабораторна робота № 1	22
<i>Визначення швидкості руху тіла по похилій площині</i>	
Лабораторна робота № 2	25
<i>Експериментальна перевірка другого закону Ньютона</i>	
Лабораторна робота № 3	29
<i>Визначення моменту інерції тіла</i>	
Лабораторна робота № 4	32
<i>Визначення швидкості польоту кулі за допомогою балістичного маятника</i>	
Лабораторна робота № 5.....	36
<i>Визначення моменту інерції махового колеса</i>	
Лабораторна робота № 6.....	39
<i>Перевірка основного рівняння динаміки обертового руху твердого тіла</i>	
Лабораторна робота № 7.....	43
<i>Визначення головних осей інерції</i>	
Лабораторна робота № 8.....	48
<i>Визначення швидкості кулі за допомогою крутильного балістичного маятника</i>	
Лабораторна робота № 9.....	54
<i>Визначення коефіцієнта тертя кочення</i>	
Лабораторна робота № 10.....	59
<i>Вивчення прецесії гіроскопа</i>	

Лабораторна робота № 11	64
<i>Визначення моменту інерції тіла неправильної геометричної форми</i>	
Лабораторна робота № 12	68
<i>Визначення прискорення земного тяжіння і коефіцієнта жорсткості пружини за допомогою пружинного маятника</i>	
Лабораторна робота № 13	72
<i>Визначення швидкості звуку в повітрі</i>	
Лабораторна робота № 14	76
<i>Визначення прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника</i>	
Лабораторна робота № 15	82
<i>Визначення логарифмічного декременту затухання, коефіцієнта затухання і добротності коливної системи</i>	
 Перелік літературних джерел	 86
 Додаток	 87

ВСТУП

Фізика є базовою дисципліною для багатьох загальноінженерних і спеціальних дисциплін. Процес пізнання у фізиці, як і в будь-якій науці, починається зі спостереження явищ в природних умовах або із спеціально поставлених дослідів-експериментів. Для вивчення явища експериментатор повинен володіти достатніми навиками проведення вимірювань, які набуваються в процесі навчання.

Основними завданнями фізичного лабораторного практикуму є виховання у студентів навиків дослідницької роботи, якісного і кількісного вивчення фізичних явищ. До складу посібника увійшло 15 лабораторних робіт з методичними вказівками щодо їх виконання та оформлення звітів. Методичні вказівки призначені для допомоги студентам при виконанні лабораторних робіт з розділу «Механіка» і складені з навчальним планом і програмою з фізики. Виконання робіт покликане сприяти більш глибокому розумінню найважливіших законів класичної механіки, на основі яких вирішуються фізичні задачі і проблеми в обраній студентами спеціальності. Кожна лабораторна робота містить короткі теоретичні відомості, порядок виконання роботи, практичні завдання та запитання для самоконтролю, посилення на літературні джерела. Особлива увага звертається на найбільш повне розкриття фізичної суті досліджуваних явищ та змісту тих параметрів, якими ці явища описуються.

Важливе питання – це точність вимірювання експериментальних результатів. Тому в посібнику описано методику проведення прямих і непрямих вимірювань різних фізичних величин та правила обробки результатів вимірювання із обчисленням похибок і записом остаточного результату.

При підготовці даного посібника були використані методичні вказівки до п'ятнадцяти лабораторних робіт, підготовлених у 1997 році викладачами кафедри фізики Б.Ю. Самелюком, В.В. Омелянцем, В.І. Пустоговим, А.Г. Калугіним, З.В. Петрук.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ФІЗИКИ

1. Підготовка до лабораторного заняття

1.1. Студент допускається до виконання лабораторних робіт тільки після інструктажу та перевірки знань основних правил з техніки безпеки в лабораторії механіки.

1.2 Перелік і послідовність виконання робіт вказується викладачем на першому занятті.

1.3 Готовність студента до роботи включає:

- знання теоретичного матеріалу по темі лабораторної роботи;
- знання загальної будови лабораторної установки та призначення її елементів;
- знання порядку виконання роботи і методики обробки експериментальних даних;
- наявність правильно підготовленого протоколу лабораторної роботи;
- наявність правильно підготовленого звіту з попередньої лабораторної роботи.

1.4 Контроль підготовленості студента з теоретичного матеріалу здійснюється за допомогою контрольних запитань до лабораторної роботи.

1.5 Підготовленому до заняття студенту викладач видає індивідуальне завдання. Ознайомившись з лабораторною установкою, студент повідомляє викладачеві послідовність виконання завдання, після чого слід приступити до виконання лабораторної роботи.

1.6 Під час виконання роботи слід паралельно вести обробку дослідних даних. Обчислення можна проводити як на ПК, так і за допомогою калькуляторів.

1.7 Дослідні дані, занесені в таблиці, повинні бути засвідчені підписом викладача, який проводить заняття.

1.8 Звіт про виконану роботу студент представляє викладачу не пізніше наступного заняття; в іншому випадку викладач вирішує питання щодо допуску студента до виконання наступної роботи.

1.9 Результати обробки дослідних даних повинні бути представлені викладачеві на занятті.

1.10 Після закінчення роботи слід виключити лабораторну установку, прибрати робоче місце, здати лаборанту або викладачеві прилади і інструмент.

1.11 Не підготовлений студент (див. п. 1.3) до заняття не допускається і повинен виконати роботу в спеціально призначений час.

2. Основні правила безпеки роботи в лабораторії

2.1 Всі роботи в лабораторії виконуються тільки під керівництвом викладача або лаборанта.

2.2 Користуватися тільки справними приладами і інструментом.

2.3 Не загромождувати робоче місце сторонніми предметами, які не відносяться до даної роботи.

2.4 Не ходити без потреби по лабораторії, не торкатись вузлів, приладів і інших предметів, які не відносяться до даної лабораторної роботи.

2.5 Не включати і не виключати без дозволу викладача рубильники, прилади, стенди, лабораторні установки.

2.6 Про всі помічені неполадки негайно повідомити викладача.

2.7 Забороняється під час заняття:

- займатися без дозволу викладача усуненням неполадок в установці;
- відволікати товаришів сторонніми розмовами;
- виносити з лабораторії прилади, інструменти, деталі і т.д., а також вносити в лабораторію сторонні предмети.

У випадку порушення правил безпеки роботи в лабораторії, викладач зобов'язаний відсторонити студента від виконання лабораторної роботи.

ПРАВИЛА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ

Обробляючи результати вимірювань, рекомендуємо дотримуватись такої послідовності дій.

А. Прямі вимірювання

1. Після виконання n вимірювань фізичної величини x дістають такі її значення: $x_1, x_2, x_3, \dots x_n$. Кількість вимірювань n залежить від природи вимірюваної величини, точності застосовуваних для вимірювання інструментів і в кожному випадку визначається окремо.

2. Знаходять середнє арифметичне значення вимірюваної величини за формулою

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}. \quad (1)$$

3. Визначають випадкові абсолютні похибки вимірювання:

$$\Delta x_1 = |x_1 - \bar{x}|, \Delta x_2 = |x_2 - \bar{x}| \dots \quad (2)$$

4. Оцінюють середню квадратичну похибку $S_{\bar{x}}$ середнього арифметичного за формулою

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

5. Беруть значення довірчої ймовірності p .

6. За числом вимірювань і довірчою ймовірністю p в таблиці знаходять коефіцієнт Стьюдента $t_p(n)$.

7. Визначають півширину довірчого інтервалу випадкової похибки (тобто абсолютну випадкову похибку)

$$\Delta x_{\text{вип}} = t_p(n) S_{\bar{x}}. \quad (4)$$

8. Визначають межу основної похибки δ , яку допускає засіб вимірювання, згідно з його паспортом.

9. Із табл. 1 знаходимо коефіцієнт Стьюдента $t_p(\infty)$ для нескінченного числа вимірювань за даною довірчою ймовірністю p .

10. Визначають інструментальну похибку за формулою

$$\Delta x_{\text{ін}} = \frac{t_p(\infty) \delta}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

11. Визначають межу похибки v відліку за шкалою приладу як половину ціни поділки.

Таблиця 1

n	p							
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,999
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	13,8	639,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	4,8
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	4,1

12. Визначають похибку відліку

$$\Delta x_{\text{відл}} = p v . \quad (6)$$

13. Знаходять повну похибку вимірювання

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{вип}}^2 + \Delta x_{\text{ін}}^2 + \Delta x_{\text{відл}}^2} . \quad (7)$$

14. Визначають відносну похибку

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}} . \quad (8)$$

15. Записують кінцевий результат у вигляді

$$x = (\bar{x} \pm \Delta x) . \quad (9)$$

Приклад 1. Під час вимірювання довжини l бруска міліметровою лінійкою дістали чотири значення довжини: $l_1 = 120$, $l_2 = 119$, $l_3 = 121$, $l_4 = 120$ мм, довірча ймовірність $p = 0,96$.

Знаходимо середнє арифметичне значення вимірюваної довжини

$$\bar{l} = \frac{(120 + 119 + 121 + 120) \cdot 10^3}{4} = 0,120 .$$

Середня квадратична похибка дорівнює

$$S_l = 10^{-3} \cdot \frac{(120 - 120)^2 + (119 - 120)^2 + (121 - 120)^2 + (120 - 120)^2}{4 \cdot 3} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м} .$$

Із табл. 1 знаходимо $t_{0,95}(4) = 3,2$. Випадкова похибка $\Delta l_{\text{вип}} = 3,2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 13 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Інструментальна похибка

$$\Delta l_{\text{ін}} = \frac{2 \cdot 0,2}{3} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м } (t_{0,95}(\infty) = 2,0, \delta = 0,2). \quad \text{Похибка}$$

$$\text{відліку } \Delta l_{\text{відл}} = 0,95 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Повна похибка вимірювання дорівнює

$$\Delta l = \sqrt{(13^2 + 2,3^2 + 4,8^2)} \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Записуємо кінцевий результат вимірювання довжини $l = (120 \pm 2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ з довірчою ймовірністю $p = 0,95$.

Б. Непрямі вимірювання

1. Якщо величина y , яку визначають, є функцією кількох змінних $x_1, x_2, \dots, x_n$, тобто

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (10)$$

то для кожної з них потрібно визначити середнє арифметичне значення і повну абсолютну похибку.

2. Визначають середнє значення невідомої величини

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

3. Знаходять відносну похибку за формулою

$$\varepsilon_y = \sqrt{\left[\left. \frac{\partial(\ln y)}{\partial x_1} \right|_{x=\bar{x}_1} \cdot \Delta x_1 \right]^2 + \left[\left. \frac{\partial(\ln y)}{\partial x_2} \right|_{x=\bar{x}_2} \cdot \Delta x_2 \right]^2 + \dots + \left[\left. \frac{\partial(\ln y)}{\partial x_n} \right|_{x=\bar{x}_n} \cdot \Delta x_n \right]^2}.$$

4. Визначають абсолютну похибку

$$\Delta y = \varepsilon_y \cdot \bar{y}.$$

5. Записують кінцевий результат у вигляді

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

з довірчою ймовірністю p .

Приклад 2. Визначити об'єм циліндра.

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

де d – діаметр; h – висота циліндра.

$$d = (20,00 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad h = (10,00 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Середній об'єм циліндра:

$$V = \frac{3,14 \cdot 100 \cdot 10}{4} \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Обчислюємо відносну похибку

$$\varepsilon_V = \sqrt{2 \frac{0,05^2}{20} + \frac{0,05^2}{10} + \frac{0,005^2}{3,14}} = 0,006.$$

Визначаємо абсолютну похибку

$$\Delta V = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Записуємо кінцевий результат у вигляді

$$V = (3,14 \pm 0,02) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

1. Вимірювання лінійних величин

Для вимірювань, які не вимагають високої точності, застосовують масштабні лінійки, складні метри, рулетки.

Масштабна лінійка

Масштабні лінійки бувають одношкальні та двошкальні, жорсткі чи пружні з межами вимірювань 150 – 1000 мм. Шкала лінійок має ціну поділки 0,5 чи 1 мм, що дає похибку при вимірюваннях $\sim 0,25$ мм та $\sim 0,5$ мм відповідно.

Для лінійних вимірювань з більш високою точністю застосовують штангенциркулі, мікрометри, катетометри та ін.

Штангенциркуль

Штангенциркуль складається зі сталевий масштабної лінійки 1, яка поділена на сантиметри і міліметри (рис.1). На початку лінійки закріплені нерухомі губки 2. По лінійці переміщується рамка 4, яка складає одне ціле з губками 3. Ці губки паралельні до губок 2 та можуть підходити до них впритул. Рамку можна закріпити у потрібному положенні гвинтом 6.

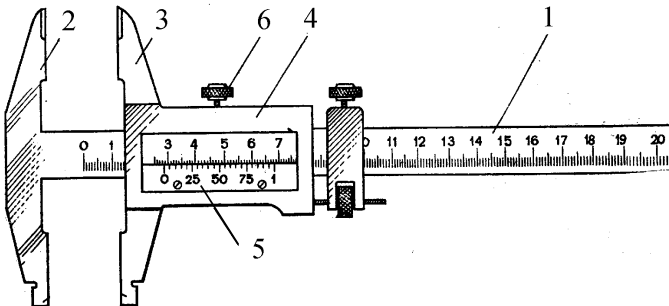


Рисунок 1.

У рамці є вікно 5, нижній край якого розташований напроти поділок масштабної лінійки. На цьому краю нанесені поділки дещо іншого масштабу, ніж поділки основної шкали. Ця додаткова лінійка має назву лінійний ноніус. Шкала найпростішого ноніуса будується так, щоб m поділок ноніуса відповідали $m - 1$ поділці основної шкали. Нехай ціна поділки основної шкали x_0 , а шкали ноніуса – x . Тоді довжина відрізка до збігу поділок

$$m \cdot x = (m - 1) \cdot x_0 ,$$

звідки

$$x = x_0 - \frac{x_0}{m} .$$

Різниця між ціною поділки основної шкали і ціною поділки ноніуса називається точністю ноніуса:

$$\Delta x = x_0 - x = \frac{x_0}{m} .$$

Як бачимо, точність ноніуса дорівнює ціні поділки шкали масштабної лінійки, поділеної на число поділок ноніуса.

Виберемо $m = 10$, а $x_0 = 1\text{ мм}$. Якщо сумістити нульову поділку шкали такого ноніуса з нульовою поділкою основної шкали, 10-та поділка ноніуса виявиться суміщеною з 9-тою поділкою масштабної лінійки (рис.2а). При цьому 1-ша поділка ноніуса не дійде до 1-ї поділки лінійки на 0,1 мм, 2-га поділка ноніуса не дійде до 2-ї поділки шкали лінійки на 0,2 мм і т.д. (рис.2а).

Шкали штангенциркуля наносяться таким чином, що при зсунутих губках нуль шкали ноніуса і нуль основної шкали співпадають. При вимірюванні довжини штангенциркулем предмет поміщають між губками, губки зсувають до стикання з предметом і закріплюють їх у такому

положенні гвинтом 6; потім проводять відлік з допомогою ноніуса.

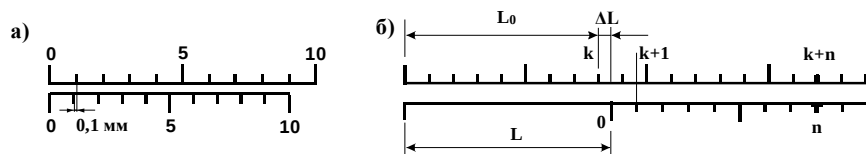


Рисунок 2.

Довжина предмета L дорівнює віддалі від нуля основної шкали до нуля зміщеного ноніуса і складається з цілого числа k поділок основної шкали $L_0 = k \cdot x_0$ та деякої частини наступної поділки основної шкали – відрізка ΔL (рис.2б):

$$L = L_0 + \Delta L.$$

Знаходимо поділку ноніуса (наприклад n), що співпадає з поділкою основної шкали $(k + n)$, тоді:

$$\Delta L = n \cdot x_0 - n \cdot x = n \cdot \Delta x.$$

Отже,

$$L = k \cdot x_0 + n \cdot \Delta x.$$

Звідси випливає правило відліку довжини з допомогою ноніуса:

вимірювана довжина L дорівнює сумі числа малих поділок основної шкали (kx_0) і точності ноніуса Δx , помноженої на номер n його поділки, яка співпадає з поділкою основної шкали.

Якщо при вимірюванні не виявиться жодної поділки ноніуса, яка співпадала би точно з поділкою основної шкали, то відлік береться по тій поділці, яка розміщена найближче до одної з поділок основної шкали масштабної лінійки. Величина

незбігання не перевищує половини точності ноніуса Δx . Отже, похибка відліку по ноніусу дорівнює половині його точності.

Мікрометр

На кінцях масивної сталюї скоби 1 (рис.3) знаходяться один напроти одного нерухома опорна п'ята 2 і наконечник мікрометричного гвинта 4. Гвинт обертається у втулці 3, вздовж якої ззовні нанесена шкала з поділками через 0,5мм. На гвинт насаджено барабан 5, край якого при обертанні гвинта переміщається відносно шкали, нанесеної на втулці.

По краю барабана нанесена шкала, яка ділить обвід барабана на 50 рівних поділок; крок гвинта 0,5мм, отже ціна 1 поділки барабана 0,01мм, тобто поворот барабана на 1 поділку відповідає зміщенню гвинта на 0,01мм.

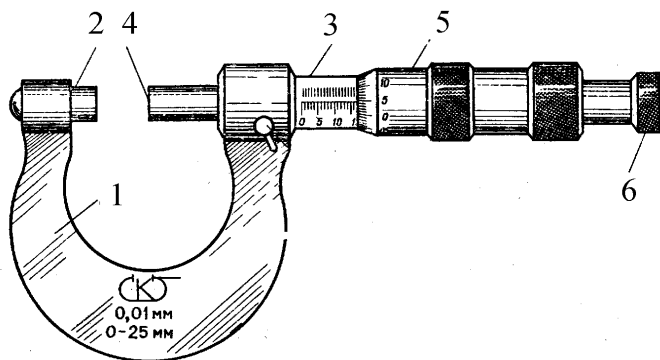


Рисунок 3.

На кінці гвинта є пристрій 6 для обертання барабана, який називається тріскачкою. Обертання передається від тріскачки до гвинта завдяки тертю, внаслідок чого при досягненні певної сили натиску наконечника гвинта на опорну п'яту чи на вимірюваний предмет подальше обертання гвинта припиняється.

Якщо наконечник гвинта і опорну п'яту звести разом, край барабану буде проти нульової поділки шкали, нанесеної на втулці, а нульова поділка шкали барабана співпадає з поздовжньою лінією, нанесеною на втулці.

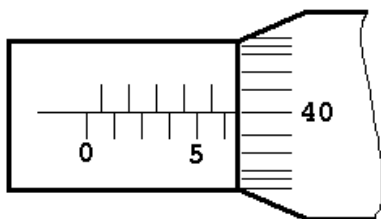


Рисунок 4.

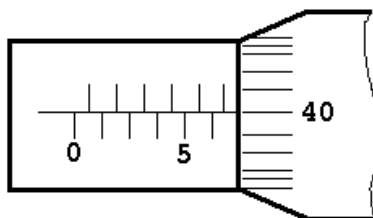


Рисунок 5.

При роботі з мікрометром вимірюваний предмет затискається за допомогою тріскачки між опорною п'ятою та наконечником гвинта, після чого по шкалі втулки відраховується ціле чи напівціле число міліметрів і до цього відліку додається число сотих часток міліметра, яке відраховується по шкалі барабана.

Наприклад:

- на рис.4. відлік становить 6,40 мм, оскільки на шкалі втулки вкладається ціле число 6 мм, а на шкалі барабана – 40 сотих мм;
- на рис.5. відлік становить не лише 6 цілих мм, але ще й одну поділку за верхньою шкалою півцілих мм, тому показ шкали втулки – 6,5 мм. Якщо додати 40 сотих мм, які відраховує шкала барабана, то повний відлік буде 6,90 мм.

Перед вимірюваннями мікрометром потрібно переконатися у тому, що при доведенні тріскачкою наконечника гвинта до опорної п'яти отримується на обох шкалах нульовий відлік.

2. Вимірювання часу

При вимірюванні невеликих проміжків часу користуються секундомірами: механічними, електричними та електронними.

Електричний секундомір має на циферблаті дві колові шкали. Зовнішня, більша, визначає десяті та соті частки секунди, а внутрішня, менша – цілі секунди. Ввімкнення і вимкнення приладу проводиться вимикачем, розміщеним на столі поряд із секундоміром. Повернення стрілок у нульове положення проводиться натисканням металевого стрижня на правій бічній поверхні корпусу секундоміра.

Електронний секундомір відображає вимірювані проміжки часу на електронному табло до сотих часток секунди. На передній панелі секундоміра знаходяться вертикально розміщені три клавіші. Верхня призначена для під'єднання секундоміра до електромережі, середня – для вимірювання часу, а нижня – для занулення показів приладу. Точність для секундомірів з ручним вмиканням приймається рівною 0,2 секунди. Це зумовлено тим, що людина не може роздільно сприймати проміжки часу, менші за 0,1 секунди. Тому при вимірюваннях експериментатор буде допускати помилки незалежно від точності секундоміра: у момент ввімкнення $\pm 0,1$ с, у момент вимкнення також $\pm 0,1$ с. Отже, максимальна похибка становитиме $\pm 0,2$ с.

3. Вимірювання температури

Для вимірювання температури використовують такі фізичні властивості речовин, які однозначно змінюються при зміні температури і легко можуть бути виміряні. Це: лінійне і об'ємне розширення, зміна тиску, виникнення термоелектрорушійної сили, зміна електричного опору, деякі магнітні та оптичні властивості.

Відлік температур здійснюють за температурними шкалами: термометричній (наприклад, шкала Цельсія) і термодинамічній (шкала Кельвіна).

Для побудови термометричної шкали вибирають дві постійні температури (реперні точки). Наприклад, за 0 приймають температуру плавлення льоду і за 100 - температуру кипіння води при нормальному тиску. Якщо у цьому температурному інтервалі вимірювати величину об'ємного розширення ртуті, яка знаходиться у балоні, що з'єднаний з капіляром, то, поділивши видовження ртутного стовпа у капілярі на 100 рівних частин, отримаємо шкалу Цельсія (°C).

Побудова термодинамічної температурної шкали ґрунтується на другому законі термодинаміки. Одиницею вимірювання у ній є кельвін (K). Градус за шкалою Кельвіна встановлюють так, щоби мала місце узгодженість зі шкалою Цельсія і для практичних вимірювань використовується співвідношення:

$$T(K) = t(^{\circ}C) + 273,15(^{\circ}C).$$

Вимірювання температури до 600 °C називається термометрією, а вище 600 °C - пірометрією.

Прилади для вимірювання температури діляться на такі групи:

Термометри розширення (до 750 °C) побудовані на властивостях тіл при зміні температури змінювати свій об'єм, а значить і лінійні розміри.

Манометричні (газові) термометри (до 500° C) заповнені розрідженим газом (воднем, гелієм чи азотом). За зміною тиску термометричного газу у термометрі при постійному об'ємі можна виміряти його температуру.

Електричні термометри опору (до 500 °C) визначають температуру за зміною опору давача: мідного або платинового опору.

Термоелектричні (термопарні) термометри (до 1600 °C) використовують властивості контактів різних металів та

сплавів. Термопарою називається замкнене електричне коло, яке має два спаї різних металевих провідників (наприклад, мідь-константан, хромель-копель і т.д.) (рис.6).

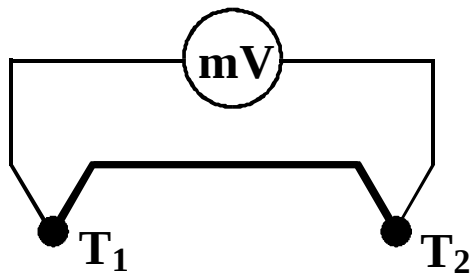


Рисунок 6.

Якщо температура спаїв різна ($T_1 > T_2$), то у колі протікає електричний струм зумовлений термоелектрорушійною силою. Виміряна мілівольтметром величина електрорушійної сили E пропорційна різниці температур:

$$E = c \cdot (T_1 - T_2) = c \cdot (t_1^{\circ}\text{C} - t_2^{\circ}\text{C}),$$

де c - постійна величина, різна для різних термопар.

Один спай термопари щільно притискають до тіла з невідомою температурою, а температуру другого спаю підтримують постійною (наприклад $t_2^{\circ}\text{C} = 20^{\circ}\text{C}$). Визначення температури тіла $t_1^{\circ}\text{C}$ за величиною виміряної E здійснюють з використанням градувальних таблиць.

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ТІЛА ПО ПОХИЛІЙ ПЛОЩИНІ

Мета роботи: перевірка законів поступального і обертового рухів.

Обладнання: похила площина, лінійка, штангенциркуль, набір тіл кочення (куль і циліндрів).

Теоретичні відомості

Якщо тіло скочується з похилої площини і відривається від неї в точці В, то далі воно буде рухатись по параболі, доки не впаде в точці С (рис.1.1).

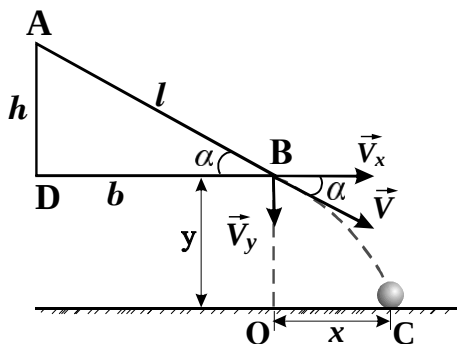


Рисунок 1.1

Рух по параболі можна розглядати як такий, що складається з двох рухів: по вертикалі і горизонталі. Згідно з принципом незалежності рухів рух по вертикалі не залежить від руху по горизонталі. Рух по горизонталі буде рівномірним з швидкістю

$v_x = v_0 \cdot \cos \alpha$, а рух по вертикалі – рівноприскореним з початковою швидкістю $v_y = v_0 \sin \alpha$ і прискоренням земного тяжіння g .

Позначимо шлях ОС, пройдений в горизонтальному русі буквою x , а шлях ВО в вертикальному русі буквою y і запишемо їх рівняннями:

$$\begin{aligned}x &= v_0 t \cos \alpha, \\y &= v_0 t \sin \alpha + \frac{gt^2}{2}.\end{aligned}\quad (1.1)$$

Розв'язавши систему рівнянь, визначимо швидкість руху тіла в момент відриву від похилої площини:

$$v = \frac{x}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{g}{2(y - x \cdot \operatorname{tg} \alpha)}}. \quad (1.2)$$

З рис.1 видно, що $\cos \alpha = \frac{a}{b}$, а $\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{b}$. З врахуванням останніх співвідношень одержимо формулу для швидкості

$$v = \frac{l \cdot x}{b} \sqrt{\frac{g \cdot l}{2(y \cdot l - x \cdot h)}}. \quad (1.3)$$

Швидкість тіла, що котиться по похилій площині можна визначити і теоретично. В точці А (див. рис.1.1) тіло має потенціальну енергію, яка відносно рівня DB рівна: $E_p = mgh$. В точці В ця потенціальна енергія перетвориться в кінетичну енергію поступального і обертового руху тіла, запишемо закон збереження механічної енергії:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}, \quad (1.4)$$

де v - швидкість поступального руху, ω - кутова швидкість обертового руху, I - момент інерції тіла. Знаючи, що $\omega = v/R$ (де R – радіус тіла), визначимо v з рівняння (1.4) за формулою

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \frac{I}{mR^2}}}. \quad (1.5)$$

Момент інерції тіла обертання можна записати у вигляді

$$I = k m R^2, \quad (1.6)$$

де R - радіус тіла. Для кулі $k = 2/5$, для суцільного циліндра $k = 1/2$, для кільця, в якого товщина набагато менша за радіус, $k = 1$. З врахуванням (1.6) формула (1.5) набирає вигляду

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+k}}. \quad (1.7)$$

Слід зауважити, що у випадку товстостінного кільця з зовнішнім радіусом R і внутрішнім r , момент інерції $I = \frac{m(R^2 + r^2)}{2}$. У цьому випадку формула (1.5) набирає вигляду

$$v = 2h \sqrt{\frac{gh}{3R^2 + r^2}}. \quad (1.7')$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти для похилої площини h, b, l , а також u , тобто висоту краю площини над поверхнею столу.
2. Помістити тіло на похилу площину на висоту h від основи і відпустити. Знайти точку C , в яку впаде тіло, і виміряти x .
3. Дослід повторити декілька разів, кожного разу пускаючи тіло з однієї і тієї же точки.
4. Визначити за формулою (1.3) і (1.7) або (1.7') значення швидкості, обчислити похибки та порівняти одержані значення швидкостей.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип незалежності рухів ?
2. Що називається швидкістю і прискоренням точки?
3. Записати рівняння рівнозмінного руху.
4. Чому дорівнює кінетична енергія тіла, що котиться?
5. Вивести формулу для експериментального і теоретичного значень швидкостей.

Лабораторна робота № 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ДРУГОГО ЗАКОНУ НЬЮТОНА

Мета роботи: експериментально перевірити другий закон Ньютона.

Обладнання: установка РМ-02.

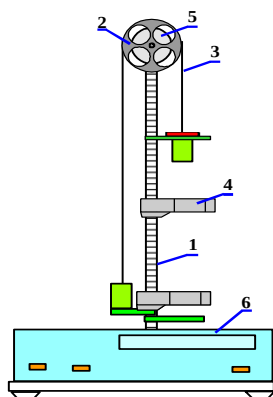


Рисунок 2.1

Установка РМ-02 (див. рис. 2.1) складається з вертикального стержня 1, нерухомого блоку 2, нитки 3, перекинutoї через блок, до кінців якої підвішені вантажі, фотоелектронних датчиків, електромагніту для фіксації блоку 5, електронного блоку відліку часу 6.

Теоретичні відомості

Другий закон Ньютона, як відомо, встановлює співвідношення

між силою, масою і прискоренням. Прискорення, з яким рухається тіло, прямопропорційне силі і оберненопропорційне масі тіла:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.1)$$

Прискорення - фізична величина яка характеризує зміну швидкості з часом. *Сила* - міра взаємодії тіл, в результаті якої змінюється швидкість тіла, тобто виникає прискорення або тіла деформуються. *Маса тіла* - міра інертності тіла при поступальному русі.

Якщо маса тіла m стала, то рівняння (2.1) можна написати у вигляді

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

де $k = 1/m$.

Графічно залежність між a і F виразиться прямою, яка приходить через початок координат (a і F) і нахилена до осей під кутом, величина якого залежить від k , тобто від маси тіла.

Таким чином, для дослідної перевірки закону Ньютонa потрібно для декількох значень діючої на тіло сили, при заданій масі, визначити a і F , побудувати графік в координатах F , a .

Дослідити залежність a від F при сталій масі тіла можна з допомогою установки РМ-02 (машина Атвуда).

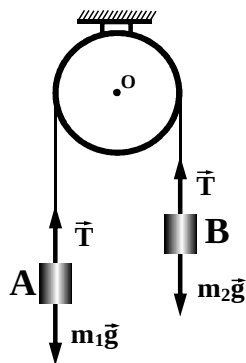


Рисунок 2.2

Нехай до кінців нитки, перекинutoї через блок, підвішені вантажі А і В (рис. 2.2) причому $m_2 > m_1$. Рівнодійна сил, що діють на систему не дорівнює нулю і змушує систему рухатись прискорено. Рівняння руху системи у векторній формі, у випадку нехтування тертям і масою блока, запишуться так:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{g} + \vec{T} &= m_1 \vec{a}, \\ m_2 \vec{g} + \vec{T} &= m_2 \vec{a}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) в проекціях, з врахуванням напрямку руху, матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} T - m_1 g &= m_1 a, \\ T - m_2 g &= -m_2 a. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Розв'язавши систему (2.4) відносно a , одержимо

$$a = \frac{(m_2 - m_1)g}{m_2 + m_1}. \quad (2.5)$$

З (2.5) видно, що при сталій масі, прискорення, з яким рухається система, залежить від різниці мас $m_2 - m_1$ підвішених до кінців нитки. Змінюючи цю різницю (результуючу силу), залишаючи при цьому масу системи сталою, відповідно будемо змінювати прискорення.

Прискорення можна визначити з рівняння $h = \frac{at^2}{2}$, так як рух системи рівноприскорений і початкова швидкість $v_0 = 0$, тоді

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (2.6)$$

де h – віддаль на яку переміщується вантаж А або В протягом часу t .

Таким чином, змінюючи різницю мас $m_2 - m_1$, залишаючи при цьому сталу масу системи і визначаючи для кожного випадку прискорення a , можна дослідити залежність a від F .

Порядок виконання роботи

1. За допомогою кнопки "сеть" ввімкнути прилад і перевірити, чи цифрове табло висвічує нулі, чи світяться лампочки фотодатчика.

2. За допомогою регулювальних гвинтів встановити прилад в горизонтальне положення так, щоб б при русі вантажів, вони легко проходили через кронштейни фотодатчиків.

3. На правий і лівий підвішені вантажі покласти по чотири додаткових вантажі з набору так, щоб різниця між масою правого і лівого вантажу дорівнювала 2-3 г.

4. Правий вантаж максимально підняти вгору.

5. Після заспокоювання вантажів, натиснути кнопку "пуск". Записати час руху системи t .

6. По поділках на стержні визначити висоту h (шлях пройдений тілом).

7. За формулою (2.6) визначити прискорення a .

8. Збільшуючи різницю мас між правим і лівим вантажами на 2, 4, 6 г, не змінюючи при цьому загальну масу системи, для кожного випадку викопати пункти 4, 5, 6, 7.

9. Побудувати графік залежності a від F .

10. Похибки обчислити згідно методичних вказівок.

Контрольні запитання

1. Сформулювати закони Ньютона.

2. Що називається прискоренням?

3. Дати означення сили і маси.

4. Вивести робочу формулу.

Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ТІЛА

Мета роботи: визначення моменту інерції кільця за допомогою маятника Максвелла.

Обладнання: установка РМ-03.

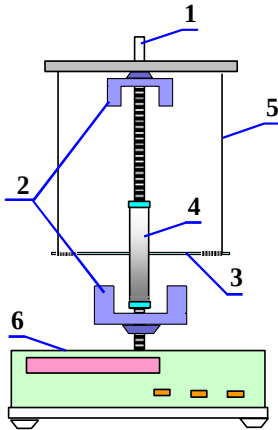


Рисунок 3.1

Установка РМ-03 складається з вертикального стержня 1, фотодатчиків 2, вісі маятника 3, ролика 4, шнурів 5, електронного блоку відліку часу 6.

Теоретичні відомості

Моментом інерції системи (тіла) відносно вісі обертання називається фізична величина, що дорівнює сумі добутків мас матеріальних точок на квадрати їх віддалей від вісі. З означення випливає, що момент інерції є адитивна величина, тобто момент інерції тіла відносно вісі дорівнює сумі моментів інерції матеріальних точок відносно, цієї вісі:
$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$
, де m_i - маса матеріальної точки, r_i -

радіус обертання матеріальної точки. Момент інерції є мірою інертності тіла при обертovому русі. Покажемо, як експериментально можна визначити момент інерції тіла за допомогою маятника Максвелла.

Маятник, що знаходиться на висоті h , має потенціальну енергію $E_{\text{п}}$. При падінні потенціальна енергія маятника перетворюється в кінетичну енергію поступального руху $E_{\text{к}}$ і

кінетичну енергію обертового руху $E_{об}$. Нехтуючи опором, можна записати: $E_{п} = E_{к} + E_{об}$, або

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I_0\omega^2}{2}, \quad (3.1)$$

де h - висота падіння маятника, v - швидкість маятника в кінці падіння, I_0 - момент інерції маятника, m - маса маятника. Рух маятника рівноприскорений, а значить у нижній точці

$$v = at, \quad (3.2)$$

$$\omega = \varepsilon, \quad (3.3)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon^2}{2}, \quad (3.4)$$

де φ - кут, на який повертається маятник при опусканні. Коли маятник знаходиться у верхній точці, то вся довжина (висота) h нитки маятника накручена на вісь маятника, тоді, очевидно

$$2\pi Rn = h, \text{ де } n = \frac{\varphi}{2\pi} - \text{кількість витків нитки, що рівна}$$

кількості обертів, які здійснює маятник; R - радіус вісі маятника. Враховуючи сказане, можна визначити, що маятник при падінні повертається на кут

$$\varphi = \frac{h}{R}. \quad (3.5)$$

Розв'язуючи сумісно (3.3), (3.4) і (3.5), одержимо:

$$\omega = \frac{2h}{Rt}. \quad (3.6)$$

Сумісне розв'язування рівнянь (3.2), (3.3), (3.6) і $a = \varepsilon R$ дає:

$$v = \frac{2h}{t}. \quad (3.7)$$

Підставляючи (3.6), (3.7) в рівняння (3.1) одержимо формулу для визначення моменту інерції маятника Максвелла:

$$I_0 = \frac{1}{4} d^2 m \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right), \quad (3.8)$$

де $d = 2R$ - діаметр вісі маятника, h - висота падіння маятника, t - час падіння маятника, g - прискорення вільного падіння, m - маса маятника.

Таким чином, з рівняння (3.8) видно, що при експериментальному визначенні I_0 необхідно виміряти висоту падіння маятника h , масу маятника m , діаметр вісі маятника d і час падіння маятника t .

Виходячи із адитивності моменту інерції, можна визначити момент інерції кільця, накладеного на маятник Максвелла. Тоді, очевидно, $I_k = I - I_0$, де I_k - момент інерції накладеного кільця, I - момент інерції маятника з накладеним кільцем, I_0 - момент інерції маятника без кільця. Момент інерції маятника з накладним кільцем визначають з рівняння

$$I = \frac{1}{4} d^2 M \left(\frac{gt_1^2}{2h} - 1 \right), \quad (3.9)$$

де $d = 2R$ - діаметр вісі маятника, h - висота падіння маятника, t - час падіння маятника, g - прискорення вільного падіння, $M = m + m_0$ - маса маятника з накладеним кільцем. Вивід рівняння (3.9) аналогічний виводу рівняння (3.8). Підставивши в рівність $I_k = I - I_0$ значення I і I_0 , одержимо формулу для визначення моменту інерції накладеного кільця:

$$I_k = \frac{d^2}{8h} [(m + m_k)gt_1^2 - mgt^2 - 2m_k h]. \quad (3.10)$$

Порядок виконання роботи

1. При допомозі кнопки "сеть" ввімкнути прилад і перевірити чи висвічує цифрове табло цифри "нуль", а також чи горять лампочки фотодатчиків (у випадку відсутності світіння звернутись до лаборанта).

2. Нижній кронштейн встановити в крайнє нижнє положення.
3. Накрутити на вісь маятника нитку і зафіксувати його в зазорі верхнього фотодатчика (якщо маятник не фіксується, натиснути на кнопку "сброс").
4. Натиснути на кнопку "пуск" і після зупинки маятника записати час падіння t . Дослід повторити 5 разів.
5. По шкалі, нанесеній на стержні, виміряти висоту падіння маятника h .
6. Вставити на ролик маятника накладне кільце і виконати пункт 1 і 4.
7. Штангенциркулем визначити діаметр вісі маятника d .
8. Визначити масу маятника m і масу накладного кільця m_k .
9. Похибки обчислити згідно методичних вказівок.

Контрольні запитання

1. Що називається моментом інерції матеріальної точки і моментом інерції твердого тіла відносно заданої осі обертання?
2. Чому дорівнює кінетична енергія тіла, яке здійснює одночасно поступальний і обертовий рухи?
3. В чому полягає теорема Штейнера?
4. Виведіть робочу формулу.

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОЛЬОТУ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА

- Мета роботи:** визначити швидкість польоту кулі, використовуючи закони збереження.
- Обладнання:** установка для визначення швидкості польоту кулі.

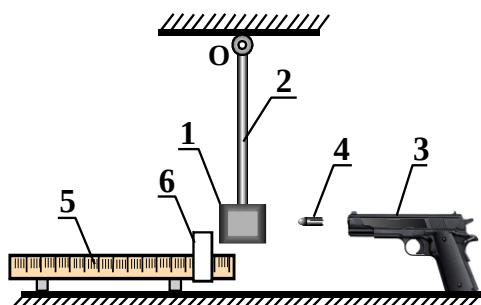


Рисунок 4.1

Дана установка (див. рис. 4.1) складається з масивного тіла 1, підвішеного на шарнірно закріпленому стержні 2, пружинного пістолета 3, з якого при пострілі вилітає куля 4. Біля тіла 1 знаходиться лінійка 5 з повзунком 6.

Теоретичні відомості

Після пострілу куля потрапляє в балістичний маятник і застрягає в ньому. Відбувається непружний удар і маятник відхиляється на кут α від вертикалі. При цьому тіло 1 відсуває повзунок на віддаль S .

Система куля - маятник перед ударом має момент імпульсу відносно точки O , який рівний моменту імпульсу кулі

$$L_1 = mvl, \quad (4.1)$$

де m - маса кулі, v - її швидкість, l - відстань від точки закріплення маятника до місця удару кулі в маятник. Після удару, коли куля застрягне в балістичному маятнику, останній починає обертатись навколо точки O , отже момент імпульсу системи

$$L_2 = J\omega, \quad (4.2)$$

де J - момент інерції маятника разом з кулею, що застрягла в ньому, ω - кутова швидкість. Із закону збереження моменту імпульсу

$$mvl = J\omega. \quad (4.3)$$

Маятник відхиляється на кут α , при цьому центр мас піднімається на висоту h . Із закону збереження енергії маємо:

$$(M + m)gh = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (4.4)$$

де M — маса маятника, а $M + m$ — маса системи маятник-куля. Розв'язавши спільно рівняння (4.3) і (4.4), одержимо:

$$v = \frac{1}{ml} \sqrt{2ghJ(M + m)}. \quad (4.5)$$

У зв'язку з тим, що маса тіла 1 набагато більша від маси стержня 2, і розміри набагато менші, можна розглядами момент інерції системи, як момент інерції матеріальної точки:

$J = (M + m)l^2$, де $m \ll M$, тому

$$J = Ml^2. \quad (4.6)$$

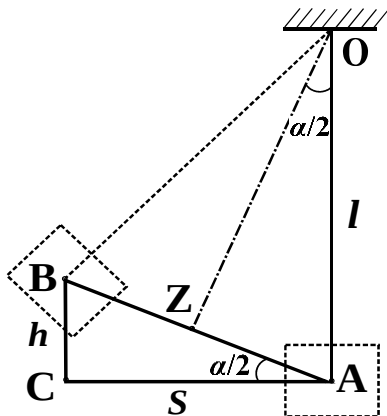


Рисунок 4.2

Висоту h підняття центра мас знайдемо з таких міркувань: з рис.4.2 видно, що при піднятті центру мас на висоту h , повзунок переміщується на відстань $S = AC$.

Умови досліду такі, що кут відхилення α дуже малий, тоді для нього, а тим більше для $\frac{\alpha}{2}$, виконується умова

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}. \quad (4.7)$$

З трикутника ABC $h = S \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ або з урахуванням (4.7)

$$h = S \frac{\alpha}{2}. \quad (4.8)$$

При виконанні умови (4.7) можна вважати, що $CA = BA$. Отже $ZA = BA/2 = S/2$. З трикутника ZOA

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{ZA}{l} = \frac{S}{2l}. \quad (4.9)$$

Тепер, з урахуванням (4.9)

$$h = \frac{S^2}{2l}. \quad (4.10)$$

Підставивши (4.6) і (4.10) в рівняння (4.5), одержимо формулу для швидкості руху кулі

$$v = \frac{SM}{m} \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (4.11)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти довжину l від точки закріплення O до середини тіла 1.
2. Виміряти масу кулі і масу маятника.
3. Зробити постріл і замітити, на яку віддаль S переміститься повзунок 6.
4. Дослід повторити декілька разів.
5. За формулою (4.11) визначити швидкість кулі. Обчислити відносну і абсолютну похибку.

Контрольні запитання

1. В чому полягає закон збереження моменту імпульсу?
2. Сформулювати закон збереження механічної енергії?
3. Як використовуються в даній роботі вище згадані закони?
4. Які удари називаються абсолютно пружними і абсолютно непружними?
5. Виведіть робочу формулу.
6. Виведіть формулу для обчислення похибок.

Лабораторна робота № 5

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ МАХОВОГО КОЛЕСА

Мета роботи: вивчення основних законів динаміки обертового руху.

Обладнання: махове колесо, вантажі, секундомір, штангенциркуль, лінійка.

Теоретичні відомості

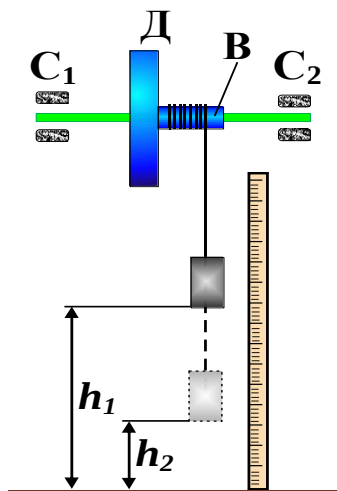


Рисунок 5.1

Момент інерції махового колеса визначають за допомогою приладу, зображеного на рис. 5.1. Прилад складається з махового колеса Д, насадженого на вал. Вал встановлено на підшипниках C_1 і C_2 . Махове колесо приводиться в обертовий рух вантажем масою m . На висоті h_1 вантаж має потенціальну енергію

$$E_{\text{п1}} = mgh_1. \quad (5.1)$$

Якщо дати можливість вантажу падати, то потенціальна енергія перейде в кінетичну енергію

поступального руху вантажу $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$, кінетичну енергію

обертового руху $E_{\text{к}} = \frac{I\omega^2}{2}$ і на роботу по подоланню сили

тертя $A = F_m h_1$. Запишемо закон збереження енергії:

$$mgh_1 = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + F_m h_1, \quad (5.2)$$

де F_m — сила тертя. Рух вантажу рівноприскорений без початкової швидкості, тому прискорення a і швидкість v відповідно дорівнюють:

$$a = \frac{2h_1}{t^2}, \quad (5.3)$$

$$v = at = \frac{2h_1}{t}, \quad (5.4)$$

де t — час опускання з висоти h_1 . Кутову швидкість ω знайдемо з формули

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h_1}{t}, \quad (5.5)$$

де r — радіус валу В. Коли вантаж дійде до нижньої точки, махове колесо по інерції буде продовжувати обертатися і вантаж підніметься на висоту $h_2 < h_1$. На висоті h_2 система буде мати запас потенціальної енергії

$$E_{n2} = mgh_2. \quad (5.6)$$

Так як $h_2 < h_1$ то $E_{n2} < E_{n1}$. Зменшення потенціальної енергії дорівнює роботі сил тертя:

$$mgh_1 - mgh_2 = F_m(h_1 + h_2). \quad (5.7)$$

Звідси сила тертя

$$F_m = \frac{mg(h_1 - h_2)}{h_1 + h_2}, \quad (5.8)$$

де h_1 — висота, з якої падає вантаж; h_2 — висота, на яку піднімається вантаж, досягнувши самої нижньої точки. Підставляючи в рівняння (5.2), значення v , ω і F_m і

розв'язавши його відносно I , одержимо формулу для знаходження моменту інерції махового колеса:

$$I = mr^2 \left(gt^2 \frac{h_2}{h_1(h_1 + h_2)} - 1 \right). \quad (5.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Штангенциркулем виміряти радіус вала В.
2. Накрутити на вал нитку і підняти вантаж до висоти h_1 .
3. Секундоміром виміряти час падіння вантажу з висоти h_1 .
4. Виміряти висоту h_2 , на яку піднімається вантаж після досягнення крайньої нижньої точки.
5. Дослід повторити п'ять разів. Результати записати в таблицю і за допомогою формули (5.9) визначити момент інерції махового колеса, а за допомогою формули (5.8) силу тертя.
6. Похибки обчислити згідно методичних вказівок

Контрольні запитання

1. Що називається моментом сили? Одиниці його вимірювання?
2. Що називається моментом інерції? Фізичний зміст моменту інерції.
3. Сформулювати і пояснити теорему Штейнера.
4. Сформулювати основний закон динаміки обертального руху.
5. Який закон динаміки покладено в основу робочої формули?

Лабораторна робота № 6

ПЕРЕВІРКА ОСНОВНОГО РІВНЯННЯ ДИНАМІКИ ОБЕРТОВОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА

Мета роботи: експериментально перевірити основний закон динаміки обертОВОГО руху твердого тіла у випадку, коли під час руху момент інерції тіла не змінюється. Визначити момент інерції тіла і момент I сили тертя.

Обладнання: установка РМ-06.

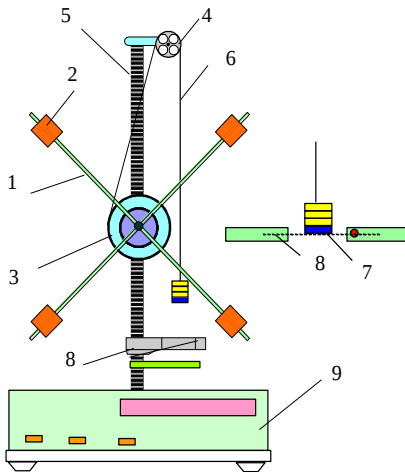


Рисунок 6.1

тіло вздовж цієї ж вісі

Установка РМ-06 складається з: хрестовини 1, протизаг 2, шківів різного діаметра 3, блока 4, стержня 5, нитки 6, тягарця 7, фотоелектричних датчиків 8, блока відліку часу 9.

Теоретичні відомості

З механіки відомо, що швидкість зміни моменту імпульсу твердого тіла відносно заданої вісі обертання, дорівнює сумі моментів сил, які діють на

$$\frac{d\vec{L}_z}{dt} = \sum \vec{M}_z. \quad (6.1)$$

Момент імпульсу відносно заданої вісі OZ можна знайти як добуток моменту інерції тіла на кутову швидкість обертання його навколо цієї вісі

$$\vec{L}_z = I_z \vec{\omega}_z. \quad (6.2)$$

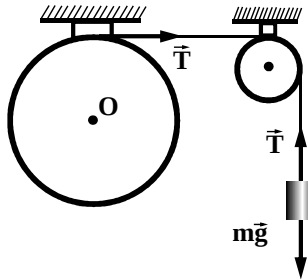
Підставивши значення моменту імпульсу з рівняння (6.2) в рівняння (6.1), отримаємо

$$\sum \vec{M}_z = \frac{d(I_z \vec{\omega}_z)}{dt} = I_z \frac{d\vec{\omega}_z}{dt} + \vec{\omega}_z \frac{dI_z}{dt}.$$

Якщо $I_z = 0$, то $\frac{dI_z}{dt} = 0$. Відомо, що $\frac{d\vec{\omega}_z}{dt} = \vec{\varepsilon}_z$, де ε_z — кутове прискорення, тоді основне рівняння динаміки обертального руху набере вигляду

$$\sum \vec{M}_z = \vec{I}_z \vec{\varepsilon}_z. \quad (6.3)$$

Якщо тіло має тільки одну вісь обертання, то індекси, які вказують на вісь, відносно якої відбувається обертання, можна опустити. Розглянемо саме такий випадок, при чому віссю обертання є вісь шківів. Якщо до кінця нитки, намотаної на шків, прив'язати тягарець і відпустити його, то на шків діятиме момент сили натягу нитки (рис.6.2):



$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{T}], \quad (6.4)$$

де T — сила натягу нитки. В протилежному напрямі буде діяти момент сили тертя, тому рівняння (6.3) набере вигляду

$$\vec{M} + \vec{M}_{\text{тр}} = I \vec{\varepsilon}. \quad (6.5)$$

Моменти M , $M_{\text{тр}}$ і кутове прискорення напрямлені вздовж вісі обертання, причому M і $M_{\text{тр}}$ напрямлені в протилежні сторони, отже рівняння (6.5) в скалярній формі матиме вигляд:

$$M - M_{\text{тр}} = I\varepsilon, \quad (6.6)$$

$$M = M_{\text{тр}} + I\varepsilon. \quad (6.7)$$

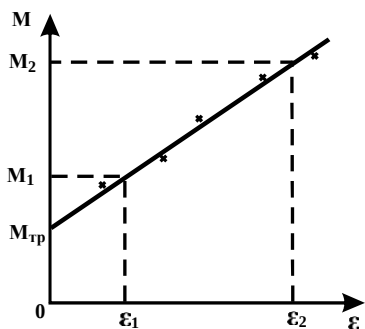


Рисунок 6.3

Рівняння (6.7) аналогічне лінійному рівнянню $y = a + bx$, тобто між M і ε повинна існувати лінійна залежність. Вимірявши декілька значень M і відповідних їм значень кутового прискорення ε , побудуємо графік в координатах M і ε . Якщо рівняння (6.7) справджується, то побудований графік буде прямою лінією (рис. 6.3). Відрізок, який відтинається прямою на вісі моментів,

дорівнює $M_{\text{тр}}$. З цього графіка може бути визначений момент інерції, а саме

$$I = \frac{M_2 - M_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (6.8)$$

З допомогою установки РМ—05 можна експериментально визначити кутове прискорення ε і момент сили M . З рис.6.2 видно, що рівняння руху тягарця, в скалярній формі має вигляд

$$mg - T = ma \quad \text{або} \quad T = m(g - a),$$

де m — маса тягарця, a — прискорення, з яким рухається тягарець. Отже, момент

$$M = Tr = m(g - a)r. \quad (6.9)$$

Прискорення a можна визначити, знаючи висоту падіння і час падіння:

$$a = \frac{2h}{t^2} . \quad (6.10)$$

Висоту падіння визначаємо по шкалі, нанесеній на стержні, а час — електронним секундоміром. Радіус виразимо через діаметр шківів. Тоді рівняння (6.9) набуде вигляду

$$M = \frac{D}{2} m \left(g - \frac{2h}{t^2} \right) . \quad (6.11)$$

Прискорення тягарця a таке ж, як і прискорення точок на ободі шківів, бо нитка не проковзує, значить $a = a_{\tau}$. В свою чергу

$$\varepsilon = \frac{a}{r} . \quad (6.12)$$

Тоді, очевидно

$$\varepsilon = \frac{2a}{D} . \quad (6.13)$$

Враховуючи (6.10), формула (6.13) набуде вигляду

$$\varepsilon = \frac{4h}{Dt^2} . \quad (6.14)$$

Порядок виконання роботи

1. Встановити тягарці на хрестовині так, щоб система знаходилася в стані байдужої рівноваги.
2. Намотати нитку на один із шківів, прив'язавши до кінця нитки найменший тягарець. Визначити середній час падіння тягарця з п'яти дослідів.
3. Виміряти діаметр шківів і висоту падіння тягарця (віддаль між двома фотодатчиками).
4. За формулою (6.11) і (6.14) визначити момент сили і кутове прискорення.
5. Пункти 2,3,4, виконати з тягарцями різної маси.
6. Побудувати графік залежності M від ε і визначити $M_{\text{тр}}$ і I .

Контрольні запитання

1. Що називається моментом інерції тіла відносно заданої вісі?
2. Що називають моментом сили?
3. Що називають моментом імпульсу?
4. Як формулюється основне рівняння динаміки обертового руху тіл?

Лабораторна робота № 7

ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ ОСЕЙ ІНЕРЦІЇ

Мета роботи: на досліді переконатись, що момент інерції тіла залежить від вибору осі обертання, а також встановити, які з осей обертання є головними, до якого типу дзиг належить кожне з досліджуваних тіл.

Обладнання: установка РМ-05.

Установка РМ-05 складається з стержня 1, рамки в якій закріплене досліджуване тіло 2, електромагніту 3, електродного блоку відліку часу і кількості коливань 4 (рис.7.1).

Теоретичні відомості

Інерціальні властивості тіла при обертовому русі визначаються моментом інерції відносно заданої осі обертання. При зміні осі обертання момент інерції тіла змінюється.

З другого боку, якщо якесь тіло привести в обертання навколо довільної осі і після цього залишити це тіло само на себе, то положення осі обертання в просторі буде змінюватись. В той же час існують осі, орієнтація яких в просторі зберігається без дії на тіло зовнішніх моментів сил. Такі осі називаються *вільними осями обертання* або *головними осями інерції*.

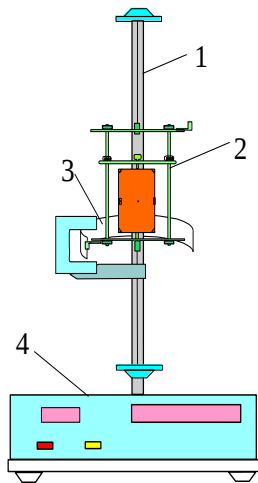


Рисунок 7.1

В теоретичній механіці показано, що для будь-якого тіла з довільним розподілом мас, існують три головні осі інерції. Вони обов'язково проходять через центр інерції і є взаємно перпендикулярними. Момент інерції відносно однієї з них буде найбільший, а відносно другої найменший, порівняно з моментом інерції відносно всіх інших осей, що проходить через центр інерції цього тіла. Відносно третьої з головних осей момент має проміжне значення. Головні осі інерції, відносно яких момент інерції є максимальний або мінімальний є *осями стійкого обертання*. Обертання же навколо головної осі, відносно якої момент інерції має проміжне значення, є нестійким. Це означає, що при незначному відхиленні осі обертання, виникають сили інерції, які, в першому випадку, повертають її в попереднє положення, а в другому випадку відхиляють її ще більше від попереднього положення.

У симетричних тілах головними осями інерції є осі симетрії. Так, в тілах з осьовою симетрією (наприклад, у однорідного циліндра) одна з головних осей є фіксована. Це вісь осьової симетрії OO , дві інші - це будь які дві взаємно перпендикулярні осі, що лежать у площині перпендикулярній до вісі симетрії і проходять через центр мас (рис. 7.2). У тіла з

центральною симетрією, наприклад, кулі, будь яка вісь, що проходить через центр мас, буде головною віссю інерції.

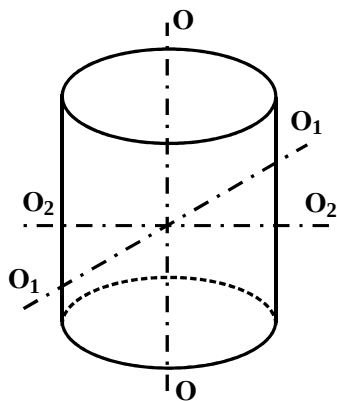


Рисунок 7.2

В загальному випадку момент інерції тіла відносно головних осей різні $I_1 \neq I_2 \neq I_3$. Таке тіло називають асиметричною дзигою. Тіло, в якого $I_1 \neq I_2 = I_3$ (як у випадку циліндра), називають симетричною дзигою. І, нарешті, якщо момент інерції відносно всіх головних осей однакові $I_1 = I_2 = I_3$, (як у випадку кулі), таке тіло називають кульовою дзигою. Слід зауважити, що при певному розподілі мас не тільки куля, а і тіло довільної форми може бути

кульовою дзигою.

Момент інерції твердого тіла відносно будь якої вісі обертання можна визначити за допомогою крутильного маятника. З теорії коливань відомо, що період коливань крутильного маятника T зв'язаний з моментом його інерції співвідношенням

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}}, \quad (7.1)$$

де I — момент інерції крутильного маятника, k — коефіцієнт кручення дротини. Якщо досліджуване тіло закріплене в рамці, яка має момент інерції I_0 , то формула (7.1) набере вигляду

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + I}{k}}. \quad (7.2)$$

З цього рівняння можна визначити момент інерції тіла закріпленого в рамці:

$$I = \frac{k}{4\pi^2} T^2 - I_0 . \quad (7.3)$$

З рівняння (7.2) випливає, що в разі збільшення моменту інерції збільшується і період коливань крутильного маятника.

Отже, якщо закріплювати тіло в рамці так, щоб воно здійснювало крутильні коливання відносно різних осей) то внаслідок зміни моменту інерції, буде мінятись і період коливань. Таким чином, для визначення головних осей інерції не обов'язково порівнювати моменти інерції відносно різних осей, обчислюючи їх за формулою (7.3), досить порівняти періоди коливань. Більші періоди коливань будуть відповідати більшим значенням моментів інерції і навпаки.

Порядок виконання роботи

1. Закріпити тіло в рамці відносно якоїсь вісі обертання.
2. Відхилити рамку від положення рівноваги і зафіксувати електромагнітом.
3. Натиснути кнопку "пуск". Електромагніт звільнить рамку і вона разом з тілом почне коливатись,
4. Натиснути кнопку "сброс". Почнеться відлік часу і кількість коливань.
5. Коли на екрані (кількість коливань) з'явиться цифра "9" натиснути кнопку "стоп". Відлік часу продовжується до „10” коливань.
6. Поділити зафіксований час на 10, визначити період коливань.
7. Дослід повторити три рази і визначити середнє значення періоду. Похибки обчислити згідно методичних вказівок.
8. Пункти 1-7 виконати для кожного з трьох тіл відносно осей, вказаних на рис. 7.3 (для паралелепіпеда, в малому перерізі якого є прямокутник, осі, відносно яких потрібно

визначити період коливань, позначені цифрами. Для тіла, в малому перерізі якого квадрат, з міркувань симетрії, не потрібно визначати періоди коливань відносно вісі 33, бо він

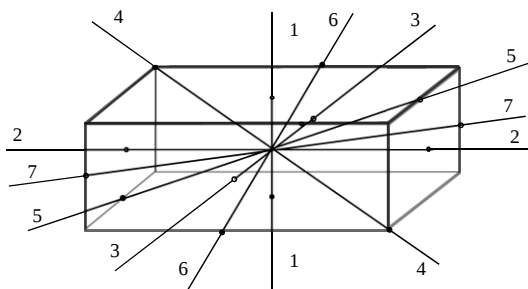


Рисунок 7.3

буде такий же, як і відносно вісі 11 не потрібно визначати період коливань і відносно вісі 77, так як він буде таким же, як і відносно вісі 66; для куба, з міркувань симетрії, визначити період

лише відносно осей 11, 44, 66).

9. Результати досліджень занести в таблицю.

Вісь	Тіло 1		Тіло 2		Тіло 3	
	Т	ΔT	Т	ΔT	Т	ΔT
1.1						
середнє значення						
2.2						

10. Показати, виходячи із зв'язку між періодом коливань і моментом інерції, які осі є головними осями інерції кожного тіла.

11. Вказати, котрі з осей є осями стійкого обертання тіла і до якого типу дзиг належить кожне тіло.

Контрольні запитання

1. Що називають моментом інерції тіла і матеріальної точки?
2. Які осі називають вільними осями обертання або головними осями інерції?

3. Які типи дзиг розрізняють і за якими ознаками?
4. Чи залежить величина моменту інерції, відносно вісі обертання, від вибору вісі?
5. Які з осей називаються осями стійкого обертання?

Лабораторна робота № 8

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ КРУТИЛЬНОГО БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: використовуючи закони збереження в механіці, визначити швидкість кулі.

Обладнання: установка РМ-5.

Теоретичні відомості

Крутильно-балістичний маятник являє собою масивне тіло, закріплене на пружинних дротинах. Якщо тіло повернути на кут φ , то в дротинах виникне пружний момент сил, прямопропорційний величині цього кута:

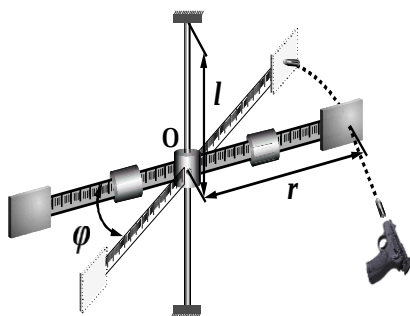


Рисунок 8.1

$$M = -k\varphi . \quad (8.1)$$

Знак мінус показує, що момент M протидіє закручуванню дротин, k — модуль кручення дротини. Якщо тіло відпустити, то воно почне здійснювати крутильні коливання. При цьому:

$$M = I\varepsilon, \quad (8.2)$$

де I — момент інерції маятника;

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (8.3)$$

де ε — кутове прискорення. З рівнянь (8.1), (8.2), (8.3) маємо:

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -k\varphi. \quad (8.4)$$

Розділимо рівняння (8.4) на I та введемо позначення

$$\frac{k}{I} = \omega_0^2 \quad (8.5)$$

і, перенісши всі його члени в ліву частину, дістанемо

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2\varphi = 0. \quad (8.6)$$

Ми одержали диференціальне рівняння гармонічних крутильних коливань, які здійснює крутильний маятник. ω_0 — кругова частота крутильних коливань. Як відомо, між круговою частотою і періодом існує простий зв'язок, а саме:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}. \quad (8.7)$$

Отже, враховуючи (8.5), одержимо з (8.7) формулу для періоду крутильних коливань:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}. \quad (8.8)$$

Знаючи від чого залежить період коливань крутильного маятника, можна приступити до визначення швидкості кулі. Якщо вистрілити з пістолета, то куля влучить у мішень і застрягне в ній. При цьому маятник повернеться на кут φ (рис. 8.1).

Застосуємо закон збереження моменту імпульсу: відносно точки O (точка, в якій знаходиться центр мас крутильного маятника) до удару кулі момент імпульсу кулі

$$L = mvr , \quad (8.9)$$

де m — маса кулі, v — швидкість кулі, r — віддаль від вісі обертання маятника до місця удару кулі в мішень. Момент імпульсу нерухомого крутильного маятника рівний нулю. Після удару кулі маятник разом з кулею набуде кутової швидкості ω (не плутати з ω_0) і почне обертатись. При цьому момент імпульсу маятника рівний

$$L = I\omega , \quad (8.10)$$

де I — момент інерції маятника і кулі, яка в ньому застряє. Але, так як момент інерції кулі набагато менший за момент інерції маятника, то ми можемо вважати, що в формулі (8.10) I — це момент інерції маятника. Отже, з закону збереження моменту імпульсу системи куля – крутильний маятник випливає:

$$mvr = I\omega . \quad (8.11)$$

Масу кулі m і віддаль r від вісі обертання до місця удару кулі в мішень можна виміряти безпосередньо. Отже, для визначення v потрібно ще знати I і ω . Момент інерції маятника I складається з моменту інерції стержня з мішенню і противагою I_0 , і моментів інерції двох масивних циліндрів. В першому наближенні ці циліндри, які розташовані на віддалі R_1 від вісі обертання можна розглядати як точкові маси. Тому момент інерції кожного з цих циліндрів буде рівний $m_0 R_1^2$, а момент інерції крутильного маятника

$$I = I_0 + 2m_0 R_1^2 . \quad (8.12)$$

При цьому обидва циліндри розташовані на однаковій віддалі R_1 від осі обертання. Формула (8.11), з врахуванням (8.12), набирає вигляду:

$$mvr = (I_0 + 2m_0 R_1^2) \omega. \quad (8.13)$$

Для визначення ω використовуємо закон збереження механічної енергії. Дійсно, кінетична енергія обертового руху маятника в момент удару $E_k = \frac{I\omega^2}{2}$ переходить в потенціальну енергію пружної деформації дротини, яка рівна $E_n = \frac{k\varphi_1^2}{2}$, де φ_1 — максимальний кут повороту маятника після удару кулі. Отже, з закону збереження енергії

$$\frac{I\omega^2}{2} = \frac{k\varphi_1^2}{2}. \quad (8.14)$$

З цього рівняння, з врахуванням (8.8), одержимо:

$$\omega = \frac{2\pi\varphi_1}{T}. \quad (8.15)$$

У даному рівнянні індекс (1) відповідає тому факту, що масивні циліндри знаходяться на віддалі R_1 від вісі обертання. Період T_1 і кут відхилення φ_1 можна визначити безпосередньо з досліду. Залишається виключити I_0 з рівняння (8.13). Скористаємось для цього, виразом для періоду крутильних коливань. Коли масивні циліндри знаходяться на віддалі R_1 від осі, то

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + 2m_0 R_1^2}{k}}, \quad (8.16)$$

а коли тягарці розташовані на віддалі R_2 від осі, то

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + 2m_0 R_2^2}{k}}. \quad (8.17)$$

Розв'язавши систему з двох рівнянь (8.16) і (8.17), знайдемо:

$$I_0 = \frac{2m_0(R_1^2 T_2^2 - R_2^2 T_1^2)}{(T_2^2 - T_1^2)mr}. \quad (8.18)$$

Підставивши в рівняння (8.13) вирази (8.18) і (8.15), розв'яжемо його відносно v :

$$v = \frac{4\pi m_0 \varphi_1 T_1 (R_2^2 - R_1^2)}{(T_2^2 - T_1^2)mr}. \quad (8.19)$$

Період коливань визначається як час декількох коливань t , поділений на їх кількість n . Якщо для визначення T_1 і T_2 брати однакову кількість коливань n , то $T_1 = \frac{t_1}{n}$, а $T_2 = \frac{t_2}{n}$. Визначимо кут φ_1 в радіанах і одержимо робочу формулу:

$$v = \frac{\pi^2 m_0 \varphi_1 t_1 n (R_2^2 - R_1^2)}{45(t_2^1 - t_1^2)mr}. \quad (8.20)$$

Порядок виконання роботи

1. Натиснути на кнопку "сеть" і перевірити, чи всі індикатори висвічують "нуль"; і, чи горить лампочка фотодіода.
2. Визначити масу m_0 , масивного циліндра і масу кулі m :
3. Закріпити циліндри на однакових віддальх від осі обертання (приблизно ці віддалі повинні дорівнювати половині віддалі від осі обертання до мішені). Виміряти відстань між їх серединами і розділити на 2. Це буде віддаль R_1 .

4. Зробити постріл з пістолета і замітити, на який кут відхилиться маятник. Дослід повторити декілька разів і знайти середнє значення кута φ_1 і відстані r від осі до місця удару кулі.
5. Закрутити маятник на певний кут, натиснути на кнопку "сброс" і відпустити маятник. Після появи на табло, що висвічує кількість коливань, цифри "9", натиснути кнопку "стоп". Секундомір зупиниться, коли маятник здійснить 10 коливань. Отже, $n = 10$ і при цьому висвітиться час цих коливань t .
6. Розсунути максимально циліндри, виміряти R_2 та час десяти коливань t_2 .
7. Обчислити швидкість кулі, абсолютну і відносну похибки.

Контрольні запитання

1. Що називається моментом інерції матеріальної точки і твердого тіла?
2. Що називаємо моментом імпульсу матеріальної точки відносно заданої точки простору?
3. Дати означення моменту імпульсу твердого тіла відносно заданої осі обертання і записати формулу для його визначення.
4. В чому полягає закон збереження моменту імпульсу?
5. Сформулювати закон збереження механічної енергії. Як цей закон застосовується в даній роботі?
6. Вивести формулу для обчислення похибок абсолютної і відносної.

Лабораторна робота № 9

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

Мета роботи: користуючись установкою РМ-07 визначити коефіцієнт тертя кочення.

Обладнання: установка РМ-07.

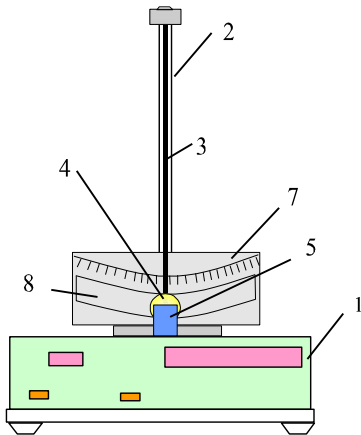


Рисунок 9.1

Установка РМ-07 складається з електронного блока вимірювання часу і кількості коливань 1, стержня 2, нитки 3, кульки 4, фотоелектричного датчика 5, шкали для вимірювання кута відхилення нитки 6, шкали для вимірювання кута відхилення стержня з ниткою 7, підставки для пластинки, відносно якої визначають коефіцієнт тертя кочення 8.

Теоретичні відомості

Сили, що проявляються при відносному переміщенні дотичних тіл одного відносно іншого називається силами зовнішнього тертя. Розрізняють сили тертя спокою, кочення і ковзання.

При невеликих швидкостях сила тертя не залежить від швидкості тіла і визначається за формулою Кулона

$$F = kN, \quad (9.1)$$

де k — коефіцієнт тертя ковзання, N — сила нормального тиску. Сила тертя кочення також визначається формулою Кулона

$$F = \frac{k}{r} N, \quad (9.2)$$

де k — коефіцієнт тертя кочення, N — сила нормального тиску, r — радіус тіла яке котиться. Коефіцієнт тертя кочення можна визначити за допомогою установки РМ-07.

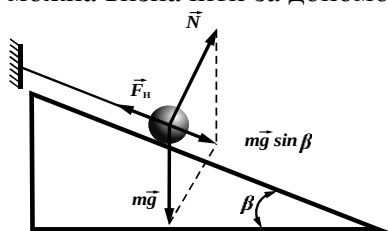


Рисунок 9.2

Якщо нитка, до кінця якої підвішена кулька 4 (рис. 9.2), і підставка 8, нахилені під кутом β до горизонту, то на кульку в стані спокою діє сила тяжіння mg , сила натягу нитки F_n і сила реакції опори N . Умовою рівноваги кульки є:

$$\vec{F}_n + \vec{N} + m\vec{g} = 0; \quad mg \cos \beta = N; \quad mg \sin \beta = F_n.$$

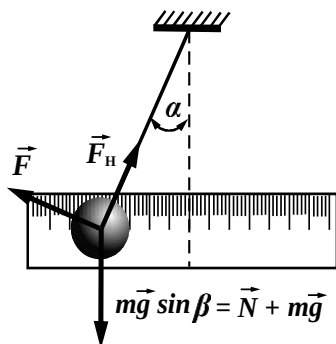


Рисунок 9.3

Якщо кульку відхилити від положення рівноваги (рис. 9.3) на кут α , то кулька, здійснюватиме затухаючі коливання. Причиною затухання коливань є сила тертя кочення, яка виникає під час кочення кульки по пластинці, розміщений на підставці. Енергія, надана кульці в момент відхилення її на кут α поступово витрачається

нею на роботу проти сил тертя. Якщо за n коливань енергія кульки зменшилась на ΔE , то робота, виконана кулькою проти сил тертя, дорівнює

$$A = \Delta E. \quad (9.3)$$

Робота, як відомо $A=FS$, де F — сила тертя кочення, S — шлях, пройдений кулькою за n коливань. Використаємо значення F з рівняння (9.2). Вираз для роботи набере вигляду

$$A = k \frac{N}{r} S. \quad (9.4)$$

Порівнюючи (9.3) і (9.4), можна записати, що

$$k \frac{N}{r} S = \Delta E. \quad (9.5)$$

З цього рівняння можна визначити k , якщо всі інші величини відомі. Цілях S можна визначити як середнє значення шляху, пройденого кулькою за одне коливання $\langle S \rangle$, помножено на число коливань, тобто

$$S = \langle S \rangle n. \quad (9.6)$$

З рис. 9.3 видно, що шлях, пройдений кулькою за одне коливання, дорівнює

$$S = 4\alpha l, \quad (9.7)$$

де α – кут найбільшого відхилення нитки, l - довжина нитки. При малих затуханнях, наближено, можна вважати, що шлях пройдений за перше коливання $S_1 = 4\alpha_1 l$, а за n -не коливання $S_2 = 4\alpha_2 l$, де α_1 і α_2 – відповідно максимальні кути відхилення при першому і n -му коливаннях. Тоді $\langle S \rangle = \frac{S_1 + S_2}{2}$, отже,

$$S = n\langle S \rangle \text{ і } S = 2nl(\alpha_1 + \alpha_2). \quad (9.8)$$

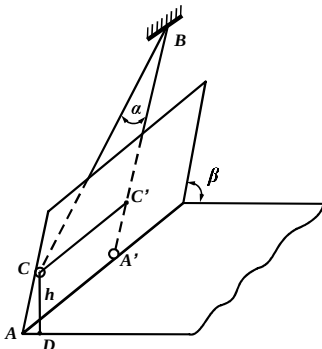


Рисунок 9.4

З рівності (9.8) видно, що для визначення шляху S потрібно міряти довжину нитки, максимальні кути відхилення нитки першого і n -го коливання і кількість коливань. Вимірявши, штангенциркулем,

діаметр кульки, визначимо, її радіус. Сила реакції опори, як видно з рис. 9.2, дорівнює $N = mg \cos \beta$. Залишилось визначити зміну енергії ΔE . Зміна енергії $\Delta E = E_1 - E_2$, де E — енергія кульки в момент відхилення її з ниткою на кут α_1 і E_2 — енергія кульки через n коливань, коли нитка утворює кут α_2 . При відхиленні нитки на кут α кулька має потенціальну енергію mgh , величину якої можна визначити, визначивши висоту h (рис. 9.4). З рис.9.4 видно, що $h = AC \sin \beta$, а $AC = l - C'B$, де l — довжина нитки. З трикутника CBC' , $C'B = l \cos \alpha$, тоді

$$AC = l (1 - \cos \alpha),$$

і, відповідно,

$$h = l (1 - \cos \alpha) \sin \beta.$$

Таким чином, кулька відхилена від положення рівноваги на кут α , має потенціальну енергію

$$E_1 = mgl \sin \beta (1 - \cos \alpha_1).$$

По аналогії

$$E_2 = mgl \sin \beta (1 - \cos \alpha_2).$$

Зміна енергії

$$\Delta E = mgl \sin \beta [(1 - \cos \alpha_1) - (1 - \cos \alpha_2)]. \quad (9.9)$$

Після перетворень рівняння (9.9) набуде вигляду

$$\Delta E = \frac{mgl}{2} (\alpha_1^2 - \alpha_2^2) \sin \beta \quad (9.10)$$

(при перетворенні вважати, що при малих кутах α , $\sin \alpha = \alpha$).

Підставивши значення зміни енергії, сили реакції опори, шляху і радіуса кульки у формулу (9.5), одержимо

$$k = \frac{r \Delta E}{NS} = \frac{D(\alpha_1 - \alpha_2)}{8n} \tan \beta. \quad (9.11)$$

Якщо в це рівняння α_1 , і α_2 підставляти в градусах то, очевидно, вираз для k потрібно помножити на $\frac{\pi}{180}$, тоді рівняння набере вигляду

$$k = \frac{\pi D}{180 \cdot 8n} (\alpha_1 - \alpha_2) \operatorname{tg} \beta . \quad (9.12)$$

З рівняння видно, що для визначення коефіцієнта тертя кочення потрібно виміряти діаметр кульки, кути відхилення нитки, кількість коливань і кут нахилу нитки до горизонту.

Порядок виконання роботи

1. Натиснути кнопку "сеть" і перевірити чи всі індикаторні лампочки висвічують цифру нуль.
2. Нахилити стержень 2 під кутом 60° до горизонту.
3. Відхилити нитку з кулькою на кут $10-15^\circ$.
4. Відпустити кульку і одночасно натиснути кнопку "сброс".
5. Коли кут відхилення досягне величини $3-4^\circ$, натиснути кнопку "стоп".
6. Виміряти штангенциркулем діаметр кульки.
7. Дослід повторити 5-6 разів.
8. Для кожного випадку обчислити за формулою (9.12) значення k . Обчислити похибки згідно вказівок.

Контрольні запитання

1. Які сили називають силами тертя?
2. Які є види тертя?
3. Формули Кулона для сил тертя.
4. Від чого залежить коефіцієнт тертя?

Лабораторна робота № 10

ВИВЧЕННЯ ПРЕЦЕСІЇ ГІРОСКОПА

Мета роботи: переконатись на досліді в існуванні гіроскопічного ефекту і встановити від чого залежить кутова швидкість прецесії гіроскопа.

Обладнання: установка РМ-10.

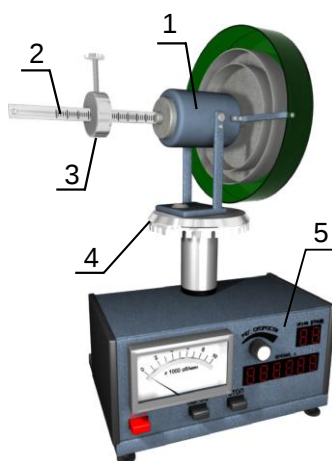


Рисунок 10.1

Установка РМ-10

складається з гіроскопа, який приводиться в рух електродвигуном 1, коромисла з поділками 2, протидваги 3, диска з градусними поділками 4, електронного блоку відліку кута, часу і кількості обертів двигуна 5.

Теоретичні відомості

У кожному тілі є три взаємно перпендикулярні осі обертання, що проходять через центр мас, які, при відсутності дії зовнішніх сил, не змінюють своєї орієнтації в просторі. Такі осі називаються *головними осями інерції*. Обертання тіла навколо осей з найбільшим і найменшим моментом інерції є стійким, а обертання навколо вісі з проміжним значенням моменту інерції — нестійким. Властивість головних осей зберігати своє положення в просторі широко використовується в техніці, зокрема, в гіроскопі.

Гіроскоп — масивне однорідне тверде тіло, яке обертається з великою кутовою швидкістю навколо однієї з

головних осей інерції, яка є і віссю симетрії. Для гіроскопів характерний, так званий, гіроскопічний ефект.

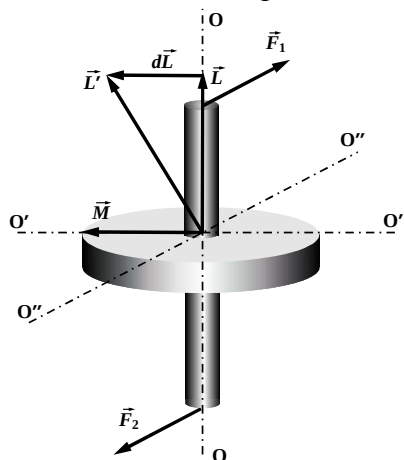


Рисунок 10.2

Гіроскопічний ефект полягає в тому, що, коли на гіроскоп, який обертається навколо вісі OO (рис. 10.2), подіє момент зовнішніх сил, який намагається повернути гіроскоп навколо іншої вісі O'O', то гіроскоп повернеться навколо третьої вісі O''O'', перпендикулярної до двох перших. Нехай гіроскоп обертається навколо вісі OO і має момент імпульсу L .

Подіємо на цей гіроскоп парою сил F_1 і F_2 так, щоб момент цих сил намагався повернути гіроскоп навколо вісі O'O'. Момент цих сил напрямлений вздовж вісі O'O'. Поява моменту сил M викличе зміну моменту імпульсу $dL = Mdt$. Напрямок dL буде такий же, як і момент M . Результуючий момент імпульсу гіроскопа буде L' .

Таким чином, для того, щоб гіроскопу мати цей момент імпульсу, він повинен повернутися навколо вісі O''O'', яка перпендикулярна до осей OO і O'O'. Якщо на гіроскоп діяти тривалий час сталим за напрямком моментом M , то вісь гіроскопа займе таке положення, що і вісь і напрям власного обертання співпадуть з напрямом і віссю обертання під дією моменту зовнішніх сил.

Тепер розглянемо гіроскоп, який обертається навколо вісі, що відхилена від вертикалі на кут α і закріплена в точці O (рис. 10.3). На гіроскоп діє сила тяжіння mg , яка намагається повернути гіроскоп навколо вісі O'O'. Гіроскоп, під дією цієї сили, одержить додатковий момент імпульсу dL напрям якого

співпадає з віссю $O'O'$. В результаті чого гіроскоп повертається на кут $d\varphi$ (гіроскопічний ефект). В новому положенні момент сили mg , знову буде перпендикулярний до вісі гіроскопа, і знову гіроскоп буде повертатись з нового положення на кут $d\varphi$ за час dt і так далі. Таким чином, вісь гіроскопа буде обертатися навколо вісі OO , описуючи в просторі конус. Такий рух називається *прецесією*.

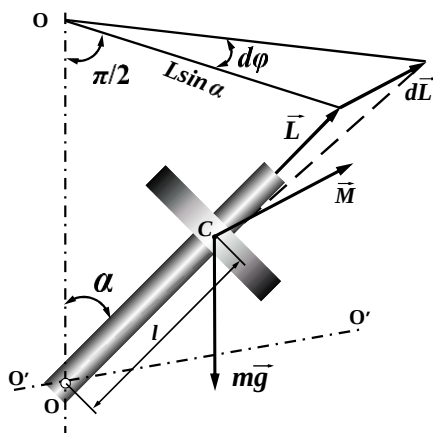


Рисунок 10.3

Визначимо кутову швидкість прецесії ω' . З рис.10.3 видно, що

$$d\varphi = \frac{|d\vec{L}|}{L \sin \alpha}.$$

З другого боку

$$|d\vec{L}| = M dt = mgl \sin \alpha dt.$$

В свою чергу $L = I\omega$, де ω – кутова швидкість обертання гіроскопа, I – момент інерції. Враховуючи вище сказане, визначимо кутову швидкість прецесії

$$\omega' = \frac{mgl}{I\omega}. \quad (10.1)$$

З рівняння (10.1) випливає, що кутова швидкість прецесії не залежить від кута нахилу вісі гіроскопа, а залежить від віддалі l між тачкою закріплення і центром мас, при сталій кутовій швидкості обертання гіроскопа ω . Якщо змінювати l , то змінюється ω' , а відношення $\frac{\omega'}{l} = \frac{mg}{I\omega}$ залишається сталою величиною, тобто

$$\frac{mg}{I\omega} = \text{const} \quad (10.2)$$

при сталій кутовій швидкості гіроскопа.

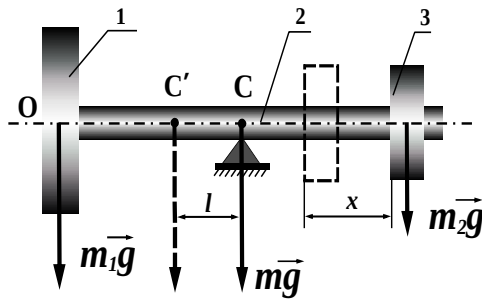


Рисунок 10.4

В даній роботі пропонується, на досліді, переконатись в існуванні гіроскопічного ефекту, а також перевірити відношення $\frac{\omega'}{l} = \text{const}$.

Гіроскопом, є диск 1, який може обертатись з великою кутовою швидкістю навколо вісі

CO. На продовженні вісі закріплене коромисло 2 з протизагою 3. Протизага може переміщуватись вздовж коромисла (рис. 10.4). Якщо закріпити протизагу так, щоб вісь гіроскопа була горизонтальною, то це означає, що центр мас системи проходить через точку закріплення C, і тоді момент сили тяжіння, що діє на систему гіроскоп-вісь-протизага дорівнює нулю. Згідно формули (10.1), якщо кутова швидкість прецесії (рис. 10.4) дорівнює нулю, то $l = 0$. При зміщенні протизаги, рівновага порушиться і вісь гіроскопа повинна нахилитися, як що б гіроскоп був нерухомий. Але внаслідок дії гіроскопічного ефекту, при рухомому гіроскопі, система почне обертатись навколо вертикальної вісі. З малюнка видно, що при переміщенні протизаги на віддаль x , центр мас зміщується на віддаль l і тепер на гіроскоп діє момент сили, перпендикулярний до вісі обертання. При пересуванні протизаги на віддаль x вправо, система почне обертатися навколо вертикальної вісі в протилежний бік, так як напрям моменту сили тяжіння змінюється на протилежний. Можна показати, що l прямопропорційна x . Тому, якщо $\frac{\omega'}{l} = \text{const}$,

то $\frac{\omega'}{x} = \text{const}$. Слід зауважити, що під час пересування протизаги можна відхилити вісь гіроскопа від горизонтального положення, але на це потрібно звертати увагу, бо, як показано вище, швидкість прецесії не залежить від кута нахилу вісі гіроскопа.

Порядок виконання роботи

1. По рівню, переконатись, що гіроскоп знаходиться в горизонтальному положенні.
2. Натиснути на кнопку „сеть” і перевірити чи світяться індикаторні лампочки.
3. В момент часу, коли одна з поділок диска, що відповідає десяткам градусів, стане проти стрілки, натиснути кнопку „сброс”. Після цього, як у віконечку з'явиться цифра 17, натиснути на кнопку „стоп”. Відлік часу припиняється тоді, коли на віконечку появиться цифра 18. Це означає, що зафіксовано час повороту диску на 180° .
4. Встановити протизагу на коромислі на поділці 1см. Ввімкнути електродвигун і довести, за допомогою потенціометра, кількість обертів двигуна до 6000 обертів.
5. Пересувати протизагу, кожний раз на 1см. Повторити досліди для різних значень x , при цьому звернути увагу на напрям обертання. Вважати напрям обертання за годинниковою стрілкою додатнім, а проти — від'ємним.
6. За формулою $\omega' = \frac{\pi}{t}$ підрахувати кутову швидкість.
7. Побудувати графік залежності ω' від x .
8. За точкою перетину графіка з віссю x знайти положення протизаги, при якому $\omega = 0$. Поставити протизагу в це положення і переконатись, що процесія відсутня.

Контрольні запитання

1. Що називається моментом інерції матеріальної точки і твердого тіла відносно заданої вісі?
2. Що називається моментом імпульсу точки і твердого тіла?
3. Що називається моментом сили?
4. Який зв'язок між моментом сили і моментом імпульсу?
5. Що називається гіроскопом?
6. В чому полягає гіроскопічний ефект?
7. Що називається прецесією гіроскопа?

Лабораторна робота № 11

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТА ІНЕРЦІЇ ТІЛА НЕПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

Мета роботи: вивчення законів динаміки обертового руху і їх застосування.

Обладнання: крутильний маятник, лінійка, штангенциркуль, досліджуване тіло.

Теоретичні відомості

Крутильний маятник, який використовується в даній роботі, являє собою горизонтальну платформу у вигляді диску, підвішеного на вертикальній жорсткій дротині (рис. 11.1). Якщо диск повернути в горизонтальній площині на кут φ , то в дротині, яка закрутиться, виникне пружний момент сили прямопропорційний кутові повороту φ , тобто

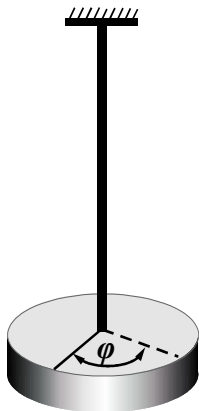


Рисунок 11.1

$$M = -k\varphi, \quad (11.1)$$

де k – модуль кручення дротини.

Знак мінус показує, що момент сили, M протидіє повороту диска. Якщо диск відпустити, то під дією моменту M , диск набуде кутового прискорення

$$\varepsilon = \frac{M}{I}, \quad (11.2)$$

де I – момент інерції. Отже, рівняння руху диска набере вигляду

$$I\varepsilon = M. \quad (11.3)$$

Відомо, що

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \quad (11.4)$$

Підставивши в (11.3) вирази (11.2) і (11.4) одержимо рівняння

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -k\varphi. \quad (11.5)$$

Поділимо рівняння на I , перенесемо всі члени у ліву частину і введемо позначення

$$\frac{k}{I} = \omega^2. \quad (11.6)$$

Тепер рівняння руху набере вигляду

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega^2\varphi = 0. \quad (11.7)$$

Рівняння (11.7) - це диференціальне рівняння гармонійного коливання. Тобто, наш диск буде здійснювати крутильні коливання з круговою частотою

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{I}}. \quad (11.8)$$

Відповідно період коливань

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}. \quad (11.9)$$

Якщо на диск покласти тіло будь-якої форми, але так, щоб центр мас тіла лежав на одній вертикалі з центром мас диска, то період крутильних коливань змінюється, тобто

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I + I_0}{k}}, \quad (11.10)$$

де I_0 — момент інерції покладеного тіла. Розв'язавши систему рівнянь (11.9) і (11.10), знайдемо I_0 :

$$I_0 = I \frac{T_1^2 + T^2}{T^2}. \quad (11.11)$$

Момент інерції диска I знайдемо, використавши формулу

$$I = \frac{1}{2}mR^2. \quad (11.12)$$

Масу диска обчислимо як добуток густини ρ на об'єм диска

$$V = \pi R^2 h, \quad (11.13)$$

де R — радіус диска, h — його товщина. Одержимо формулу:

$$I_0 = \frac{1}{2}\rho\pi R^4 h \frac{T_1^2 + T^2}{T^2}. \quad (11.14)$$

Період коливань визначається як $\frac{t}{n}$, де n — кількість коливань за час t . Для диска безпосередньо вимірюється його діаметр. Якщо кількість коливань, n для навантаженого і не

навантаженого маятника буде однакова, то формула (11.14), з врахуванням вищесказаного, набере вигляду

$$I_0 = \frac{1}{32} \pi \rho D^4 h \frac{t_1^2 - t^2}{t^2}, \quad (11.15)$$

де D – діаметр диска, t_1 – час певної кількості коливань маятника, на якому лежить тіло, t – час такої самої кількості коливань не навантаженого крутильного маятника, ρ – густина матеріалу диска, h – товщина диска.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти діаметр диска D і його товщину h .
2. Повернути не навантажений маятник на певний кут порядку $1-2^\circ$ і відпустити, виміряти секундоміром час t певної кількості коливань (але не менше 10).
3. Покласти на диск досліджуване тіло так, щоб центри мас тіла і диска були на одній вертикалі і виміряти час t_1 для такої ж самої кількості коливань, як і в першому випадку.
4. За формулою (11.15) обчислити момент інерції I_0 тіла неправильної форми.
5. Похибки, абсолютну і відносну, обчислити за стандартною методикою.

Контрольні запитання

1. Що називається моментом сили відносно точки і відносно вісі обертання?
2. Дати означення моменту інерції матеріальної точки і твердого тіла.
3. Що називається кутовим прискоренням і в яких одиницях воно вимірюється?
4. Записати основне рівняння динаміки обертового руху.
5. В чому полягає теорема Штейнера?

6. Який зв'язок між періодом коливань і круговою частотою?
7. Чому дорівнює період коливань крутильного маятника?
8. Вивести робочу формулу.
9. Вивести формулу для знаходження абсолютної і відносної похибки.

Лабораторна робота № 12

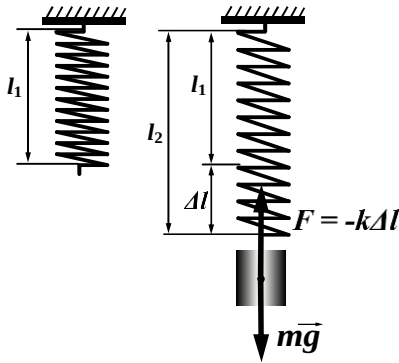
ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ЗЕМНОГО ТЯЖІННЯ І КОЕФІЦІЄНТА ЖОРСТКОСТІ ПРУЖИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

- Мета роботи:** Застосувати теорію коливань, визначити коефіцієнт жорсткості пружини і прискорення земного тяжіння за допомогою пружинного маятника.
- Обладнання:** Пружинний маятник, секундомір, терези з різноважками, лінійка.

Теоретичні відомості

Прискорення земного тяжіння залежить від географічної широти місцевості, розподілу маси в земній корі, висоти над рівнем моря. Тому прискорення земного тяжіння в різних точках земної поверхні має різну величину. Одним із способів визначення прискорення земного тяжіння є спосіб, в якому використовується пружинний маятник. Підвісимо на пружині довжиною l_1 тіло масою m і легенько будемо його опускати до зупинки. Пружина розтягнеться і довжина її буде дорівнювати l_2 . Видовження пружини з підвішеною масою m $\Delta l = l_2 - l_1$ називають *статичним видовженням* (рис. 12.1). На

вантаж в стані рівноваги діють: сила земного тяжіння mg і сила пружності $F = -k\Delta l$. В сумі вони дорівнюють нулю:



$$mg - k\Delta l = 0, \quad (12.1)$$

де k – коефіцієнт жорсткості, а Δl – статичне видовження. З цього рівняння випливає, що

$$g = \frac{k}{m} \Delta l. \quad (12.2)$$

Рисунок 12.1

На перший погляд здається, що для визначення g потрібно знати коефіцієнт жорсткості k і масу m , але з теорії коливань пружинного маятника відомо, що відношення $\frac{k}{m}$ дорівнює квадрату кругової частоти коливань пружинного маятника. Дійсно, якщо вантаж відтягнути на величину Y з стану рівноваги і відпустити, то на нього подіють сили тяжіння mg і пружності $F = -k(\Delta l + Y)$, сума яких, згідно з другим законом Ньютона, дорівнює добутку маси тіла на прискорення:

$$mg - k(\Delta l + Y) = ma. \quad (12.3)$$

Знаючи, що $a = \frac{d^2 Y}{dt^2}$ і врахувавши рівність (12.1), одержимо рівняння руху пружинного маятника:

$$-kY = m \frac{d^2 Y}{dt^2}. \quad (12.4)$$

Розділимо праву і ліву частину на масу m , перенесемо всі члени в ліву частину рівняння і введемо позначення

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2. \quad (12.5)$$

Тоді одержимо

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} + \omega_0^2 Y = 0. \quad (12.6)$$

Рівняння (12.6) є рівнянням гармонічного коливання. Розв'язок його буде, як відомо, функція

$$Y = A \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (12.7)$$

Величина $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ є циклічною частотою коливань.

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, де T – період коливань. Отже, щоб визначити відношення k/m , необхідне для знаходження g згідно рівняння (12.2), досить знати період коливань пружинного маятника:

$$\frac{k}{m} = \frac{4\pi^2}{T^2}. \quad (12.8)$$

З врахуванням останньої рівності рівняння (12.2) набирає вигляду

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta l. \quad (12.9)$$

Період коливань можна визначити, якщо знати час t , протягом якого здійснюється N коливань, тобто

$$T = \frac{t}{N}. \quad (12.10)$$

Остаточню рівняння для визначення g одержимо, підставивши в рівняння (12.9) вирази для T і Δl згідно (12.10) і (12.1):

$$g = \frac{4\pi^2 N^2 (l_2 - l_1)}{t^2} . \quad (12.11)$$

Якщо відома маса m тіла, підвішеного на пружині, то з формул (12.2) і (12.11) одержимо формулу для обчислення коефіцієнта жорсткості пружини:

$$k = \frac{4\pi^2 N^2}{t^2} m . \quad (12.12)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти довжину пружини l_1 , без вантажу. Підвісити вантаж і виміряти довжину розтягнутої пружини l_2 .
2. Вивести маятник з положення рівноваги, розтягнувши пружину 3-5мм і виміряти за допомогою секундоміра час 20-30 коливань.
3. За формулою (12.11) визначити прискорення земного тяжіння.
4. Виміряти масу тіла і за формулою (12.12) визначити коефіцієнт жорсткості пружини.

Контрольні запитання

1. Скласти диференціальне рівняння коливань пружинного маятника.
2. Що буде розв'язком диференціального рівняння гармонійного коливання?
3. Чому дорівнює період коливань пружинного маятника?
4. Вивести робочі формули для визначення прискорення земного тяжіння і коефіцієнта жорсткості пружини.

Лабораторна робота № 13

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ

Мета роботи: вивчення властивостей стоячих хвиль і визначення швидкості звуку в повітрі методом резонансу.

Обладнання: звуковий генератор, скляна трубка з поршнем і телефоном, масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

Розглянемо поширення хвиль в установці, схема якої дана на рис. 13.1. Коливання звукової частоти від генератора 1

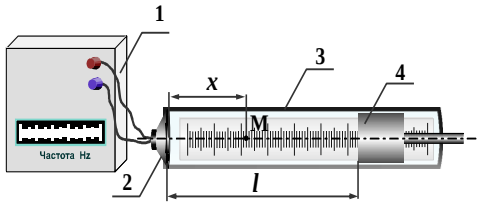


Рисунок 13.1

подаються на телефон 2. Звукові хвилі поширюються від телефону 2 у повітрі в середині труби 3, відбиваються від поршня 4 і повертаються до телефону і т. д. Таким

чином, в повітряному проміжку між телефоном і поршнем відбувається процес поширення біжучої і відбитої хвиль.

Припустимо спочатку, що ми маємо справу з однією парою хвиль падаюча-відбита. Коливання в будь-якій точці М, яка лежить на віддалі x від телефону буде результатом накладання падаючої і відбитої хвиль. Якщо знехтувати згасанням, зміщення ξ_1 і ξ_2 , викликані в точці М відповідно падаючою і відбитою хвилями, будуть відповідно дорівнювати

$$\xi_1 = A_0 \sin(\omega t - kx) \quad (13.1)$$

і

$$\xi_2 = A_0 \sin(\omega t - k(2l - x) + \pi), \quad (13.2)$$

де ω – кругова частота, а $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число.

У рівнянні (13.2) $(2l - x)$ це шлях, який пройшла хвиля від телефону до точки М, відбившись від поршня. В рівнянні (13.2) з'явилося π тому, що при відбиванні хвилі від більш густого середовища, яким є поршень порівняно з повітрям, фаза відбитої хвилі міняється на протилежну.

Пам'ятаючи, що $\sin(\alpha + \pi) = -\sin\alpha$, проведемо перетворення за відомими тригонометричними формулами і одержимо:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A_0 \sin k(1 - x) \cos(\omega t - kt). \quad (13.3)$$

Рівняння (13.3) є рівнянням стоячої хвилі, утвореної парою хвиль, падаюча-відбита. Множник $2A_0 \sin k(1 - x)$, не залежить від часу і називається амплітудою стоячої хвилі. Вона залежить від координати x . Точки, в яких $|\sin k(1 - x)| = 1$, називаються *пучностями*, бо в них амплітуда максимальна. Це спостерігається тоді, коли

$$k(1 - x) = (2m + 1)\frac{\pi}{2}, \quad (13.4)$$

де m – ціле число. З рівняння (13.4) знаходимо координати пучностей:

$$\frac{2\pi}{\lambda}(1 - x) = (2m + 1)\frac{\pi}{2}; \quad x = 1 - (2m + 1)\frac{\lambda}{4}. \quad (13.5)$$

Відстань між сусідніми пучностями дорівнює $\lambda/2$, це впливає з рівняння (13.5). Аналогічно, з умови

$$\sin k(1 - x) = 0 \quad (13.6)$$

знайдемо координати вузлів - тобто точок, де амплітуда мінімальна: $k(l - x) = m\pi$, звідки

$$x = l - m \frac{\lambda}{2}. \quad (13.7)$$

Відстань між сусідніми вузлами також дорівнює половині довжини хвилі.

Рівняння (13.3) було виведено з припущення, що в трубці інтерферує тільки одна пара хвиль падаюча-відбита, причому затуханням нехтували. Однак явища, які відбуваються у трубці будуть набагато складнішими. Хвиля, відбившись від поршня дійде до телефону, відіб'ється від нього і т.д. Утворюється велика кількість пар хвиль падаюча-відбита. Зауважимо, що для пари хвиль: падаюча на телефон - відбита від телефону, вузол буде спостерігатись у точці відбиття, тобто на телефоні. Для того, щоб координати пучностей (і вузлів), утворених кожною парою хвиль, співпадали, повинна виконуватись умова

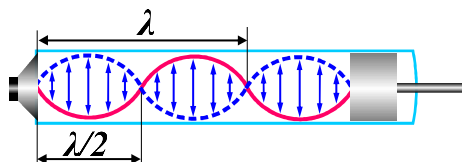


Рисунок 13.2

$$l = n \frac{\lambda}{2}, \quad (13.8)$$

де n – ціле число.

Наприклад, на рис. 13.2 наведено випадок, коли на довжині трубки вкладаються 3 півхвилі. При цьому співпадають і фази коливань для кожної пари хвиль. Наступає резонанс. При цьому амплітуда коливань різко зростає. Умова (13.8) - це умова резонансу. Внаслідок затухання, амплітуда коливань у пучностях має скінченне значення, тоді як теоретично, при відсутності затухання, вона повинна бути нескінченно великою. Рівняння стоячої хвилі в трубці має той же вигляд, що і

рівняння (13.3) тільки величину $2A_0$ потрібно замінити на A -результуючу амплітуду в пучності при резонансі.

Якщо присунути поршень до телефону, а потім його відсувати, то у випадку, коли відстань між поршнем і телефоном буде становити $\lambda/2$, $2\lambda/2$, $3\lambda/2$ і т.д. наступить резонанс і звук різко підсилюється. Відстань між двома сусідніми положеннями поршня Δl , при яких сила звуку максимальна, дорівнює половині довжини хвилі. Отже,

$$\lambda = 2\Delta l. \quad (13.9)$$

Якщо частота коливань відома, то використовуючи відоме співвідношення між довжиною хвилі, частотою і швидкістю поширення

$$\lambda = \frac{v}{\nu}, \quad (13.10)$$

визначають, а врахуванням (13.9), швидкість поширення хвилі

$$v = 2\Delta l\nu. \quad (13.11)$$

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути генератор звукових коливань і встановити частоту 2000 Гц.
2. Присунути поршень до телефону.
3. Відсуваючи поршень від телефону, знайти положення, в яких сила звуку максимальна.
4. Визначити відстані Δl між сусідніми положеннями поршня, в яких сила звуку максимальна і знайти середнє значення цих відстаней.
5. За формулою (13.11) визначити швидкість звуку. Обчислити абсолютну і відносну похибки за стандартною методикою.
6. Досліди повторити для частот 2500 Гц, 3000 Гц.

Контрольні запитання

1. Дайте означення хвилі.
2. Запишіть рівняння біжучої хвилі.
3. Що називають циклічною (круговою) частотою і хвильовим числом?
4. Коли утворюються стоячі хвилі?
5. Виведіть рівняння стоячої хвилі. В чому відмінності між стоячою і біжучою хвилею?
6. Яка умова резонансу при поширенні хвиль в трубах і стержнях?
7. Виведіть робочу формулу.

Лабораторна робота № 14

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: визначити прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника.

Обладнання: установка РМ-04.

Установка РМ-04 складається з стержня 1, на якому кріпиться кронштейн 2. На кронштейні на ножових опорах встановлюється маятник 3 з рухомими чечевицями 4. Електричний блок 5 відлічує час і кількість коливань. Сигнал на блок подається з фотодатчиків 6.

Теоретичні відомості

Коливаннями називають рухи або процеси, які характеризуються певною повторюваністю в часі. Коливальні

процеси широко поширені в природі і в техніці. Фізична природа коливань може бути різноманітною, тому коливання можуть бути механічні, електромагнітні та інші. Незважаючи на різну природу коливних процесів, вони описуються однаковими рівняннями.

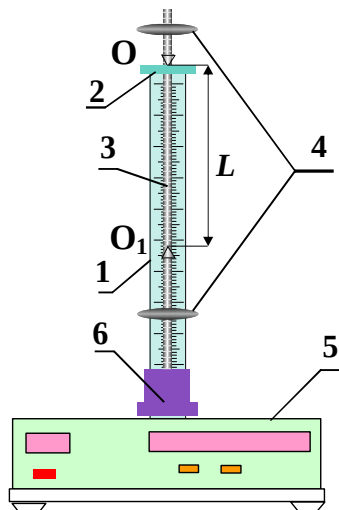


Рисунок 14.1

виду

Коливання називаються *вільними* (власними), якщо вони здійснюються за рахунок енергії переданої коливній системі в початковий момент часу. В ідеальному випадку (відсутності сил опору) такі коливання були б незатухаючими. В реальних умовах, всякі вільні коливання є затухаючими.

Найпростішими із коливань є гармонійні. Якщо коливна величина змінюється з часом за законом сінуса (косінуса), то коливання називаються *гармонійними*. Наприклад, гармонійні коливання величини S описується рівнянням

$$S = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (14.1)$$

де A - амплітудне значення коливної величини, ω_0 - кругова (циклічна) частота, φ_0 - початкова фаза. Циклічна частота

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, де T - період коливань. Величина обернена періоду

коливань $\nu = \frac{1}{T}$, називається частотою.

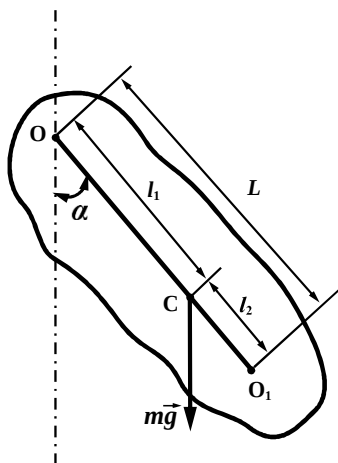


Рисунок 14.2

Тверде тіло, що вільно коливається під дією сили тяжіння, відносно вісі, яка не проходить через центр тяжіння, називається *фізичним маятником*. Якщо таке тіло (рис. 14.2) відхилити від положення рівноваги на кут α , то його рух опишемо згідно основного рівняння динаміки обертового руху

$$M = I \frac{d^2 \alpha}{dt^2}, \quad (14.2)$$

де $M = -mgl_1 \sin \alpha$ - момент сили, I - момент інерції. При малих α $\sin \alpha \approx \alpha$, тоді рівняння (14.2)

набере вигляду

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{mgl_1 \alpha}{I} = 0. \quad (14.3)$$

Позначивши $\sqrt{\frac{mgl_1}{I}}$ через ω_0 , одержимо таке рівняння:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha = 0. \quad (14.4)$$

Рівняння (14.4) є диференціальним рівнянням коливання фізичного маятника, період якого $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl_1}}$

або $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$, де $L = \frac{I}{ml_1}$ - приведена довжина

фізичного маятника. Видно, що період коливань фізичного маятника залежить від L і g , значить, визначивши період коливань T маятника і приведену довжину маятника L , можна визначити прискорення вільного падіння g . При наукових

дослідженнях необхідно визначити прискорення вільного падіння з відносною похибкою порядку $10^{-6}\%$. Такими вимірюваннями займається розділ геофізики - гравіметрія. Для забезпечення такої точності, ні один реальний маятник не може розглядатися, як математичний. Тому, для розрахунків, потрібно користуватися формулою періоду фізичного маятника, причому, час повинен вимірюватися з точністю до 10^{-7} с, а приведена довжина маятника з точністю до 1 мкм. Визначити приведену довжину фізичного маятника можна, якщо його зробити оборотним. *Оборотним* називається такий фізичний маятник, у якого знайдено дві точки підвісу, що лежать на прямій, яка проходить через центр мас маятника, відносно яких період однаковий.

Покажемо, що приведена довжина такого маятника дорівнює відстані між точками підвісу. Нехай фізичний маятник

відносно точок O і O_1 є оборотний, тоді $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{mgl_1}}$,

$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{mgl_2}}$. За теоремою Штейнера $I_1 = I_0 + ml_1^2$ і

$I_2 = I_0 + ml_2^2$, тоді $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + ml_1^2}{mgl_1}}$ і $T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + ml_2^2}{mgl_2}}$.

Виключивши з цих рівнянь I_0 , отримаємо $\frac{Tg}{4\pi^2} = I_1 + I_2$, де $T = T_1 = T_2$. З останнього рівняння визначимо період T , а саме:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_1 + I_2}{g}}. \quad (14.5)$$

Порівнюючи це рівняння з рівнянням $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

бачимо, що приведена довжина маятника L дорівнює $l_1 + l_2$.

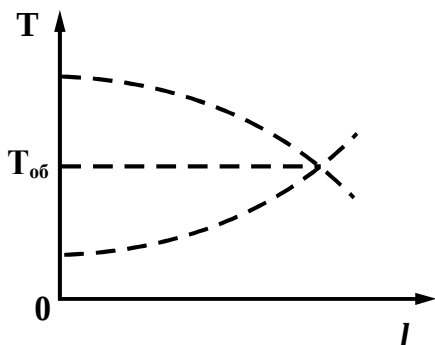


Рисунок 14.3

Нехай точки підвісу O і O_1 (рис. 14.1) зафіксовані і маятник необоротний, то при переміщенні нижньої чечевиці знизу в вгору, період буде зменшуватися (див.рис.14.3). Тепер повернемо маятник на 180° і знову будемо переміщувати ту ж саму чечевицю, при цьому період буде зростати. Проекція точки

перетину графіків на вісь періодів, є *період коливання оборотного маятника*, а віддаль між точками підвісу маятника - *приведена довжина маятника*.

Таким чином, вимірявши віддаль L між точками підвісу маятника за графіком період коливання T , з формули

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} \quad (14.6)$$

можна визначити прискорення вільного падіння.

Порядок виконання роботи

1. Повернути верхній кронштейн так, щоб кінець стержня оборотного маятника перекрив лампочку фотодатчика.
2. Положення ножових опор маятника зафіксувати гвинтом так, щоб при зміні точок підвісу нижній кінець його перекривав лампочку фотодатчика і, до закінчення досліду не змінювати.
3. Звільнити гвинтом чечевицю і пересунути її вниз до кінця стержня, але так, щоб він проходив в проміжку фотодатчика.
4. Положення верхньої чечевиці вказує лаборант.
5. Відхилити маятник на 3° - 4° від положення рівноваги, натиснути кнопку "сброс" і відпустити маятник.

6. Після появи на цифровому табло цифри 9 натиснути кнопку "стоп" і записати покази кількості коливань маятника n і час t .
7. За формулою $T = \frac{t}{n}$ визначити період коливань маятника.
8. Пересуваючи, послідовно, нижню чечевицю вгору на одну поділку, для кожного положення чечевиці, виконати пункти 3, 4, 5, 6 і 7.
9. Повернути маятник на 180° і підвісити його на другу ножову опору.
10. Переміщуючи чечевицю на кожну поділку вниз від верхнього кінця маятника, виконати пункти 3, 4, 5, 6 і 7. Одержані результати вимірювань занести в таблицю.
11. За одержаними результатами побудувати графік (див. рис. 14.3) з графіка визначити період оборотного маятника $T_{об}$.
12. Визначити приведену довжину маятника (віддаль між ножовими опорами) L .
13. За формулою (14.6) визначити прискорення вільного падіння.
14. Обчислити похибки згідно методичних вказівок.

Контрольні запитання

1. Які рухи називаються коливними?
2. Які коливання називаються гармонійними?
3. Запишіть рівняння гармонійного коливання.
4. Запишіть диференціальне рівняння гармонійного коливання.
5. Який маятник називається математичним?
6. Який маятник називається фізичним?
7. Який маятник називається оборотним?
8. Запишіть диференціальне рівняння коливань фізичного маятника.
9. Як і в якій послідовності визначити прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника?

Лабораторна робота № 15

ВИЗНАЧЕННЯ ЛОГАРИФМІЧНОГО ДЕКРЕМЕНТА ЗАГАСАННЯ, КОЕФІЦІЄНТА ЗАГАСАННЯ І ДОБРОТНОСТІ КОЛИВНОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи: ознайомитись із затухаючими коливаннями системи і визначити її параметри: логарифмічний декремент загасання, коефіцієнт загасання і добротність.

Обладнання: коливна система з самописцем і стрічко-протяжним механізмом, секундомір.

Теоретичні відомості

Якщо систему вивести з положення рівноваги і залишити саму на себе, то вона буде знаходитись під дією квазіпружної сили і сили опору. На подолання сили опору система при русі повинна затрачати енергію, отже амплітуда коливань системи весь час буде зменшуватися. Коливання будуть загасаючими. Рівняння загасаючих коливань має вигляд:

$$\xi = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (15.1)$$

де $A_0 e^{-\beta t}$ – амплітуда загасаючих коливань, β – коефіцієнт загасання, $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота (кругова частота), t – час, φ – початкова фаза коливань. Швидкість затухання характеризується за допомогою логарифмічного декременту загасання. *Логарифмічним декрементом загасання* називається натуральний логарифм відношення попередньої амплітуди до наступної, розділених інтервалом часу в один період T :

$$\delta = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} . \quad (15.2)$$

Проведемо перетворення: $\delta = \ln \frac{e^{-\beta t}}{e^{-\beta t} e^{-\beta T}} = \ln e^{\beta T} = \beta T .$

Отже,

$$\delta = \beta T . \quad (15.3)$$

З врахуванням (15.3) рівнянню (15.1) можна надати вигляду

$$\xi = A_0 e^{-\frac{\delta}{T} t} \cos(\omega t + \varphi) . \quad (15.4)$$

Визначити логарифмічний декремент загасання можна наступним чином. Нехай система здійснила N коливань при цьому амплітуда зменшилась в k разів. Отже:

$$\frac{A_0 e^{-\frac{\delta}{T} t}}{A_0 e^{-\frac{\delta}{T} (t+NT)}} = k . \quad (15.5)$$

Розв'язуючи це рівняння, знайдемо:

$$\delta = \frac{\ln k}{N} . \quad (15.6)$$

З рівняння (15.3), знаючи δ і T , можна знайти:

$$\beta = \frac{\delta}{T} . \quad (15.7)$$

Відомо, що добротністю коливної системи називають величину Q , яка дорівнює π/δ . Отже

$$Q = \frac{\pi}{\delta} . \quad (15.8)$$

Врахувавши (15.6) маємо:

$$Q = \frac{\pi N}{\ln k} . \quad (15.9)$$

За формулою (15.9) визначають добротність системи.

Порядок виконання роботи

1. Не вмикаючи самописець, відхилити маятник від положення рівноваги на кут 10° , відпустити його і секундоміром засікти час t декількох коливань n . Знайти період

$$T = \frac{t}{n}. \quad (15.10)$$

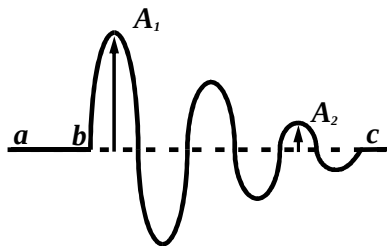


Рисунок 15.1

2. Коли маятник знаходиться в рівновазі, ввімкнути стрічкопротяжний механізм на 1-2 с. Самописець накреслить пряму ab , що відповідає положенню рівноваги (лінія ab на рис.15.1).

3. Відвести маятник від положення рівноваги, відпустити його і одночасно ввімкнути стрічкопротяжний механізм. Записують коливання до повної зупинки маятника.

4. Вирізати частину стрічки з записом коливань. Продовжити за допомогою лінійки пряму ab , щоб одержати лінію, яка відповідає положенню рівноваги (пряма abc на рис. 15.1).

5. Виміряти лінійкою значення двох амплітуд (амплітуди A_1 і A_2 на рис. 15.1) і знайти їх відношення $k = \frac{A_1}{A_2}$.

6. Підрахувати на записаній кривій за скільки коливань N амплітуда зменшилась від A_1 до A_2 .

7. За формулою (15.6) визначити δ , а за формулою (15.8) – добротність системи.

8. Підставити у формулу (15.7) значення δ з (15.6) і T з (15.10) одержати формулу для коефіцієнта загасання

$$\beta = \frac{n \ln k}{Nt}. \quad (15.11)$$

і обчислити коефіцієнт загасання.

Контрольні запитання

1. Які коливання називаються загасаючими?
2. Запишіть диференціальне рівняння загасаючих коливань.
3. Чому дорівнює амплітуда загасаючого коливання?
4. Що називається логарифмічним декрементом загасання?
5. Що характеризує коефіцієнт загасання?
6. Що називається добротністю коливної системи?

Перелік літературних джерел

1. Кучерук І.М. Загальний курс фізики т.1 / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик. – К.: Техніка, 1999.
2. Савельєв І.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1978.
3. Гапчин Б.М. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум/ Б.М. Гапчин, Я.Й. Дутчак, В.С. Френчко. – Львів, 1990.
4. Булкин П.С. Общий физический практикум. Молекулярная физика/ П.С. Булкин, Н.Н. Попова. – М., 1988.

Додаток

Основні фізичні сталі

Гравітаційна стала	$\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$
Універсальна газова стала	$R = 8,314510 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Число Лошмідта	$N_L = 2,686754 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Маса спокою електрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса спокою протона	$m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Елементарний електричний заряд	$e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Атомна одиниця маси	$\text{а.о.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Швидкість поширення світла у вакуумі	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}$
Стала Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Число Фарадея	$F = 9,648456 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$

Префікси для утворення десяткових одиниць

Префікс	Позначення	Множник	Префікс	Позначення	Множник
Тера	Т	10^{12}	піко	п	10^{-12}
Гіга	Г	10^9	нано	н	10^{-9}
Мега	М	10^6	мікро	мк	10^{-6}
Кіло	к	10^3	мілі	м	10^{-3}
Гекто	г	10^2	санті	с	10^{-2}

Коефіцієнт поверхневого натягу рідини при 20 °С, (Н/м)

Вода	0,073	Ртуть	0,500
Мильна вода	0,040	Спирт	0,022

Питома теплоємність, кДж/(кг·К)

Алюміній	0,88	Сталь	0,46
Латунь	0,38	Мідь	0,38
Лід	2,10	Вода	4,20

Густини речовин, (кг/м³)

Гази за нормальних умов

Азот	1,251	Кисень	1,429
Повітря	1,293	Вуглекислий газ	1,977
Водень	0,090	Гелій	0,18

Рідини

Спирт	$0,8 \cdot 10^3$	Гліцерин	$1,26 \cdot 10^3$
Гас	$0,8 \cdot 10^3$	Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$
Масло	$0,9 \cdot 10^3$	Вода	$1,0 \cdot 10^3$

Тверді тіла

Чавун	$7,0 \cdot 10^3$	Нікель	$8,8 \cdot 10^3$
Залізо	$7,8 \cdot 10^3$	Срібло	$10,5 \cdot 10^3$
Сталь	$7,8 \cdot 10^3$	Свинець	$11,3 \cdot 10^3$
Латунь	$8,4 \cdot 10^3$	Цинк	$7,0 \cdot 10^3$
Мідь	$8,9 \cdot 10^3$	Лід	$0,9 \cdot 10^3$

Модуль Юнга, ГПа

Алюміній	70
Мідь	110
Сталь	200

В'язкість рідин, кг/(м·с)

Вода	0,10
Ацетон	0,033
Бензин	0,065
Гліцерин	0,83
Повітря	0,0088