

Міністерство освіти і науки України  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича

# **Фізичний практикум**

## **МЕХАНІКА**

Чернівці  
2021

К 93  
УДК 53(076.1)

Рекомендовано вченою радою Навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, протокол №12 від 16 грудня 2021 року

К 93 Механіка: Фізичний практикум: Методичні вказівки для студентів денної форми навчання. Видання друге, виправлене і доповнене / Укл. : Курек І.Г., Курек Є.І., Ткач О.О., Федорцова І.В. – Чернівці: 2021. – 72 с.

Робота в лабораторії загального фізичного практикуму є невід'ємною частиною вивчення законів і методів фізики. Лабораторні роботи допомагають студентам поглибити знання, які вони отримали на лекціях та практичних заняттях, ознайомитися з деякими основними приладами, оволодіти різними методами вимірювань і технікою експерименту.

Працюючи в лабораторії, студенти повинні виконати й захистити певну кількість робіт, які охоплюють своєю тематикою всі розділи механіки, що розглядаються в лекційному курсі. Ці вказівки містять детальні інструкції до лабораторних робіт, які містять мету роботи, теоретичну частину та опис приладів, а також хід виконання роботи.

До кожної лабораторної роботи сформульовані контрольні запитання і завдання, і наведено список джерел в яких можна знайти на них відповіді.

Методичні вказівки призначені для студентів першого курсу, які навчаються за спеціальностями “Фізика та астрономія”, “Середня освіта (фізика)” та “Прикладна фізика”, і починають експериментальне вивчення загального курсу фізики в механічній лабораторії.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### Визначення об'єму циліндричного тіла

**Мета роботи:** вивчити конструкцію та технічні характеристики вимірювальних приладів, освоїти методи вимірювання ними лінійних величин, навчитися обчислювати похибки прямих та опосередкованих вимірювань.

**Прилади і матеріали.** Штангенциркуль; мікрометр; деталі для вимірювання.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Для безпосередніх вимірювань довжин широко використовуються різного типу лінійки та рулетки. Точність вимірювання довжин цими мірами невисока. Вона в основному не перевищує 0,5 мм. Для більш точних вимірювань користуються приладами з ноніусом. **Ноніусом** називається невелика додаткова шкала до звичайного масштабу, яка дає змогу підвищити точність вимірювань у 10 - 20 разів. Ноніус ґрунтується на тому, що людське око легко розрізняє, чи є два штрихи продовженням один одного, чи вони дещо зсунуті. Довжина ноніуса вибирається такою, щоб сумарна довжина поділок ноніуса дорівнювала  $(m - 1)$  поділкам основної шкали (рис.1, а), тобто

$$ma = (m - 1)b, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  відповідно ціни поділок ноніуса і основної шкали. З формули (1) різниця  $\Delta = b - a$  (точність ноніуса) дорівнює

$$\Delta = b - a = \frac{b}{m}. \quad (2)$$

Отже, **точністю ноніуса** називають величину  $b/m$ , яка дорівнює відношенню ціни найменшої поділки основної шкали до кількості поділок на ноніусі.

Таким чином, у залежності від потреби, можна виготовити ноніус тієї чи іншої точності. Так, шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,05 мм має 20 поділок на 19 мм, а шкала ноніуса для

4

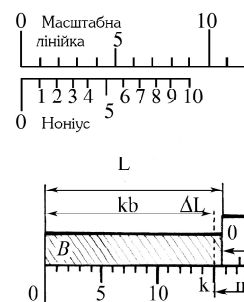


Рис. 1

вимірювання з точністю до 0,02 – 500 однакових поділок на довжині 49 мм. Це так звані розширені ноніуси, в яких довжина поділки на 1/20 або 1/50 менша від довжини поділки основної шкали.

Розглянемо процес вимірювання за допомогою лінійного ноніуса. Нехай  $B$  – вимірюваний предмет (рис. 1, б). З рисунка видно, що його довжина

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

де  $kb$  – ціле число поділок основної шкали до нуля ноніуса, в мм;  $\Delta L$  – невідомий відрізок, в частках міліметра. Позначимо через  $n$  ту поділку ноніуса, яка збігається з довільною поділкою основної шкали. Тоді

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

Із (3) і (4) знаходимо шукану довжину

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

Отже, довжина відрізка, що вимірюється, дорівнює цілому числу поділок основної шкали до нуля ноніуса плюс точність ноніуса, помножена на номер поділки ноніуса, яка збігається з деякою поділкою основної шкали. Ноніуси застосовуються в різноманітних приладах, зокрема в штангенциркулях. **Штангенциркуль** (рис.2) –

5

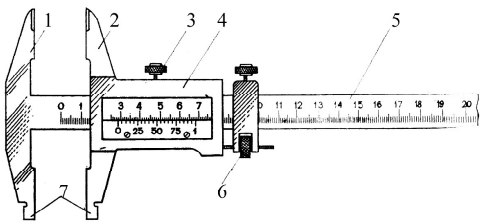


Рис. 2

це прилад для вимірювання лінійних розмірів із точністю від 0,1 до 0,02 мм. Він складається зі сталеві лінійки (штанги) 5 із міліметровими поділками, відносно якої переміщується рамка 4 з ноніусом, і двох пар губок (ніжок) – нерухомих 1 і рухомих 2. При зімкнутих губках відлік за ноніусом дорівнює нулеві. Щоб точно визначити розмір деталі, рухому губку переміщують до моменту дотику її до деталі за допомогою мікрометричного пристрою 6, щоб запобігти надмірному натисканню губок на деталь. Стопорним гвинтом 3 фіксують рухому губку і роблять відлік за ноніусом. При вимірюванні внутрішніх розмірів користуються каліброваними губками 7, загальна ширина яких при зведених губках дорівнює 10 мм. Цей розмір треба додавати до відліку за шкалою.

**Мікрометр** (рис.3) – це інструмент для вимірювання лінійних розмірів із точністю до 0,01 мм. Він складається зі сталеві скоби 8, що має опорну нерухому п'яту 1, стебла 3, мікрометричного гвинта

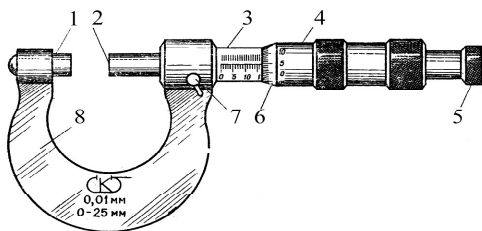


Рис. 3

6

2 і стопорного гвинта 7. Мікрометричний гвинт переміщується всередині гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі 3. На зовнішній поверхні стебла є дві шкали, зсунуті одна відносно одної на 0,5 мм. При обертанні барабана 4 обертається і гвинт; при цьому переміщується його вимірювальна поверхня. Крок гвинта 0,5 мм, тобто одному повному обертотві гвинта відповідає лінійне переміщення барабана на 0,5 мм. Скошений обід барабана поділено на 50 однакових поділок. На правому кінці барабана є фрикційний пристрій – тріскачка 5. При вимірюванні слід обертати барабан **тільки** за головку тріскачки. Деталь при вимірюванні затискається між п'ятою і мікрометричним гвинтом.

Відлік показів мікрометра проводиться так: за шкалою стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. Соті частки міліметра відраховуються за круговою шкалою барабана 6. Одержані результати додаються. Кількість сотих часток відповідає тій поділці кругової шкали, напроти якої розміщується поздовжня риска на шкалі стебла.

#### Хід роботи

**Вправа 1.** Ознайомлення з конструкцією вимірювальних приладів.

1. Вивчіть конструкцію та технічні характеристики штангенциркуля. Навчіться читувати зі штангенциркуля довільно проставлені розміри.
2. Вивчіть конструкцію та технічні характеристики мікрометра. Переверіть встановлення гвинта на нуль. Навчіться читувати зі шкали мікрометра довільно проставлений розмір.

Перед виконанням наступних вправ ознайомтеся з елементами теорії похибок та порядком проведення і обробки результатів прямих та опосередкованих вимірювань, які викладені у [10].

**Вправа 2.** Проведення прямих вимірювань та обробка їх результатів .

3. Виміряйте не менше трьох разів висоту циліндричної деталі. Обчисліть похибки прямих вимірювань згідно з § 6 [10].
4. Виміряйте не менше трьох разів діаметр циліндричної деталі. Обчисліть похибки прямих вимірювань згідно з § 6 [10].

7

**Вправа 3.** Проведення та обробка результатів опосередкованих (непрямих) вимірювань.

5. Обчисліть середнє значення об'єму циліндричного тіла за формулою

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H . \quad (4)$$

6. Виведіть формули для обчислення абсолютної та відносної похибок вимірювання об'єму згідно з § 7 та прикладом наведеним у додатку [10].

#### Контрольні запитання і завдання

1. Які будова і правила користування штангенциркулем, мікрометром?
2. Дайте визначення основних і додаткових величин системи SI.
3. У чому полягає мета вимірювання? Які існують види похибок?
4. Які вимірювання називаються прямими; опосередкованими?
5. Сформулюйте основні припущення теорії похибок.
6. Що таке абсолютна; відносна похибка вимірювань? У чому полягає їх зміст?
7. Що таке надійність і довірчий інтервал?
8. Як визначається похибка одного прямого виміру?
9. Як обчислюються похибки при прямих вимірюваннях?
10. Як обчислюються похибки при опосередкованих вимірюваннях?

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція до лабораторної роботи.
- 2-7. [10, с. 7-14].
8. [10, с. 20-21].
9. [10, с. 22-23].
10. [10, с. 24-31].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Визначення прискорення вільного падіння за допомогою маятника

**Мета роботи:** визначення прискорення вільного падіння.

**Вправа 1.** Визначення прискорення вільного падіння за допомогою фізичного маятника.

**Прилади і матеріали.** Обертвий маятник, секундомір, рулетка.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Фізичним маятником називається будь-яке тіло, підвішене в точці, що лежить вище його центра мас, і може коливатися. Обертвові маятники, в залежності від вимог, можуть мати різну форму. В нашому випадку він складається зі стержня, на який надіті важкі рухомі сочевиці та опорні призми. Використання обертвового маятника для визначення прискорення вільного падіння  $g$  ґрунтується на властивості спряженості центра коливань (точки підвісу). Ця властивість полягає в тому, що для будь-якого фізичного, а відповідно й обертвового маятника завжди можна знайти такі дві точки, що при послідовному підвішуванні маятника в тій чи іншій з них період його коливань залишається незмінним. Такі дві точки називаються спряженими, а віддаль між ними – *зведеною довжиною* фізичного маятника і позначається  $l$ . Для будь-якого фізичного маятника можна знайти безліч пар спряжених точок.

Формула, за якою визначають  $g$ , має вигляд

$$g = \frac{4\pi^2 n^2 l}{t^2}, \quad (1)$$

де  $t$  – час протягом якого маятник здійснює  $n$  повних коливань.

Отже, основна задача вправи полягає в тому, щоб знайти в маятника такі два асиметричні відносно центра мас положення осей, при коливанні біля яких час  $t$  залишався б незмінним. Тоді віддаль між цими осями дасть нам величину  $l$ .

### Хід роботи

1. Підвісивши маятник на одній з опорних призм, за допомогою секундоміра виміряйте час  $t_1$ ,  $n=20$  коливань.
2. Переверніть маятник, підвісьте його на другій опорній призмі і виміряйте час  $t_2$  повних  $n=20$  коливань.
3. Переміщенням другої опорної призми добийтеся того, щоб час  $t_2$  збігався з  $t_1$ . **Сочевиці не пересувати!**
4. Переверніть маятник у початкове положення і виміряйте час  $n=20$  коливань  $t_3$ .
5. Обчисліть похибки прямих вимірювань  $t$ .
6. Виміряйте відстань між опорними призмами  $l$  один раз і оцініть похибку одного прямого виміру.
7. За формулою (1) визначте  $g$ .
8. Обчисліть похибки непрямих вимірювань  $g$  за формулою (1).

**Вправа 2.** Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника.

**Прилади і матеріали.** Модель математичного маятника, секундомір, лінійка на штативі.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Математичний маятник – це коливна система, яка складається з матеріальної точки, прикріпленої до кінця ідеально гнучкої, невагомої й нерозтяжної нитки, другий кінець якої закріплений нерухомо. Близькою до математичного маятника системою є важка кулька, підвішена на довгій тонкій нитці. Період коливань математичного маятника визначається за формулою

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (3)$$

де  $l$  – довжина маятника. Якщо визначити періоди коливань двох математичних маятників із різною довжиною, то можна записати

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}; \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}}. \quad (4)$$

Із цих двох формул

$$g = \frac{4\pi^2 L}{|T_1^2 - T_2^2|}, \quad (5)$$

де  $L = |l_1 - l_2|$ . Таким чином, для того, щоб визначити прискорення сили тяжіння, досить знайти періоди коливань і різницю довжин двох математичних маятників.

### Хід роботи

При вимірюваннях доцільно вибирати кути відхилення  $6-8^\circ$ ,  $15 \text{ cm} \leq L \leq 20 \text{ cm}$ .

1. Визначте з допомогою секундоміра час  $t_1$ ,  $n=20$  повних коливань маятника.
2. Підніміть (чи опустіть) кульку на  $L$  см і виміряйте час  $t_2$ ,  $n=20$  повних коливань маятника.

Вимірювання проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань часу  $t_1$  і  $t_2$ . Похибка для  $L$  визначається як похибка одного прямого виміру.

3. За формулою

$$g = \frac{4\pi^2 n^2 L}{|t_1^2 - t_2^2|}. \quad (6)$$

обчислити  $g$ .

4. Похибки непрямих вимірювань обчисліть для формули (6).

### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення гармонійних коливань та запишіть рівняння, яким вони описуються. Дайте визначення власних коливань. Що таке квазіпружна сила?
3. Запишіть та поясніть закон всесвітнього тяжіння у векторній формі. Дайте визначення гравітаційного поля. Що таке напруженість та потенціал гравітаційного поля? Який їх фізичний зміст?
4. Дайте визначення математичного та фізичного маятників. Виведіть співвідношення для періодів їх коливань. Що таке центр качання та зведена довжина фізичного маятника?

5. Поясніть залежність  $g$  від широти місцевості. Що таке стан невагомості? Якою повинна бути тривалість доби, щоб тіла на екваторі були невагомі?

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.251-253, 257]; [3, с.421-422]; [2, с.200-204].
3. [2, с.302-308, с.321].
4. [1, с.166-167]; [2, с.225-229]; [3, с.421-427]; [4, с.409, 602-615].
5. [4, с.183-189, с.194-199].

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

#### Вивчення законів кінематики та динаміки на машині Атвуда

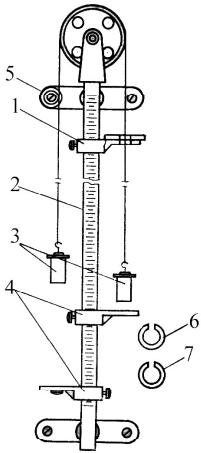


Рис. 4

**Мета роботи:** перевірка закону руху і закону зміни швидкості при рівнозмінному русі та другого закону Ньютона.

**Прилади і матеріали.** Машина Атвуда, набір тягарців.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Машина Атвуда дає змогу одержати рівномірний і рівноприскорений рух тягарців, а також виміряти проміжки часу, протягом яких тягарці проходять задані відстані в рівномірному та рівноприскореному рухах.

Машина Атвуда (рис.4) складається з вертикального стояка, на верхньому кінці якого закріплено легкий блок, що обертається з малим тертям навколо горизонтальної осі. Через блок перекинута тоненька нитка з прикріпленими до її кінців вантажами 3 однакової маси

$M$ . Вантажі можуть спиратися на платформу 4, яка переміщується вздовж стояка. На стояку нанесено шкалу 2 з сантиметровими поділками. Для фіксації обох вантажів у певному положенні і для звільнення їх у верхній частині стояка закріплено електромагніт 5. Платформа 4 суцільна, а платформа 1 має отвір, через який вільно проходить вантаж. На платформі 4 закріплено контакт, із допомогою якого можна вмикати і вимикати секундомір. Окрім вантажів 3, в комплекті установки є додаткові тягарці 6 і 7, якими користуються для приведення системи в рівноприскорений рух.

Розглянемо рух системи, що складається з пробних тіл (вантажів), маса кожного з яких  $M$ , і додаткового тягарця  $m$  відповідно. Припускаючи, що блок невагомий (натяги нитки справа і зліва від блока однакові), а нитка нерозтяжна і невагома (прискорення однакові в обох тягарців), згідно з другим законом Ньютона, можна записати таку систему рівнянь руху:

$$\text{(з тягарцем)} \quad (M + m)a = (M + m)g - T, \quad (1)$$

$$\text{(без тягарця)} \quad -Ma = Mg - T, \quad (2)$$

де  $a$  – прискорення системи,  $T$  – натяг нитки. Розв'язок рівнянь руху (1) і (2) дає величину прискорення

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

та величину сили натягу нитки

$$T = \frac{2M(M + m)}{2M + m}g. \quad (4)$$

Прискорення системи тягарців можна визначити точніше, якщо врахувати масу блока. У цьому випадку натяги нитки по обидва боки від блока будуть різними ( $T_1$  і  $T_2$ ). Рух системи тягарців опишемо такою системою рівнянь:

$$(M + m)a_1 = (M + m)g - T_2, \quad (5)$$

$$-Ma_1 = Mg - T_1, \quad (6)$$

$$I\beta = (T_2 - T_1)r, \quad (7)$$

де  $I = \alpha M_0 r^2$  – момент інерції блока,  $M_0$  – маса блока,  $r$  – радіус блока,  $\beta$  – кутове прискорення,  $\alpha$  – коефіцієнт, що характеризує

розподіл маси блока (для диска  $\alpha=1/2$ ). Якщо ковзання відсутнє, то лінійне прискорення пов'язане з кутовим так:

$$a_1 = \beta r. \quad (8)$$

Розв'язавши систему рівнянь (5), (6), (7) і (8), можна отримати значення натягів нитки  $T_1$  і  $T_2$  та прискорення

$$a_1 = \frac{m}{2M + m + \alpha M_0} g. \quad (7)$$

Як бачимо,  $a < g$  і, тим більше,  $a_1 < g$ . А сила тертя ще зменшить величину прискорення. Збільшення маси додаткового тягарця  $m$  збільшує прискорення  $a$  (чи  $a_1$ ). Якщо через деякий час зняти додатковий тягарець масою  $m$ , то прискорення стане  $a=0$  ( $a_1=0$ ): рух стає рівномірним із швидкістю  $v=\text{const}$ , що дорівнює швидкості рівноприскореного руху в момент зняття тягарця масою  $m$ .

Вимірювання носять наближений характер через наявність сили тертя, яку можна скомпенсувати або виміряти її величину та врахувати при обчисленнях.

#### Хід роботи

Перед проведенням дослідів необхідно: 1) встановити прилад точно вертикально і провести тарування основних вантажів для компенсації сили тертя в блоці (при відсутності тягарців основні вантажі повинні бути у стані байдужої рівноваги); 2) встановити правий вантаж разом із додатковим так, щоб нижній край його збігався із нульовою позначкою на лінійці; 3) перевірити роботу секундоміра.

**Вправа 1.** Перевірка закону рівноприскореного руху  $S = \frac{at^2}{2}$ .

1. Покладіть на правий вантаж обидва додаткові тягарці (у нашому випадку маса тягарців  $m=12+6,5$  (г)), увімкніть струм у колі електромагніту і встановіть систему так, щоб вона утримувалась за допомогою електромагніту в стані спокою.

2. Суцільну платформу 4 встановіть на відстані  $S=0,3$  м від **нижньої основи** правого основного вантажу. При розмиканні електричного кола електромагніту вмикається секундомір, який зупиняється при

торканні правого вантажу 3 до суцільної платформи 4. Його покази відповідають часу руху  $t$  вантажу.

3. При постійній масі додаткових тягарців, змінюючи величини  $S_i$ , виміряйте  $t_i$ , які в усіх випадках візьміть як середнє з трьох вимірювань при фіксованих у кожному випадку  $S_i$ . Прискорення системи в усіх випадках буде однаковим, оскільки сила, яка є причиною прискореного руху системи, однакова у всіх випадках. Тому повинно виконуватись співвідношення

$$a = \frac{2S_1}{t_1^2} = \frac{2S_2}{t_2^2} = \dots = \frac{2S_n}{t_n^2},$$

яке треба перевірити.

4. Похибки прямих вимірювань обчисліть для  $S$  і  $t$  для одного із випадків.

5. Похибки опосередкованих вимірювань розрахуйте для прискорення в тому випадку, для якого обчислювались похибки прямих вимірювань  $S$  і  $t$ .

#### Вправа 2. Перевірка закону зміни швидкості $v=at$ .

1. Покладіть тягарець  $m$  на правий вантаж. Замкніть коло електромагніту. Система перебуватиме в стані рівноваги. Під вантажем закріпіть кільцеву платформу 1, ще нижче — суцільну платформу 4. Кільцеву платформу закріплюють у тих же місцях, де знаходилась суцільна платформа у вправі 1 (на віддалі 0,3; 0,4; 0,5 м від нижньої основи правого основного вантажу), оскільки час руху до кільцевої платформи в даній вправі такий самий, як і час руху до суцільної платформи у вправі 1.

2. Розмикаючи коло електромагніту, вимірюють час  $t_1$  від початку руху тягарця до удару його об суцільну платформу. Час  $t'$  від моменту зняття тягарця до моменту удару вантажу об суцільну платформу дорівнює  $t' = t_1 - t$  ( $t$  із попередньої вправи).

3. Виміряйте відстань  $S$  між платформами і висоту правого вантажу  $h$ .

4. За формулою  $v = (S - h)/t'$  знайдіть швидкість рівномірного руху вантажу між платформами. Ця швидкість дорівнює миттєвій швидкості рівноприскореного руху в момент зняття тягарців кільцевою платформою.



5. Зі зміною відстані між правим вантажем і кільцевою платформою змінюватиметься і швидкість рівномірного руху. При постійній масі тягарця прискорення системи буде сталим, тому матимемо співвідношення

$$a = \frac{v_1}{t_1} = \frac{v_2}{t_2} = \dots = \frac{v_n}{t_n},$$

яке треба перевірити. Проміжки часу  $t_i$  визначте як середнє з трьох вимірювань.

**Вправа 3.** Перевірка другого закону Ньютона.

1. Якщо перекласти тягарець із правого вантажу на лівий, змінюється результуюча зовнішня сила, прикладена до системи, і водночас прискорення руху системи. **Маса системи при цьому залишається сталою.** Для двох різних випадків

$$a_1 = \frac{F_1}{M} \quad a_2 = \frac{F_2}{M}$$

маємо

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}. \quad (10)$$

Відношення прискорень можна знайти із законів рівноприскореного руху записаних для двох випадків

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2}. \quad (11)$$

Підставляючи (11) у (10), одержимо

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2}. \quad (12)$$

Це співвідношення треба перевірити.

1. Поклавши на правий вантаж тягарець масою 12 г, а на лівий – 6,5 г, замкніть коло електромагніту. Зовнішня сила  $F_1$ , прикладена до системи, дорівнює різниці ваг правого і лівого тягарців. На певній відстані  $S_1$  від правого вантажу закріпіть суцільну платформу 4.

3. Розмикаючи коло електромагніту, секундоміром виміряйте час  $t_1$

від початку руху системи до удару правого вантажу об суцільну платформу. Проміжки часу  $t_1$  визначте як середнє з трьох вимірювань.

4. Покладіть обидва тягарці (12 г + 6,5 г) на правий вантаж.  $F_2$  дорівнює сумі ваг обох тягарців.

5. Виміряйте час від початку руху системи до удару об суцільну платформу для сили  $F_2$ , встановивши суцільну платформу на відстані  $S_2$  від правого вантажу.

6. Перевірте співвідношення (12).

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Які існують способи опису руху? У чому їх суть?
3. Дайте визначення вектора середньої швидкості, миттєвої швидкості. Доведіть, що вектор швидкості напрямлений по дотичній до траєкторії.
4. Як графічно зображаються залежності прискорення, швидкості, шляху від часу у випадках рівномірного, рівноприскореного та рівносповільненого рухів?
5. Дайте визначення та запишіть співвідношення для векторів середнього та миттєвого прискорень. Як і чому напрямлені вектори нормального і тангенційного прискорень відносно траєкторії? Як вони впливають на швидкість? Як визначаються напрямки та величина повного прискорення?
6. Дайте визначення сили. Поясніть, як сила пов'язана з рухом? Чому співвідношення  $F = ma$  не можна розглядати як визначення сили? Дайте визначення імпульсу (кількості руху). Сформулюйте та запишіть другий закон Ньютона в диференційній формі.

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.38-40].
3. [1, с.40-41].
5. [1, с.41-43]; [2, с.32-44].
6. [1, с.95-99]; [3, с.51-52, с.66-67].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Визначення густини твердих тіл методом пікнометра і гідростатичного зважування

**Мета роботи:** оволодіти методикою визначення густини твердих тіл.

**Прилади і матеріали.** Аналітичні терези; терези для гідростатичного зважування; дистильована вода; шматочки твердого тіла; термометр; фільтрувальний папір; тонкі дротини; різноважки; скляний циліндр; пікнометр.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Густиною тіла називається фізична величина, яка дорівнює відношенню маси тіла  $m$  до його об'єму  $V$

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Вираз (1) справедливий тільки для однорідних тіл. У неоднорідного тіла густина різних його ділянок різна. У цьому випадку, щоб визначити густина тіла в якійсь точці, її оточують замкнутою поверхнею, що обмежує деякий об'єм тіла  $\Delta V$ . Позначимо через  $\Delta m$  масу речовини в об'ємі  $\Delta V$ . Переходячи до границі

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}, \quad (2)$$

дістанемо значення істинної густини тіла. Потрібно відзначити, що у цьому випадку величини  $\Delta m$  і  $\Delta V$  не можна брати як завгодно малими. Об'єм повинен бути макроскопічних розмірів, тобто містити в собі велику кількість молекул.

**Вправа 1.** Визначення густини твердого тіла пікнометричним методом.

1. **Пікнометричний метод** визначення густини твердих тіл один із найточніших (до  $1 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>). Пікнометри — це невеликі посудини (мірні колби) різної форми і об'єму (від 1 до 100 см<sup>3</sup>). Досить поширені скляні пікнометри з круговою міткою на шийці, що закриваються глухою пробкою (рис. 5 а, б). Пікнометр

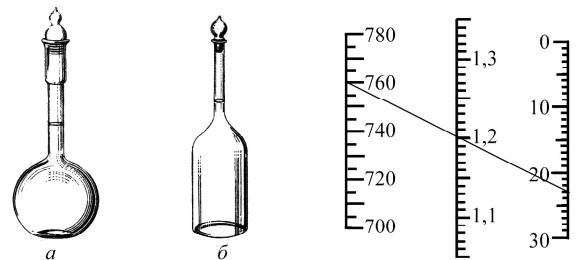


Рис. 5

Рис. 6

заповнюється рідиною до мітки.

Нехай  $M$  – маса тіла, густину якого треба визначити. Позначимо через  $M_1$  – масу пікнометра, наповненого водою до мітки. Коли в пікнометр із дистильованою водою занурити тіло, то рівень води в ньому збільшиться, а маса буде дорівнювати  $(M + M_1)$ . Відібравши воду до мітки і зваживши пікнометр, дістанемо масу пікнометра з тілом і водою –  $M_3$ . Тоді об'єм води, який дорівнює об'єму тіла

$$V = \frac{(M + M_1) - M_3}{\rho_{\text{в}}}, \quad (3)$$

де  $(M + M_1) - M_3$  – маса вибраної з пікнометра води,  $\rho_{\text{в}}$  – густина води, значення якої при даній температурі береться з таблиць. Підставивши (3) в (1), отримаємо для тіла невиправлену густина, тобто густина, визначену без урахування дії сили Архімеда в повітрі

$$\rho'_T = \frac{M \rho_{\text{в}}}{(M + M_1) - M_3}. \quad (4)$$

Виправлену густина тіла одержимо з таких міркувань. Позначимо через  $V$  – об'єм досліджуваного тіла, через  $\rho_T$  – його істинну густина,  $\rho_{\text{п}}$  – густина повітря, значення якої при даному тиску і температурі визначається за номограмою (рис.6). Наприклад, при температурі 23°C і тиску 760 мм рт ст, густина сухого повітря дорівнює 1,2 г/л = 0,0012 г/см<sup>3</sup>. Позначимо через  $\rho_1$  – густина різноважок. Тоді  $V \rho_T =$

істинна маса досліджуваного тіла;  $V\rho_b$  – істинна маса витісненої води;  $V\rho_n$  – маса повітря, витісненого тілом;  $\rho_n \frac{M}{\rho_1}$  – маса повітря, витісненого різноважками, які зрівноважують тіло;  $\frac{M + M_1 - M_3}{\rho_1}$  – маса повітря, витісненого різноважками, що зрівноважують воду. Отже, для тіла можемо записати:

$$V(\rho_T - \rho_n) = M \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_1} \right). \quad (5)$$

Для води відповідно одержимо

$$V(\rho_b - \rho_n) = (M + M_1 - M_3) \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_1} \right). \quad (6)$$

Розділивши почленно рівняння (5) на (6), одержимо робочу формулу для визначення істинної густини твердого тіла

$$\rho_T = \frac{M(\rho_b - \rho_n)}{M + M_1 - M_3} + \rho_n. \quad (7)$$

#### Хід роботи

1. Перевірте, чи проходять шматочки твердого тіла в пікнометр. Визначте їх масу  $M$  (без поправки на втрату ваги в повітрі).
2. Промийте пікнометр дистильованою водою, просушіть та охолодіть. Наповніть його дистильованою водою точно до мітки, для чого зайву воду над міткою виберіть фільтрувальним папером, а також осушіть пікнометр ззовні. Визначте масу пікнометра з водою  $M_1$ .
3. Занурте в пікнометр зважені шматочки твердого тіла і відберіть надлишок води до мітки за допомогою фільтрувального паперу. Визначте масу пікнометра із залишком води і твердим тілом  $M_3$ .
4. Вимірювання мас проведіть не менше трьох разів. Зважування потрібно проводити за всіма правилами точного зважування.

5. Визначте і запишіть значення  $\rho_n$  і  $\rho_b$ .
6. За формулою (7) обчисліть густину досліджуваного тіла.
7. Обчисліть похибки непрямих вимірювань за формулою (7).

**Вправа 2.** Визначення густини твердого тіла гідростатичним зважуванням.

Суть гідростатичного зважування полягає в тому, що тіло спочатку зважують у повітрі, а потім у рідині, густина якої відома. Такою рідиною, в основному, є дистильована вода, густину якої досить точно досліджено. Нехай  $m$  – маса досліджуваного тіла в повітрі. Підвісивши його на тонкій дротині за гачок лівої шальки терезів і зрівноваживши їх, дістанемо масу тіла з дротиною  $m_1$ . Позначимо масу тіла з дротиною при зануренні у воду через  $m_2$ . Таким чином, маса води, яка витіснена тілом, буде  $m_3 = m_1 - m_2$ . Знаючи масу води  $m_3$  і її густину  $\rho_b$  при даній температурі (із таблиць), можна знайти її об'єм, який дорівнює об'єму тіла

$$V = \frac{m_3}{\rho_b}. \quad (8)$$

Підставляючи (8) в (1), одержимо невиправлену густину тіла

$$\rho'_T = \frac{m}{m_3} \rho_b, \quad (9)$$

значення якої повинно бути виправлене, оскільки при розрахунках до уваги не взято втрату ваги тіла і води в повітрі. Якщо при температурі зважування густина води  $\rho_b$ , густина повітря  $\rho_n$ , то, згідно з (9), для виправленого значення густини тіла  $\rho_T$  маємо

$$\rho_T = \frac{m + V\rho_n}{m_3 + V\rho_n} \rho_b, \quad (10)$$

де  $V$  – об'єм тіла, що дорівнює об'єму витісненої ним води. Величина цього об'єму визначається з рівняння

$$V = \frac{m_3}{\rho_b - \rho_n}. \quad (11)$$

Підставляючи значення  $V$  із (11) в (10), одержимо робочу формулу для визначення істинної густини тіла

$$\rho_T = \frac{m}{m_3}(\rho_B - \rho_n) + \rho_n. \quad (12)$$

Поправкою на втрати ваги дротини у воді можна знехтувати.

#### Хід роботи

1. Визначте масу  $m$  досліджуваного тіла в повітрі з точністю до 0,1 мг, а також масу цього ж тіла з дротиною  $m_1$ , підвісивши його на тонкій дротині за гачок лівої шальки терезів.
2. Знайдіть масу тіла  $m_2$ , зануреного у воду. Для цього на підставку над шалькою терезів поставте скляний циліндр з дистильованою водою і при закритому аретирі занурте у нього досліджуване тіло так, щоб воно не торкалося ні дна, ні стінок циліндра. На поверхні тіла не повинно бути бульбашок повітря, а дротину рекомендується занурювати в рідину до 15 мм.

Усі вимірювання проведіть не менше трьох разів. Визначення мас проводьте за усіма правилами точного зважування.

3. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
4. Визначте і запишіть значення  $\rho_B$  і  $\rho_n$ .
5. За формулою (12) обчисліть густину твердого тіла.
6. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Що таке вага тіла? У чому принципова різниця зважування на пружинних та важільних терезах? Які джерела похибок важільних терезів? Як можна підвищити їхню чутливість?
3. Які Ви знаєте методи точного зважування? У чому їх переваги і недоліки?
4. Які основні джерела похибок при вимірюванні густини твердих тіл пікнометричним методом та гідростатичним зважуванням?
5. Поясніть вплив обертального руху Землі на вагу тіла. Виведіть співвідношення, що показує залежність ваги тіла від географічної широти.
6. Що таке стан невагомості? Який фізичний фактор зумовлює виникнення стану невагомості? Що таке гравітаційна та інертна маси? У чому суть принципу еквівалентності?

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-4. [8, с. 63-78]; [9], с.47-62.
3. [4, с.183-189; с.194-199].
4. [1, с.144-145].

#### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

#### Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідини методом Стокса

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт динамічної в'язкості гліцерину.

**Прилади і матеріали.** Скляний циліндр із гліцерином; металеві кульки з відомого матеріалу; мікрометр; секундомір; рулетка.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** В'язкістю називається властивість рідини або газу чинити опір при відносному зміщенні їх шарів. У потоках реальних рідин і поблизу змочуваних твердих тіл різні шари рідини мають різні швидкості. Шар рідини або газу, який "налипає" на поверхню твердого тіла, має відносно цієї поверхні швидкість, яка дорівнює нулеві. У міру віддалення від поверхні твердого тіла відносна швидкість шарів рідини збільшується. Інакше кажучи, в таких потоках спостерігається рух одних шарів відносно інших (у напрямі, перпендикулярному до потоку, існує градієнт швидкості, який показує зміну швидкості в залежності від відстані між шарами). Сила в'язкості рідин і газів при їх ламінарній течії визначається законом Ньютона

$$F = \eta \frac{dv}{dz} S,$$

де  $F$  – сила в'язкості;  $S$  – площа поверхні внутрішнього шару, на яку розраховується сила внутрішнього тертя;  $\frac{dv}{dz}$  – градієнт швидкості;  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.

В'язкість рідин зумовлена рухливістю окремих молекул або атомів, на відміну від газів, для яких внутрішнє тертя є результатом хаотичного руху молекул.

Одним із широко використовуваних методів визначення  $\eta$  рідин є метод Стокса, який ґрунтується на вимірюванні швидкості рівномірного руху тіла сферичної форми (кульки) в досліджуваній рідині. За законом Стокса, сила в'язкості рідини  $F$  пропорційна коефіцієнту в'язкості, радіусу кульки  $r$  і швидкості її руху  $v$ :

$$F = 6\pi\eta r v. \quad (1)$$

При падінні кульки в рідині ця сила спочатку зростає. Потім при зрівноваженні сили в'язкості  $F$ , архімедової сили  $F_A$  та сили тяжіння  $mg$  ( $mg = F + F_A$ ) рух кульки стає рівномірним. Підставивши значення цих сил, отримаємо

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g + 6\pi\eta r v,$$

звідки

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_1}{v} g r^2, \quad (2)$$

де  $\rho$  і  $\rho_1$  – густини відповідно кульки і досліджуваної рідини.

Формули (1) і (2) справедливі для випадку твердої кульки, яка рухається рівномірно без обертання при відсутності турбулентності і якщо рідина гідродинамічно нестислива, однорідна і має необмежену протяжність у всіх напрямках.

У даній роботі використовується скляний циліндр, внутрішній радіус якого  $R=24$  мм, наповнений досліджуваною рідиною (гліцерином). Стінки циліндра обмежують рідину. На циліндрі зроблено дві кільцеві позначки. Верхня відмічає початок рівномірного руху кульки, а нижня відмежує дію дна посудини.

Швидкість рівномірного руху кульки в рідині можна визначити за формулою

$$v = \frac{l}{t}, \quad (3)$$

де  $l$  – відстань між позначками,  $t$  – час руху кульки між позначками.

Ураховуючи вплив стінок циліндра, формулу (3) і виразивши радіус кульки через її діаметр, формулу (2) можна переписати у вигляді:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_1) R t}{18l(R + 1,2d)} g d^2. \quad (4)$$

### Хід роботи

1. Встановіть циліндр із досліджуваною рідиною вертикально і розмістіть його так, щоб крізь нього проходило світло. Тоді можна добре бачити кульку, що падає.
2. Виміряйте мікрометром діаметр кульки.
3. Рулеткою виміряйте відстань між позначками на циліндрі.
4. Розрахуйте похибки прямих вимірювань діаметра кульки і відстані між позначками.
5. Зорієнтуйте кульку по осі циліндра і опустіть її в рідину. Секундоміром визначте час, протягом якого кулька проходить відстань між позначками на циліндрі. У момент проходження кулькою позначок спостерігач для усунення похибки на паралакс повинен стати так, щоб очі були на одному горизонтальному рівні з позначкою.
7. Оцініть похибку при вимірюванні часу як похибку одного прямого виміру.
8. За формулою (4) обчисліть  $\eta$ .
9. Повторіть дослід із кулькою іншого діаметра, визначте  $\eta$  і порівняйте його зі значенням, отриманим у п. 8.
10. Виведіть формули для обчислення абсолютної та відносної похибок вимірювань коефіцієнта в'язкості за формулою (4) і обчисліть ці похибки.

### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Розгляньте рух кульки у в'язкій рідині і виведіть співвідношення для визначення коефіцієнта в'язкості без урахування впливу стінок посудини.
3. Поясніть, як виникають сили сухого тертя? Яка їх природа? Що таке тертя спокою? Поясніть явища заносу і застою.
4. Дайте визначення сил рідкого тертя. Поясніть умови їх виникнення. Як сили рідкого тертя залежать від швидкості? Що таке гранична швидкість і чому вона дорівнює?
5. Який фізичний зміст коефіцієнта динамічної в'язкості? В яких одиницях він вимірюється?

### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [3, с.140-143].
3. [4, с.200-204, с.208-209]; [3, с.143-149].
4. [3, с.136-140]; [5, с.252-255].
5. [5, с.255-256].

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

#### Перевірка основного рівняння обертального руху за допомогою маятника Максвелла

**Мета роботи:** вивчити складний рух твердого тіла; перевірити основне рівняння обертального руху  $M = I\beta$ .

**Прилади і матеріали.** Маятник Максвелла; лінійка; штангенциркуль; секундомір.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Маятник Максвелла – це диск, жорстко насаджений на валик (вісь) (рис.7), який двома нитками кріпиться до верхньої поперечини прямокутної рамки. Намотуючи нитки на валик, можна перевести маятник у верхнє граничне положення і, відпустивши, спостерігати, як під дією сили

тяжіння та натягу ниток він опускається та підіймається, тобто здійснює коливання. Маятник, як тверде тіло, рухається одночасно і поступально, і обертально. Тому, щоб описати його рух, потрібно записувати рівняння як поступального, так і обертального рухів.

Рівняння поступального руху центра мас маятника має вигляд:

$$ma = mg - 2f, \quad (1)$$

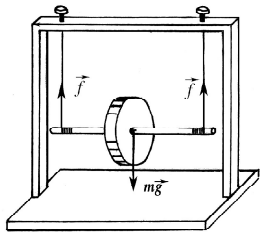


Рис. 7

де  $m$  – маса маятника ( $m = m_1 + m_2$ ,  $m_1 = 251,75$  г – маса диска,  $m_2 = 83,33$  г – маса валика),  $f$  – сила натягу нитки,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $a$  – прискорення центра мас.

Рівняння обертального руху записується у вигляді

$$M = I\beta. \quad (2)$$

де  $\beta$  – кутове прискорення маятника, яке виражається через прискорення його центра мас  $a$  і діаметр валика  $d$  співвідношенням

$$\beta = \frac{2a}{d}; \quad (3)$$

$I$  – момент інерції маятника:

$$I = \frac{1}{8}(m_1 D^2 + m_2 d^2), \quad (4)$$

де  $D$  – діаметр диска;  $M$  – момент сил натягу ниток:

$$M = 2f \frac{d}{2} = fd. \quad (5)$$

Розв'язок системи рівнянь (1), (2) і (3) дає прискорення маятника

$$a = \frac{mg}{m + 4I/d^2} \quad (6)$$

і силу натягу ниток

$$f = \frac{mg}{2(1 + md^2/4I)}. \quad (7)$$

Прискорення, одержане за формулою динаміки (6), можна перевірити за формулою кінематики

$$a = \frac{2H}{t^2}, \quad (8)$$

де  $H$  – відстань між верхнім і нижнім граничними положеннями осі валика,  $t$  – час руху маятника між цими положеннями,  $a$  – прискорення центра мас маятника. Порівняння результатів обчислень за (6) і (8) дає відповідь на перше завдання, поставлене в роботі.

Прискорення не залежить від напрямку руху маятника, весь час напрямлене вниз і не змінює свого знака, а швидкість змінює знак у момент проходження маятником нижньої “мертвої” точки.

#### Хід роботи

1. З допомогою штангенциркуля виміряйте  $D$  і  $d$ . Вимірювання проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань.
2. За формулою (4) обчисліть момент інерції маятника.
3. За формулою (6) визначте прискорення центра мас маятника.
4. Виміряйте відстань  $H$  між верхнім і нижнім положеннями осі валика та час руху  $t$  маятника між цими положеннями. Вимірювання проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань.
5. За формулою (8) знайдіть прискорення центра мас маятника і порівняйте його зі значенням, знайденим за формулою (6). Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань прискорення за формулою (8).
6. За формулою (7) знайдіть силу натягу ниток.
7. За формулою (5) обчисліть момент сил, які діють на маятник.
8. Підставте у формулу (3) прискорення центра мас, знайдене за формулою (8) і обчисліть кутове прискорення  $\beta$ .
9. Використовуючи момент інерції маятника  $I$ , знайдений у п. 2, обчисліть момент сил за формулою (2).
10. Перевірте основне рівняння обертального руху, порівнявши моменти сил, знайдені в пп. 7 і 9.

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення плоского руху. Які особливості динаміки плоского руху твердого тіла? Чому для плоского руху доцільно записувати рівняння руху та рівняння моментів відносно точки, через яку проходить центральна головна вісь, перпендикулярна до площини руху?
3. Дайте визначення моменту сили, моменту інерції, кутової швидкості, кутового прискорення.
4. Виведіть основне рівняння обертального руху системи матеріальних точок (твердого тіла) навколо нерухомої осі  $M = I\beta$ .

5. Визначте прискорення центра мас маятника Максвелла та силу натягу нитки. Поясніть рух маятника Максвелла за повний період його коливання. Чому і коли у випадку недостатньої міцності нитки вона може розірватися?

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.46-47, с.164-166].
- 3-4. [2 с.179-183, с.185-189, с.254-265]; [3, с.180-182, с.200-201, с.220-221].
5. [1 с.164-166], [3, с.210-211]; [4, с.419-429].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### Вивчення пружного удару двох куль

**Мета роботи:** визначення середньої сили зіткнення.

**Прилади і матеріали.** Установка для вивчення пружного удару двох куль; дві металеві кулі; технічні терези; різноважки; рулетка.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Прикладом застосування законів збереження енергії та імпульсу може бути явище удару. Удар – це зміна стану тіл унаслідок короткочасної їх взаємодії при зіткненні. Зіткненням називається взаємодія двох або більше матеріальних тіл, яка відбувається у відносно малій області простору протягом відносно малого проміжку часу так, що за межами цієї області простору і поза цим проміжком часу можна говорити про початкові й кінцеві стани тіл як про стани, в яких ці тіла не взаємодіють. Одним із найпростіших видів удару є центральний удар двох куль.

Центральний удар – це такий, при якому лінія удару проходить через центри куль. Лінія удару – це пряма, проведена нормально до елемента поверхні зіткнення куль у момент удару. Непружний удар спостерігається при зіткненні тіл із пластичних матеріалів або пластичного і пружного тіл. Після непружного удару швидкості тіл, що співударяються, стають однаковими, а механічна енергія

частково або повністю переходить в інші види енергії, наприклад у теплову.

Пружний удар спостерігається при взаємодії тіл, виготовлених з пружних матеріалів і відбувається у два етапи. На першому етапі сили, що діють на кульки, зростають зі збільшенням деформації. Збільшення деформації супроводжується зміною швидкості кульок. Кулька, що має більшу швидкість, сповільнюватиметься, а та, що мала меншу, прискорюватиметься. При досягненні максимальної деформації швидкості кульок дорівнюватимуть одна одній.

Із моменту, який характеризує початок другого етапу пружного удару, значення деформації зменшується. При цьому сили деформації розштовхують кульки. Після того як деформації зникнуть, кульки розійдуться повністю, відновлять свою форму і рухатимуться з різними швидкостями. Таким чином, у кінці другого етапу удару весь запас потенціальної енергії пружнодеформованих тіл знову перетворюється в кінетичну енергію.

Отже, в результаті пружного удару не відбувається перетворення механічної енергії системи взаємодіючих тіл в інші види енергії.

Середню силу удару можна знайти, скориставшись другим законом Ньютона:

$$F\tau = m\Delta v, \quad (1)$$

де  $\tau$  – це час зіткнення,  $m$  – маса однієї кульки (другу вважаємо нерухомою),  $\Delta v$  – зміна швидкості тіла, що виникла в результаті зіткнення. Із рівняння видно, що чим менший час зіткнення, тим більша сила при тій самій зміні швидкості. Під час зіткнення кулька, що рухається, повністю передає імпульс нерухомій і зупиняється.

Зміна швидкості кульки в результаті зіткнення

$$\Delta v = v - v',$$

де  $v$  – швидкість кульки до зіткнення,  $v'$  – швидкість кульки після зіткнення. Якщо кулька після зіткнення зупиняється, то  $v' = 0$  і  $\Delta v = v$ . Тоді (1) можна переписати у вигляді

$$F\tau = mv.$$

Звідси

$$F = \frac{mv}{\tau}. \quad (2)$$

30

Швидкість кульки до зіткнення можна знайти із закону збереження енергії. Відхилена на кут  $\alpha$  кулька має запас потенціальної енергії  $E_n = mgh$  (рис. 8). Ця енергія перед ударом переходить у кінетичну  $E_k = mv^2/2$ . Тоді

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (3)$$

Із рисунка  $h = L(1 - \cos \alpha) = 2L \sin^2 \frac{\alpha}{2}$ . Підставивши  $h$  в (3), маємо

$$v = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{gL}. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (2), отримаємо

$$F = 2m \frac{\sqrt{gL}}{\tau} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (5)$$

#### Хід роботи

1. На терезах визначте масу кульки  $m$  і оцініть похибку одного прямого виміру.
2. Рулеткою виміряйте відстань  $L$  від точки підвісу до центра кульки і оцініть похибку одного прямого виміру.

**Увага! Після увімкнення приладу кульок торкатися тільки ізольованими предметами!**

3. Увімкніть прилад в електричну мережу. Натисніть кнопку “Сеть”. Праву кульку відхиліть до магніта, ліву – встановіть в положення рівноваги.

4. Виміряйте кут відхилення і оцініть похибку одного прямого виміру.

5. Натисніть кнопку “Пуск”.

6. Зчитайте час зіткнення  $\tau$ . Для повторних вимірів натисніть кнопку “Сброс”, відпустіть кнопку “Пуск”, піднесіть кульку до магніта, натисніть кнопку “Пуск” і зчитайте час зіткнення.

7. Вимірювання часу зіткнення проведіть не менше трьох разів і

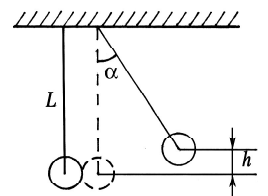


Рис.8

31



обчисліть похибки прямих вимірювань.

8. За формулою (5) знайдіть середню силу удару та обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.

### Контрольні запитання і завдання

- Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
- Дайте визначення зіткнення як фізичного явища. Сформулюйте та запишіть закони збереження імпульсу, момента імпульсу, енергії для зіткнень.
- Дайте визначення пружного і непружного зіткнень.
- Чому сила, яка виникає при зіткненні двох сталевих кульок у даній роботі, дуже велика? Вважаючи зіткнення кульок лобовим (центральною ударом), а маси кульок однаковими, доведіть, що вся енергія від кульки, що рухається, передається нерухомій кульці.
- Дайте визначення роботи сили. Доведіть, що робота сили дорівнює приросту кінетичної енергії.
- Дайте визначення потенціальних сили. Запишіть критерій потенціальності поля. Дайте визначення енергії тіла в полі потенціальних сил. Доведіть, що робота потенціальних сил дорівнює від'ємному приросту потенціальної енергії.
- Сформулюйте закон збереження енергії в механіці.

### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-4. [1, с.199-205, 208-209]; [2, с.160-165]; [3, с.117-126].
5. [2, с.132-138]; [4, с.140-143].
- 6-7. [1, с.119-134]; [4, с.143-149].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### Експериментальна перевірка теореми Гюйгенса-Штейнера

**Мета роботи:** перевірити теорему Гюйгенса-Штейнера.

**Прилади і матеріали.** Установка (стержень, диск, металева дротина); технічні терези; різноважки; штангенциркуль; секундомір.

32

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Установка (рис.9) складається з вертикального кронштейна 1, стержня 2 із двома опорними призмами та центральним отвором з різьбою; диска 3 із втулкою, в якій є отвір із різьбою; пружної сталеві дротини 4, до якої почергово можуть кріпитися в нижній частині стержень або диск. Лопатка 5 має поперечний паз на обох частинах, в якій вставляється ребро призми стержня.

Теорема Штейнера стверджує, що

$$I_1 = I_2 + ma^2, \quad (1)$$

де  $I_1$  – момент інерції тіла масою  $m$  відносно довільної осі  $O_1$ ;  $I_2$  – момент інерції цього ж тіла відносно осі  $O_2$ , яка проходить через центр мас ( $O_1 \perp O_2$ );  $a$  – віддаль між осями. Ідея досліду полягає в тому, щоб знайти момент інерції стержня відносно осі, що проходить через один із його кінців  $I_1$ , потім знайти момент інерції цього ж стержня відносно осі, що проходить через центр мас (через середину стержня)  $I_2$ , та перевірити формулу (1).

Використовуючи формулу для періоду коливань фізичного маятника,

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{mga}}, \quad (2)$$

визначаємо момент інерції стержня відносно осі, що проходить через один з його кінців

$$I_1 = \frac{mgaT_1^2}{4\pi^2} = \frac{mga t_1^2}{4\pi^2 n_1^2}, \quad (3)$$

де використано те, що

$$T_1 = t_1 / n_1,$$

де  $t_1$  – час, протягом якого стержень здійснює  $n_1$  коливань.

33

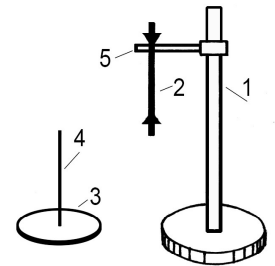


Рис. 9

Момент інерції  $I_2$  стержня знаходимо з формули для періоду крутильних коливань

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{f}}, \quad (4)$$

де  $f$  – крутильний момент підвісу (дротини). Оскільки крутильний момент дротини невідомий, його вилучають із формули (4) за допомогою іншого тіла (диска) з відомим моментом інерції, яке підвішують на ту ж саму нитку. Момент інерції диска відносно осі, яка проходить через центр мас і перпендикулярна до площини диска, визначається за формулою

$$I_0 = \frac{1}{8} m_0 D_0^2, \quad (5)$$

де  $m_0$  – маса диска,  $D_0$  – його діаметр. Період коливань диска

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{f}}. \quad (6)$$

Із (4) і (6) одержуємо

$$I_2 = I_0 \frac{T_2^2}{T_0^2}. \quad (7)$$

Ураховуючи, що  $T_0 = t_0/n$ ,  $T_2 = t_2/n$ , де  $t_0$  і  $t_2$  – це час, протягом якого диск і стержень відповідно здійснюють  $n$  коливань, та формулу (5), для моменту інерції стержня відносно осі, що проходить через центр мас, одержимо:

$$I_2 = \frac{1}{8} m_0 D_0^2 \frac{t_2^2}{t_0^2}. \quad (8)$$

#### Хід роботи

1. За допомогою терезів визначте маси стержня  $m$  та диска  $m_0$  та обчисліть систематичну похибку.
2. Лінійкою виміряйте відстань  $a$  між ребром однієї з призм та його серединою. Для знаходження  $a$  доцільно виміряти відстань між ребрами опорних призм та взяти її половину. Оцініть систематичну похибку.

3. Штангенциркулем виміряйте діаметр диска  $D_0$ .
  4. Закріпіть стержень на металевій дротині за середину гвинтами. Визначте час  $t_2$  повних  $n=10$  коливань.
  5. Закріпіть на металевій дротині диск і визначте час  $t_0$  повних  $n=10$  коливань.
  6. Встановіть ребро призми стержня в паз лопатки і виміряйте час  $t_1$  повних  $n_1=20$  коливань.
- Усі вимірювання виконайте не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань.
7. За формулою (8) визначте момент інерції  $I_2$ . Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.
  8. За формулою (3) визначте момент інерції  $I_1$ .
  9. Підставте отримані значення  $I_1, I_2, a$  та  $m$  у формулу (1) і перевірте теорему Гюйгенса - Штейнера.

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення моменту інерції твердого тіла відносно нерухомої осі. Яка його аналогія з масою?
3. Яка особливість обертання твердого тіла навколо осі, що закріплена в одній точці? Що таке тензор інерції? Дайте характеристику тензора інерції.
4. Запишіть вирази для осьових та відцентрових моментів інерції.
5. Що таке головні (вільні) осі обертання?
6. Дайте фізичне пояснення діагоналізації тензора інерції. Який вигляд має діагоналізований тензор інерції? Що таке центральні головні осі тензора інерції?
7. Виведіть вираз для моменту інерції суцільного однорідного циліндра відносно осі, яка проходить через середини основ паралельно твірній.
8. Запишіть вирази для моментів інерції простих тіл: суцільного однорідного циліндра, конуса, кулі, диска, пустотілого циліндра, тонкого однорідного стержня відносно осі, яка проходить через середину стержня перпендикулярно до нього.
9. Сформулюйте теорему Гюйгенса-Штейнера. Визначте момент інерції тонкого однорідного стержня відносно осі, яка проходить через край стержня.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про роботу.  
2-9. [1, с.156-162]; [2, с.320-329]; [3, с.211-215].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

### Вивчення коливань струни

**Мета роботи:** визначення лінійної густини матеріалу струни.

**Прилади і матеріали.** Звуковий генератор; прилад для вивчення коливань струни; рулетка; аналітичні терези; набір тягарців.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Струна являє собою одновимірне пружне середовище. Якщо натягнути між двома точками струну вивести з положення рівноваги, то вона здійснюватиме коливання різного роду. Процес поширення коливань у пружному середовищі називається хвилею. Хвиля поширюється в струні, відбивається від її кінців (місць закріплення струни) і, внаслідок накладання падаючої й відбитої хвиль, у струні встановлюються стоячі хвилі, причому в місцях закріплення струни завжди спостерігається утворення вузлів.

На довжині  $l$  струни завжди вкладається ціле число півхвиль біжучої хвилі

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

Тому спостерігається  $n$  пучностей (рис.11).

Між основними характеристиками хвильового процесу, тобто між частотою  $\nu$ , довжиною хвилі  $\lambda$  та швидкістю розповсюдження  $v$  є функціональний зв'язок, а саме:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (2)$$

Підставивши (2) в (1), маємо

$$\nu = \frac{n}{2l} v. \quad (3)$$

36

Отже, струна може коливатися не з однією частотою, а з цілим спектром частот.

Дослід показує, що швидкість поширення імпульсів уздовж струни пов'язана із силою натягу струни  $P$  та лінійною густиною матеріалу струни  $\rho$ :

$$v = \Phi(P, \rho). \quad (4)$$

Ця залежність може бути розкрита з допомогою аналізу розмірностей. Нехай

$$v = \Phi(P, \rho) = P^m \rho^n, \quad (5)$$

$[v]=LT^{-1}$ ;  $[P]=MLT^{-2}$ ;  $[\rho]=ML^{-1}$ , де  $M$ ,  $L$  і  $T$  – розмірності маси, довжини та часу відповідно. Отже,  $LT^{-1} = (MLT^{-2})^m (ML^{-1})^n$ . Прирівнявши показники степенів відповідних величин лівої і правої частин, маємо  $m-n=1$ ;  $m+n=0$ . Звідси  $m=0,5$ ;  $n=-0,5$ . Тоді з (5)

$$v = \sqrt{\frac{P}{\rho}}. \quad (6)$$

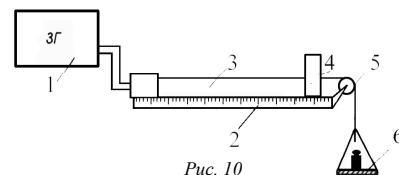
Підставляючи (6) в (3), отримаємо

$$\nu = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{P}{\rho}}, \quad (7)$$

звідки лінійна густина

$$\rho = \frac{n^2 P}{4l^2 \nu^2}. \quad (8)$$

Установка має вигляд, зображений на рис. 10. На підставці 2 натягнуто струну 3. Один кінець струни закріплено. По струні пропускається струм певної частоти від звукового генератора 1. Сама струна поміщається між полюсами постійного магніту 4. Завдяки цьому на струну діє періодична сила і збуджує в ній коливання. До другого кінця струни, що перекинута через блок 5, прикріп-



37

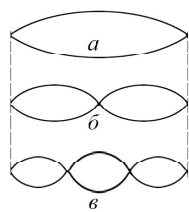


Рис. 11

лено шальку 6 для тягарців, вага яких визначає силу натягу струни. Розподіл амплітуд окремих точок для різних значень  $n$  зображено нарис. 11.

#### Хід роботи

1. Виміряйте за допомогою рулетки довжину струни  $l$ .
2. Повільно збільшуючи частоту звукового генератора, добийтеся стійких коливань струни при  $n=1$ .
3. Зчитайте покази частоти з генератора і, знаючи вагу тягарців та довжину струни  $l$ , за формулою (8) знайдіть лінійну густину струни.
4. Добийтеся стійких коливань при  $n=2$  і  $n=3$  і виконайте п.3.
5. З допомогою терезів знайдіть масу зразка такої ж струни  $m$ , виміряйте його довжину  $l_1$  і обчисліть лінійну густину за формулою

$$\rho = \frac{m}{l_1}. \quad (9)$$

Порівняйте значення, отримані за формулами (8) і (9).

6. Оцініть систематичні похибки прямих вимірювань величин  $m$ ,  $l$ ,  $v$ . Похибки опосередкованих вимірювань густини обчисліть за формулою (8) для одного зі значень  $n$ .

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Що таке стояча хвиля?
3. Виведіть рівняння стоячої хвилі і поясніть його.
4. Що називається вузлом (пучністю) стоячої хвилі? Виведіть формули для координат вузлів та пучностей.
5. У чому полягає метод розмірностей? Виведіть робочу формулу з допомогою методу розмірностей.

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-4. [4, с.699]; [3, с.488-491].
5. [2, с.466-473], інструкція до лабораторної роботи.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

### Перевірка рівняння Бернуллі

**Мета роботи:** дослідна перевірка рівняння Бернуллі для стаціонарного потоку ідеальної рідини.

**Прилади і матеріали.** Трубка змінного перерізу; U-подібний ртутний манометр; секундомір; мірна посудина.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Рівняння Бернуллі для стаціонарного ламінарного потоку ідеальної рідини, віднесене до одиниці об'єму для довільних перерізів трубки струмини, має такий вигляд:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + P_2. \quad (1)$$

Тобто для довільного перерізу сума динамічного, гідростатичного та статичного тисків є сталою величиною. При русі рідини по горизонтальній трубці змінного поперечного перерізу незмінною залишається сума динамічного та статичного тисків, тобто

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + P_2. \quad (2)$$

Оскільки в трубці змінного поперечного перерізу швидкість руху рідини більша там, де площа поперечного перерізу менша, що впливає з рівняння неперервності потоку

$$v_1 S_1 = v_2 S_2, \quad (3)$$

то при переході рідини з широкішої частини трубки у вузьку збільшення швидкості, як це видно із (2), супроводжується зменшенням тиску:

$$\frac{\rho(v_2^2 - v_1^2)}{2} = P_1 - P_2. \quad (4)$$

Рівняння нерозривності (3) для випадку круглого поперечного перерізу можна записати також через діаметри  $d_1$  і  $d_2$  поперечних перерізів, що розглядаються:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}. \quad (5)$$

Тоді, урахувавши співвідношення (4) і (5) і той факт, що різниця статичних тисків вимірюється ртутним манометром  $P_1 - P_2 = (\rho_{Hg} - \rho)gh$ , швидкість рідини в перерізі 2 можна виразити через відношення діаметрів поперечних перерізів, що розглядаються, густину рідини  $\rho$ , ртуті  $\rho_{Hg}$  та різницю рівнів ртуті  $h$  у манометрі:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - (v_1/v_2)^2}} = \sqrt{\frac{2(\rho_{Hg} - \rho)gh}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - (d_2/d_1)^4}} \cdot (6)$$

Швидкість  $v_2$ , визначену за рівнянням Бернуллі, можна порівняти зі значенням швидкості  $v'_2$  для того самого поперечного перерізу, визначену експериментально за об'ємом рідини  $V$ , яка протекла за час  $\tau$ .

$$v'_2 = \frac{V}{S_2 \tau} = \frac{4V}{\pi d_2^2 \tau} \cdot (7)$$

Порівняння значень швидкості, отриманих за співвідношеннями (6) і (7), і складає завдання виконуваної лабораторної роботи. Загальний вигляд експериментальної установки для перевірки рівняння Бернуллі зображений на рис.12.

#### Хід роботи

1. Встановіть трубку змінного поперечного перерізу 1 горизонтально на дерев'яному штативі 2. Один кінець трубки під'єднайте до водопровідного крану, а від іншого відведіть шланг у раковину для зливу води.
2. Повільно відкручуючи кран, встановити стаціонарну течію води в трубці. Виміряйте різницю рівнів ртуті  $h$  в U-подібному манометрі.
3. Не змінюючи напору води, увімкніть секундомір і визначте час  $\tau$ , за який у мірну посудину набереться заданий об'єм  $V$  води.
4. Обчисліть швидкість потоку  $v_2$  у вузькій частині трубки за формулою (6).
5. За співвідношенням (7) обчисліть швидкість потоку води у вузькій частині трубки  $v'_2$ . Порівняйте отримані значення швидкостей.
6. Обчисліть число Рейнольдса для потоку води у вузькому перерізі

трубки за формулою

$$Re = \frac{\rho d_2}{2\eta} v'_2$$

де  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості води, та вказати характер течії (при  $Re < 2300$  – течія ламінарна, при  $Re \geq 2300$  – турбулентна).

7. Проведіть три досліди для різних значень  $h$  згідно з пп. 2–6.

8. Визначте похибки опосередкованих вимірювань швидкості за формулами (6) і (7) для одного з дослідів.

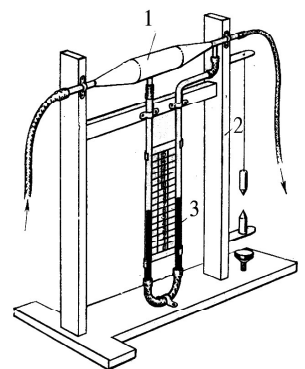


Рис. 12

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення основних понять кінематичного опису рідини: ідеальна рідина, стаціонарна течія рідини, лінія струмину, трубка струмину, поле вектора швидкості.
3. Дайте визначення ламінарного та турбулентного руху рідини (газу). Що таке число Рейнольдса? Який його фізичний зміст? У чому відмінність між динамічною та кінематичною в'язкістю рідини (газу)?
4. Виведіть рівняння Бернуллі.
5. Сформулюйте закон Бернуллі. Який фізичний зміст цього рівняння?
6. Виведіть формулу Торічеллі.

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [5, с.246-248]; [2, с.498-500]; [4, с.529-532]; [3, с.346-350].
3. [5, с.255-256].
- 4-5. [2, с.500-507]; [4, с.532-538]; [5, с.248-250]; [3, с.354-356].
6. [2, с.507-508]; [4, с.538-541]; [5, с.250-251]; [3, с.356-359].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

### Визначення моменту інерції тіла методом трифілярного підвісу

**Мета роботи:** експериментальне визначення моментів інерції тіл довільної форми та перевірка теореми Гюйгенса-Штейнера.

**Прилади і матеріали.** Трифілярний підвіс; штангенциркуль; секундомір; лінійка; зразки для вимірювання.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Трифілярний підвіс являє собою круглу плоску платформу масою  $m$ , радіусом  $R$ , підвішену на трьох симетрично розміщених по вершинах рівностороннього трикутника нитках, прикріплених верхніми кінцями до невеликого диска радіусом  $r$ . Трифілярний підвіс кріпиться до спеціального кронштейна – підставки. Платформа може здійснювати крутильні коливання навколо вертикальної осі, яка перпендикулярна до її площини і проходить через її середину. Центр мас при коливаннях переміщується вгору і вниз уздовж осі обертання. Період коливань залежить від моменту інерції платформи. Якщо навантажити платформу будь-яким тягарцем, то момент інерції, а відповідно, і період коливань зміниться.

Гармонічними крутильними коливаннями тіла називається періодичний рух відносно осі, яка проходить через центр мас тіла. Тоді кут відхилення від положення рівноваги змінюється за законом синуса або косинуса. Наприклад:

$$\alpha = \alpha_0 \sin \frac{2\pi}{T} t . \quad (1)$$

Моменти інерції різних тіл можуть бути виміряні методом крутильних коливань за допомогою вищеописаної установки.

Нехай при обертанні диск піднявся на висоту  $h = h_1 - h_2$  (рис.13). Тоді його потенціальна енергія буде

$$E_n = mgh . \quad (2)$$

При обертанні диска в другий бік потенціальна енергія переходить у кінетичну енергію обертального руху

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 . \quad (3)$$

У момент проходження положення рівноваги кінетична енергія набуває максимального значення. Нехтуючи тертям, згідно із законом збереження енергії, можна записати,

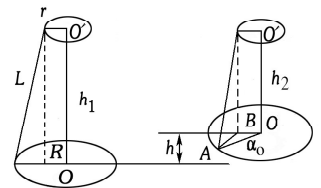


Рис. 13

$$mgh = \frac{1}{2} I \omega_0^2 . \quad (4)$$

Кутова швидкість дорівнює похідній від кутового переміщення (1):

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi}{T} \alpha_0 \cos \frac{2\pi}{T} t . \quad (5)$$

Очевидно, що кутова швидкість у момент  $t = 0$  дорівнює

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \alpha_0 . \quad (6)$$

Знайдемо величину  $h$  при повороті диска на кут  $\alpha_0$ , вважаючи, що  $h_1 + h_2 \approx 2L$ :

$$h = h_1 - h_2 = \frac{h_1^2 - h_2^2}{h_1 + h_2} \approx \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} . \quad (7)$$

Із рис. 13 видно, що  $h_1^2 = L^2 - (R-r)^2$  і

$$h_2^2 = L^2 - (AB)^2 = (R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha_0) . \quad (8)$$

Підставивши значення  $h_1^2$  і  $h_2^2$  у (7), одержимо

$$h = \frac{2Rr(1 - \cos \alpha_0)}{2L} = \frac{4Rr \sin^2(\alpha_0/2)}{2L} . \quad (9)$$

Оскільки кут  $\alpha_0$  дуже малий, то  $\sin(\alpha_0/2) \approx \alpha_0/2$ . Тоді

$$h = \frac{Rr\alpha_0^2}{2L}. \quad (10)$$

Підставивши (6) і (10) у (4), для моменту інерції одержимо:

$$I = \frac{mgRr}{4\pi^2 L} T^2. \quad (11)$$

Виразимо величини, що входять у (11), через величини, що підлягають безпосередньому вимірюванню. Так,  $r = d/2$ ;  $R = D/2$ ;  $T = t/n$ , де  $d$  – діаметр малого диска,  $D$  – діаметр платформи,  $T$  – час, протягом якого платформа здійснює  $n$  повних коливань. Тоді формула для обчислення моменту інерції трифілярного підвісу набуває остаточного вигляду

$$I = \frac{mgDd}{16\pi^2 n^2 L} t^2. \quad (12)$$

#### Хід роботи

1. З допомогою штангенциркуля і лінійки виміряйте величини  $L, D, d$ .
2. За допомогою секундоміра визначте час  $t_0$ , протягом якого порожня платформа здійснює  $n=20$  повних коливань.
3. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
4. За формулою (12) обчисліть момент інерції порожньої платформи  $I_0$ . Маса порожньої платформи  $m_0 = 250$  г.
5. Навантажте платформу тілом відомої маси  $m_1$  і визначте час  $t_1$ , протягом якого навантажена платформа здійснює  $n=20$  повних коливань.
6. За формулою (12) обчисліть момент інерції  $I_1$  системи, маса якої дорівнює сумі мас тіла і платформи ( $m = m_0 + m_1$ ).
7. За формулою  $I_2 = I_1 - I_0$  визначте момент інерції тіла з відомою масою.

У такий самий спосіб може бути визначений момент інерції тіла будь-якої маси і навіть будь-якої форми.

За допомогою трифілярного підвісу може бути перевірена теорема Гюйгенса-Штейнера. Для цього треба мати два однакових тіла (рис.14).

8. Визначте момент інерції одного тіла  $I_2$  за вищеведеними пунктами (рис. 14, а).

9. Перемістіть тіло на деяку відстань  $a$  від центра платформи і покладіть на платформу симетрично таке ж саме тіло для збереження її горизонтального положення (рис.14, б).

10. Визначте момент інерції такої системи  $I_3$ , згідно з пп. 5 і 6.

11. Ураховуючи, що момент інерції системи  $I_3 = I_0 + 2I_4$  за формулою

$$I_4 = \frac{I_3 - I_0}{2}, \quad (13)$$

обчисліть момент інерції одного із тіл відносно осі обертання трифілярного підвісу.

12. Обчисліть момент інерції тіла відносно осі підвісу за теоремою Гюйгенса-Штейнера

$$I_4 = I_2 + m_1 a^2 \quad (14)$$

і порівняйте його зі значення, отриманим у п.11.

13. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань моменту інерції порожньої платформи за формулою (12).

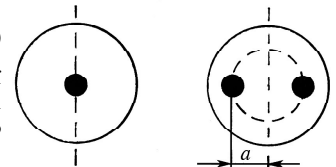


Рис. 14

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення моменту інерції твердого тіла відносно нерухомої осі. Яка його аналогія з масою?
3. Яка особливість обертання твердого тіла навколо осі, що закріплена в одній точці? Що таке тензор інерції? Дайте характеристику тензора інерції.
4. Запишіть вирази для осьових та відцентрових моментів інерції.
5. Що таке головні (вільні) осі обертання?
6. Дайте фізичне пояснення діагоналізації тензора інерції. Який вигляд має діагоналізований тензор інерції? Що таке центральні головні осі тензора інерції?
7. Виведіть вираз для моменту інерції суцільного однорідного

циліндра відносно осі, яка проходить через середини основ паралельно твірній.

8. Запишіть вирази для моментів інерції простих тіл: суцільного однорідного циліндра, конуса, кулі, диска, пустотілого циліндра, тонкого однорідного стержня відносно осі, яка проходить через середину стержня перпендикулярно до нього.

9. Сформулюйте теорему Гюйгенса-Штейнера. Визначте момент інерції тонкого однорідного стержня відносно осі, яка проходить через край стержня.

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про роботу.  
2-9. [1, с.156-162]; [2, с.320-329]; [3, с.211-215].

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

#### Перевірка основного закону обертального руху

**Мета роботи:** експериментальна перевірка рівняння моментів.

**Прилади і матеріали.** Маятник Обербека; штангенциркуль; секундомір; металева лінійка; набір тягарців.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Рівняння обертального руху тіла навколо нерухомої осі в проекції на вісь обертання має вигляд

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

де  $M$  – проекція моменту зовнішніх сил на вісь обертання;  $I$  – момент інерції тіла відносно осі обертання;  $\beta$  – кутове прискорення.

Якщо до твердого тіла, момент інерції якого залишається сталою величиною, прикладено різні обертові моменти, то

$$M_1 = I\beta_1, \quad (2)$$

$$M_2 = I\beta_2. \quad (3)$$

Розділивши (2) на (3), одержимо:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\beta_1}{\beta_2}. \quad (4)$$

46

Якщо ж момент зовнішніх сил залишається постійним, а змінюється момент інерції тіла, то

$$M = I_1\beta_1, \quad (5)$$

$$M = I_2\beta_2. \quad (6)$$

Прирівнявши праві частини (5) і (6), отримаємо

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\beta_2}{\beta_1}. \quad (7)$$

Рівності (4) і (7) дають змогу перевірити основний закон динаміки обертального руху твердого тіла.

Залежність кутового прискорення від зміни обертового моменту та моменту інерції можна вивчити за допомогою хрестоподібного маятника Обербека (рис.15). Маятник Обербека складається з чотирьох однорідних стержнів 1, угвинчених у втулку 2.

Втулка зі шківом 3 може обертатись навколо нерухомої горизонтальної осі. Стержні, які мають поділки, розміщені взаємно перпендикулярно, утворюючи хрестовину. До осі по центру шківів прикріплено вертикальну шкалу 4 з міліметровими поділками. На шків намотують нитку певної довжини. Один кінець нитки прикріплюють до шківів, а до другого кріплять вантаж 5. На стержнях хрестовини закріплюють тягарці 6 однакової маси. Під дією ваги важків нитка розмотується, вантаж опускається з прискоренням і приводить маятник в обертальний рух.

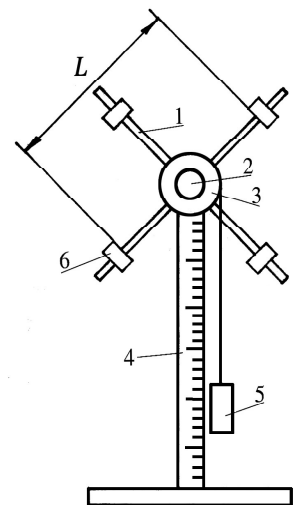


Рис. 15



Момент інерції маятника (маятник зі стержнями та тягарцями)

$$I = I_0 + 4 \frac{1}{12} m_1 l_2^2 + 4 m_1 l_1^2, \quad (8)$$

де  $I_0$  – момент інерції маятника без тягарців;  $m_1$  – маса тягарця на стержні;  $l_2$  – висота тягарця  $m_1$ ;  $l_1$  – віддаль від осі обертання маятника до центра мас тягарця  $m_1$ .

Рух системи тіл (маятник+вантаж на нитці масою  $m$ ) складний. Його можна описати за допомогою системи рівнянь: для поступального руху вантажу  $m$  на нитці

$$ma = mg - T, \quad (9)$$

для обертального руху маятника (без урахування сили тертя)

$$I\beta = TR, \quad (10)$$

для зв'язування прискорень в (9) і (10)

$$\beta = \frac{a}{R}. \quad (11)$$

Тут  $R$  – радіус шківів;  $T$  – сила натягу нитки;  $a$  – лінійне прискорення вантажу на нитці;  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Сумісний розв'язок системи рівнянь (9), (10) і (11) дає сталі в часі прискорення

$$a = \frac{mR^2}{I + mR^2} g, \quad (12)$$

яке може бути також визначене незалежно з кінематичного рівняння

$$a = \frac{2H}{t^2}, \quad (13)$$

де  $H$  – віддаль, яку проходить вантаж  $m$  за час  $t$ . У цій роботі  $H$  є сталою величиною. Для кутового прискорення, згідно з (11), одержимо:

$$\beta = \frac{4H}{t^2 D}, \quad (14)$$

де враховано, що  $(R = D/2)$ ,  $D$  – діаметр шківів.

Момент сили

$$M = TR, \quad (15)$$

для якого, згідно з (9) і (13), отримуємо вираз

$$M = m(g-a)R = \frac{mD}{2} \left( g - \frac{2H}{t^2} \right), \quad (16)$$

Вираз для моменту інерції маятника одержується з (10) з урахуванням (11), (15) і (16):

$$I_0 = \frac{TR}{\beta} = \frac{m(g-a)R}{\beta} = \frac{mR^2(g-a)}{a} = mR^2 \left( \frac{g}{a} - 1 \right). \quad (17)$$

Підставляючи (13) у (17) і виражаючи радіус шківів через його діаметр, остаточно отримаємо

$$I_0 = \frac{mD^2}{4} \left( \frac{gt^2}{2H} - 1 \right). \quad (18)$$

#### Хід роботи

**Вправа 1.** Визначення моменту інерції хрестовини без тягарців.

1. Виміряйте штангенциркулем діаметр шківів маятника  $D$ , до якого прив'язана нитка.
2. Зніміть тягарці маси  $m_1$  із хрестовин маятника і прикріпіть вантаж масою  $m$  до нитки.
3. Виміряйте час опускання  $t$  вантажу на відстань  $H$ .  
Вимірювання часу проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань. Відстань  $H$  виміряйте один раз і оцініть похибку одного прямого виміру.
4. За формулою (18) обчисліть момент інерції хрестовини без тягарців  $I_0$ .
5. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань  $I_0$  за формулою (18).

**Вправа 2.** Перевірка співвідношення (4).

6. Закріпіть тягарці  $m_1$  на стержнях на відстані 10–12 поділок від осі обертання. При цьому прилад повинен бути збалансованим (перебувати в байдужій рівновазі).
7. Виміряйте висоту  $l_2$  тягарців  $m_1$ .
8. Визначте відстань  $l_1$  від осі обертання до центра мас тягарців  $m_1$ .

так: штангенциркулем виміряти відстань  $L$  (див. рисунок 15) і обчислити  $I_1$  за формулою

$$I_1 = \frac{L + l_2}{2}.$$

9. За формулою (8) обчисліть момент інерції  $I_1$  маятника.
10. Підвісьте найбільший вантаж масою  $m$  на нитку й акуратно намотайте нитку на шків. Відпустіть маятник, одночасно увімкнувши секундомір, і зафіксуйте час опускання вантажу на відстань  $H$ . Дослід проробіть 3 рази і обчисліть середнє значення  $t$ .
11. За формулами (16) і (14) обчисліть  $M_1$  і  $\beta_1$  відповідно.
12. Зменшіть масу вантажу на нитці. Виконайте вимірювання, вказані в п.10. За формулами (16) і (14) обчисліть відповідно  $M_2$  і  $\beta_2$ .
14. Перевірте співвідношення (4).
15. За визначеними  $M_i$  та  $\beta_i$  ( $i=1,2$ ) з рівняння (1) обчисліть момент інерції системи  $I_i$  ( $i=1,2$ ), візьміть його середнє значення і порівняйте з обчисленим за формулою (8) у п.9.

**Вправа 3.** Перевірка співвідношення (7).

16. Зменшіть відстань тягарців  $m_1$  від осі обертання до 5–6 поділок і визначте відстань  $l_1$ , як це вказано у п. 8.
17. За формулою (8) обчисліть момент інерції системи  $I_2$ .
18. Встановіть масу вантажу  $m$  на нитці таку саму, як у п.10, проведіть вимірювання, наведені в цьому пункті і за формулою (14) обчисліть  $\beta_2$ .
16. Використовуючи значення моменту інерції  $I_1$ , знайдене в п.9 і значення  $\beta_1$ , отримане в п.11, перевірте співвідношення (7).

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення таких фізичних величин: момент сили, момент інерції, момент імпульсу, кутова швидкість, кутове прискорення матеріальної точки і твердого тіла. Як визначаються їх величини та напрямки?
3. Виведіть основне рівняння динаміки обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі ( $M = I\beta$ ).

4. Де і чому в даній роботі застосовується теорема Гюйгенса-Штейнера? Сформулюйте цю теорему.

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.46-48, с.106-109, с.160-161].
3. [2, с.187-190]; [4, с.318-327]; [3, с.235-239].
4. Інструкція; [1, с.161-162]; [3, с.211-215].

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

#### Визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом інтерференції

**Мета роботи:** експериментальне визначення швидкості звуку в повітрі.

**Прилади і матеріали.** Прилад Квінке; звуковий генератор; телефон; мікрофон; електронний осцилограф; підсилювач низької частоти.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Швидкість поширення звукових хвиль у середовищі залежить від його пружних властивостей та густини середовища. Ці величини є певними функціями температури й експериментально визначити їх непросто. Тому при експериментальному визначенні швидкості поширення звукових хвиль у повітрі часто користуються співвідношенням, яке пов'язує швидкість поширення звуку  $v$  із частотою коливань  $\nu$  та довжиною хвилі  $\lambda$ , тобто

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

Знаючи частоту коливань та визначивши експериментально довжину звукової хвилі, можна за співвідношенням (1) знайти швидкість поширення звуку в повітрі при сталій температурі.

Одним із методів визначення довжини хвилі є метод інтерференції. Інтерференцією називається явище накладання хвиль, у результаті якого в одних точках пружного середовища хвилі підсилюють одна одну, в інших послаблюють. Інтерферувати можуть лише хвилі, які мають однакову частоту і незалежну від часу різницю

фаз. Такі хвилі називаються когерентними. У випадку накладання когерентних хвиль інтерференційна картина, що утворюється, стійка. Максимум інтерференції спостерігається тоді, коли різниця фаз інтерферуючих хвиль

$$\Delta\varphi = 2n\pi, n \in Z, \quad (2)$$

або коли різниця ходу

$$\Delta r = 2n \frac{\lambda}{2}, n \in Z \quad (3)$$

дорівнює парному числу півхвиль. Мінімум інтерференції буде спостерігатись тоді, коли різниця фаз задовольняє умову

$$\Delta\varphi = (2n+1)\pi, n \in Z, \quad (4)$$

або коли різниця ходу

$$\Delta r = (2n+1) \frac{\lambda}{2}, n \in Z \quad (5)$$

дорівнює непарному числу півхвиль.

Відстань між двома послідовними максимумами чи мінімумами інтерференції дорівнює  $\lambda/2$  – половині довжини хвилі. Отже,

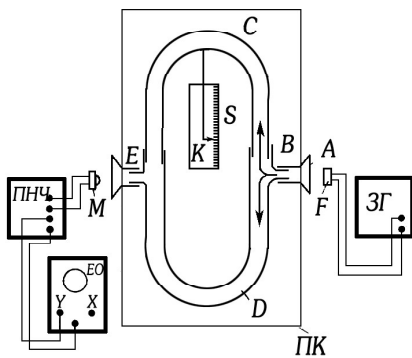


Рис. 16

довжина хвилі  $\lambda$  дорівнює подвоєній відстані між двома послідовними максимумами або мінімумами інтерференції. Основне завдання вимірювань полягає у визначенні відстані між двома послідовними мінімумами інтерференції.

Загальний вигляд установки зображений на рис. 16. Звукова хвиля від телефона F, який під'єднаний до звукового генератора, поширюється по трубопроводу A приладу Квінке. В точці B вона розходить по окремих трубопроводах C і D, що забезпечує когерентність хвиль. Когерентні хвилі надходять до вихідної слухової трубки (область E), де відбувається їх інтерференція. Різниця ходу хвиль, що приходять в область E, регулюється зміною довжини трубопроводу C і відраховується за допомогою шкали S. Звукові коливання, підсилені або послаблені в результаті інтерференції, сприймаються мікрофоном M і перетворюються в електромагнітні коливання звукової частоти. Ці коливання підсилюються підсилювачем низької частоти і надходять на вхід осцилографа.

#### Хід роботи

1. Увімкніть осцилограф та звуковий генератор і дати їм можливість прогрітись протягом кількох хвилин.
2. Задайте на звуковому генераторі частоту  $\nu$  звукової хвилі в межах 2000-3000 Гц.
3. Змінюючи довжину трубопроводу C, отримайте два послідовних мінімуми звуку, яким відповідатимуть мінімальні значення довжини вертикальних ліній на екрані осцилографа. Першому мінімуму інтенсивності звуку відповідатиме положення  $n_1$  покажчика K на шкалі S, другому –  $n_2$ . Відстань між цими двома послідовними мінімумами дорівнює  $\lambda/2$ . Отже  $\lambda = 2|n_1 - n_2|$ .
4. Обчисліть швидкість поширення звуку в повітрі за формулою

$$v = 2|n_1 - n_2|\nu. \quad (6)$$

Вимірювання проведіть по три рази для двох різних частот.

5. Обчисліть похибки прямих та опосередкованих вимірювань для однієї з частот. Для частоти оцініть систематичну похибку.
6. Визначте швидкість поширення звуку в повітрі при  $0^\circ\text{C}$  за формулою

$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1+\alpha t}}, \quad (7)$$

де  $\alpha = 0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $t$  – кімнатна температура.

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Що називається хвилею, фронтом хвилі, хвильовою поверхнею, довжиною хвилі? Які хвилі називаються поперечними (поперечними)?
3. Поясніть механізм утворення звукової хвилі в повітрі. Дайте визначення основним характеристикам звуку: висота, тембр, акустичний спектр, сила (гучність). Чим вони визначаються?
4. Запишіть та поясніть рівняння плоскої (сферичної) хвилі. Що таке хвильове число (хвильовий вектор)? Дайте визначення фазової швидкості.
5. Виведіть хвильове рівняння.
6. У чому сутність явища інтерференції? Які хвилі називаються когерентними?
7. Виведіть умови мінімуму і максимуму інтерференції.

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-3. [6, с.274-277, с.292-295]; [3, с.472-478].
- 4-5. [6, с.277-282].
- 6-7. [4, с.727-732]; [3, с.488-491]; [6, с. 289-292]; [7, с.416-426].

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

#### Визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом стоячої хвилі

**Мета роботи:** експериментальне визначення швидкості звуку в повітрі.

**Приладні матеріали.** Звуковий генератор; телефон; мікрофон; електронний осцилограф; скляна труба.

54

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Процес поширення звуку в газах з точки зору термодинаміки можна вважати адіабатним. Виходячи з цього, Лаплас отримав співвідношення для розрахунку швидкості поширення звуку в газах

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (1)$$

де  $\gamma = C_p/C_v$  – показник адіабати;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура газу;  $\mu$  – молярна маса газу.

Швидкість поширення звуку в газах можна також визначити за його частотою та довжиною хвилі  $\lambda$

$$v = \lambda \nu. \quad (2)$$

Існує багато різних методів експериментального визначення довжини звукової хвилі заданої частоти, серед яких одним із найчастіше використовуваних є метод стоячих хвилі.

Якщо взяти закрити з одного кінця заповнену повітрям трубу діаметром  $d < \lambda/2$ , в якій поширюється звукова хвиля, то при накладанні падаючої й відбитої від закритого кінця труби хвилі утвориться стояча хвиля з наступним розподілом зміщень:

$$\xi = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t, \quad (3)$$

де  $A$  – амплітуда біжучої хвилі;  $x$  – координата точки середовища, яка в момент часу  $t$  змістилася від положення рівноваги на  $\xi$ .

Амплітуда коливаний у стоячій хвилі визначається виразом  $2A \cos(2\pi x/\lambda)$ . Це доводить, що вона залежить від координати  $x$ , яка визначає положення точки середовища. Ті точки середовища, в яких стоячі хвилі мають найбільші амплітуди, називають пучностями, а точки, в яких амплітуди дорівнюють нулю, – вузлами. Положення пучностей, як це видно із (3), визначаються умовою

$$\frac{2\pi x_n}{\lambda} = \pm \pi n, n \in Z$$

або в іншому вигляді

$$x_n = \pm n \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

55

Із (4) знайдемо відстані між двома сусідніми пучностями

$$L = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Тобто відстань між двома сусідніми пучностями дорівнює половині довжини падаючої хвилі

$$\lambda = 2L. \quad (6)$$

Отже, робоча формула для визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом стоячих хвиль матиме вигляд

$$v = 2L \nu. \quad (7)$$

Установка (рис.17) складається зі скляної труби Т і телефона F, який є джерелом звуку і живиться від звукового генератора ЗГ. Звукові коливання сприймаються мікрофоном М, перетворюються в електричний сигнал, який подається на блок вертикально відхиляючих пластин осцилографа. При вимкненому блоці розгортки на екрані осцилографа спостерігається вертикальна лінія.

#### Хід роботи

1. Увімкніть звуковий генератор та осцилограф і дайте їм можливість прогрітися протягом кількох хвилин.
2. При певній частоті звукових коливань (її задає керівник заняття) домогтися чіткого зображення на екрані осцилографа вертикальної лінії.
3. Пересуваючи мікрофон уздовж осі труби, знайдіть чотири таких його положення, при яких вертикальна лінія на екрані осцилографа матиме максимальну довжину. Це означає, що положення мікрофона відповідатиме пучностям зміщення.
4. За формулою (5) знайдіть три значення відстаней  $L$  між пучностями і обчисліть похибки прямих вимірювань. Для частоти оцініть систематичну похибку.
5. За формулою (7) визначте швидкість поширення звуку в повітрі.
6. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.
7. Змініть частоту звукового сигналу і проробіть пп. 3–5.
9. Обчисліть теоретичне значення швидкості звуку в повітрі за кімнатної температури за формулою (1). Для повітря  $\gamma=1,4$ ;  $\mu=29$  г/моль.

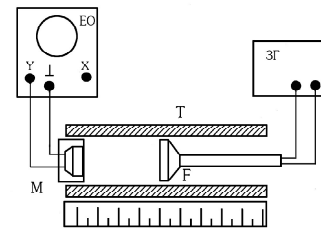


Рис. 17

#### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Що називається хвилею, фронтом хвилі, хвильовою поверхнею, довжиною хвилі? Які хвилі називаються поперечними (поперечними)?
3. Поясніть механізм утворення звукової хвилі в повітрі. Дайте визначення основним характеристикам звуку: висота, тембр, акустичний спектр, сила (гучність). Чим вони визначаються?
4. Запишіть та поясніть рівняння плоскої (сферичної) хвилі. Що таке хвильове число (хвильовий вектор)? Дайте визначення фазової швидкості.
5. Виведіть хвильове рівняння.
6. Виведіть рівняння стоячої хвилі.
7. Запишіть рівняння стоячої хвилі. Виведіть вирази для координат вузлів та пучностей.
8. Чому із підвищенням температури швидкість звуку зростає?

#### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-3. [6, с.274-277, с.292-295]; [3, с.472-478].
- 4-5. [6, с.277-282].
- 6-8. [4, с.727-732]; [3, с.488-491]; [6, с. 289-292].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15

### Вивчення власних та вимушених коливань крутильного маятника

**Мета роботи:** визначення частоти власних коливань та коефіцієнта затухання крутильного маятника. Вивчення явища резонансу та визначення резонансної частоти.

**Прилади і матеріали.** Установка, змонтована на базі крутильного маятника; секундомір.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Вимушеними називаються коливання під дією зовнішньої періодичної сили. Рівняння руху крутильного маятника, що коливається під дією періодичного моменту зовнішньої сили, можна записати у вигляді

$$I\ddot{\alpha} = -k\alpha - h\dot{\alpha} + M_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

де  $I$  – момент інерції маятника;  $\alpha$  – кут повороту маятника від положення рівноваги;  $k$  – постійна моменту пружної сили;  $h$  – постійна моменту сил опору;  $M_0$  – амплітуда моменту зовнішньої сили;  $\omega$  – циклічна частота дії моменту зовнішньої сили.

Загальний розв'язок рівняння (1) має вигляд

$$\alpha = A e^{-\delta t} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + B \sin(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

де  $\delta = \frac{h}{2I}$  – коефіцієнт затухання;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{I}}$  – частота затухаючих власних коливань;  $A$  і  $\varphi_0$  – амплітуда і початкова фаза власних коливань, значення яких визначаються початковими умовами;  $B$  – амплітуда вимушених коливань, які відбуваються з частотою  $\omega$ ;  $\varphi$  – різниця фази зміщення при вимушених коливаннях ( $\omega t - \varphi$ ) і фази моменту зовнішньої сили ( $\omega t$ ).

Перший доданок у (2) описує власні коливання, які через деякий проміжок часу практично згасають, а другий – вимушені коливання з частотою  $\omega$ , які встановлюються в системі. Час протягом якого в системі встановлюються вимушені коливання з частотою  $\omega$ , називається перехідним режимом.

Амплітуда коливань, що встановились, залежить від співвідношення між частотою  $\omega_0$  власних коливань і частотою  $\omega$

вимушуючого моменту сили, а також від коефіцієнта затухання  $\delta$ . Вимушені коливання системи відбуваються з деяким запізненням за фазою по відношенню до коливань вимушуючого моменту сили.

Можна показати, що:

$$B = \frac{M_0}{I\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\delta^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = -\frac{2\omega\delta}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (3)$$

як видно з (3), залежність  $B(\omega)$  має резонансний характер.

Крутильний маятник являє собою (рис.18) металевий диск А, який може обертатися навколо горизонтальної осі О, та важіль В, який також може обертатися навколо осі О, і які з'єднані між собою спіральною пружиною С. Кінець важеля через шатун Д з'єднаний з ексцентриком Е, який закріплений на диску редуктора М. Редуктор, у свою чергу, під'єднаний до вала електродвигуна. При обертанні ексцентрика маятник буде здійснювати крутильні коливання. Шкала N дозволяє проводити вимірювання амплітуди цих коливань в умовних одиницях.

Зміною напруги на електродвигуні можна змінювати частоту обертання ексцентрика, а отже, частоту дії вимушуючого моменту сили. При наближенні частоти вимушуючого моменту сили до частоти власних коливань амплітуда вимушених коливань різко зростає. Це явище називається резонансом.

#### Хід роботи

**Вправа 1.** Вивчення власних коливань крутильного маятника.

1. Відхиліть маятник від положення рівноваги і, користуючись секундоміром, визначте час  $t$  **двох** повних коливань маятника. Вимірювання проведіть три рази і обчисліть похибки прямих вимірювань.
2. Циклічна частота власних коливань зв'язана з періодом  $T$  співвідношенням

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

Ураховуючи, що

$$T = \frac{t}{2}, \quad (5)$$

59

для власної частоти отримуємо:

$$\omega_0 = \frac{4\pi}{t} \quad (6)$$

Знаючи  $t$ , обчисліть  $\omega_0$  і знайдіть похибки прямих вимірювань.

3. Відхиліть маятник від положення рівноваги і за допомогою шкали N визначити амплітуди двох послідовних коливань маятника  $A_1, A_2$ . Вимірювання проведіть три рази і обчисліть середні значення  $\bar{A}_1$  та  $\bar{A}_2$ .

4. За формулою

$$\theta = \ln \frac{\bar{A}_1}{\bar{A}_2} \quad (7)$$

визначте логарифмічний декремент згасання, а потім знайдіть величину коефіцієнта згасання  $\delta$

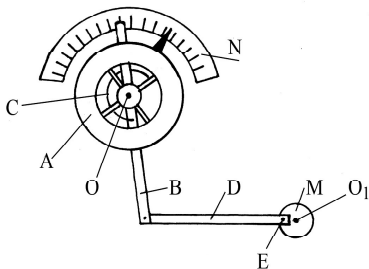


Рис. 18

$$\delta = \frac{\theta}{T} = \frac{2\theta}{t} \quad (8)$$

**Вправа 2.** Вивчення вимушених коливань крутильного маятника.

1. Увімкніть електродвигун в електричну мережу. Повільно збільшуючи напругу, переконайтеся, що амплітуда вимушених коливань залежить від частоти дії зовнішнього момента сили.

Спостерігайте явище резонансу.

2. Для різних значень амплітуди вимушених коливань заповніть таку таблицю:

N	B	t	$\omega$
п/п			

B – амплітуда вимушених коливань в умовних одиницях. Зчитується зі шкали N.

t – час двох повних коливань. Вимірюється за допомогою секундоміра.

$\omega$  – циклічна частота вимушених коливань. Обчислюється за формулою (6).

Таблиця повинна містити 5 значень амплітуди для частот  $\omega < \omega_{рез}$  і 5 значень для частот  $\omega > \omega_{рез}$ .

3. Одержані результати зобразіть у вигляді графіка  $B(\omega)$ : по осі абсцис відкладіть частоту, а по осі ординат – амплітуду вимушених коливань. На цьому ж графіку відкладіть частоту власних коливань маятника, визначену у вправі 1. Переконайтеся, що  $\omega_0 \approx \omega_{рез}$ .

#### Контрольні запитання і завдання

- Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
- Запишіть поясніть рівняння вимушених коливань.
- Поясніть принцип виведення співвідношень для амплітуди та фази вимушених коливань. Виведіть співвідношення для резонансного значення частоти; амплітуди; фази.
- Пояснити амплітудно - частотну та фаз - частотну резонансні криві, розглянувши випадки  $\omega \ll \omega_0$ ,  $\omega \approx \omega_0$ ,  $\omega \gg \omega_0$ .
- Що таке логарифмічний декремент затухання? Який його фізичний зміст? Яку інформацію про затухання він у собі несе?
- Що таке добротність і як з нею пов'язаний логарифмічний декремент згасання?
- Що таке перехідний режим?

### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.268-270]; [3, с.437-445].
3. [4, с.619-621]; [7, с.210-213]; [3, с.437-445].
- 4-7. [1, с.264-273]; [4, с.622-632]; [3, с.437-445].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16

### Вивчення руху гіроскопа

**Мета роботи:** визначення моменту інерції гіроскопа.

**Прилади і матеріали.** Гіроскоп; секундомір.

**Теоретичні відомості та опис приладу.** Гіроскопом називається симетричне тверде тіло, яке обертається з великою швидкістю навколо власної осі, що є однією з вільних осей. Гіроскоп має три ступені вільності, якщо він закріплений так, що може здійснити будь-який поворот навколо нерухомої точки. Ця точка називається центром підвісу. Якщо центр мас гіроскопа збігається з центром підвісу, то результуючий момент сил тяжіння, що діють на різні частини гіроскопа, відносно центра підвісу дорівнює нулю. Оскільки тертя в місцях закріплення гіроскопа мале, то можна вважати момент сил тертя таким, що дорівнює нулю.

Таким чином, якщо сумарний момент сил, що діє на гіроскоп, дорівнює нулю, то такий гіроскоп називається вільним. Якщо сумарний момент сил, що діє на гіроскоп, відмінний від нуля, то гіроскоп зазнає прецесії. Прецесія гіроскопа описується рівнянням

$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} = \mathbf{M}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{M}$  – сумарний момент зовнішніх сил,  $\mathbf{N}$  – момент імпульсу фігури гіроскопа.

$$\mathbf{N} = I\boldsymbol{\omega}. \quad (2)$$

де  $I$  – момент інерції гіроскопа, який залежить від геометричної форми і маси фігури гіроскопа,  $\boldsymbol{\omega}$  – кутова швидкість обертання фігури гіроскопа.

Оскільки  $I = const$ , то при заданій кутовій швидкості  $\boldsymbol{\omega}$  модуль моменту імпульсу гіроскопа не змінюється. В результаті прецесії змінюється лише його напрямок і, як наслідок, вісь фігури гіроскопа змінює свою орієнтацію в просторі.

Розглянемо гіроскоп (рис. 19). Позначимо  $aa'$  вісь фігури гіроскопа, яка може обертатися навколо горизонтальної осі  $bb'$  та вертикальної осі  $cc'$ . Гіроскоп, фігура якого не обертається, поводить себе як різноплечий важіль. Якщо підібрати положення тягарця 2 так, щоб вісь  $aa'$  зайняла горизонтальне положення, то точка закріплення гіроскопа  $C$  збіжиться з центром підвісу. За визначенням, такий гіроскоп буде вільним, а отже, моменти сил тяжіння, які діють на фігуру гіроскопа масою  $m_1$   $M_1 = m_1g \cdot |OC|$ , та на тягарець масою  $m_2$   $M_2 = m_2g \cdot |AC|$  компенсують один одного.  $|OC|$  і  $|AC|$  – плечі відповідних сил. Якщо фігуру гіроскопа привести у швидке обертання навколо осі  $aa'$ , то прецесії не буде. Якщо змістити тягарець  $m_2$  вправо чи вліво від рівноважного положення на величину  $l$ , то зміниться плече сили  $m_2g$  – відрізок  $|AC|$  і, відповідно, момент сили  $M_2$ . Момент сили  $M_1$  при переміщеннях тягарця залишається незмінним. Тоді моменти сил  $M_1$  і  $M_2$  не компенсують один одного і виникне прецесія.

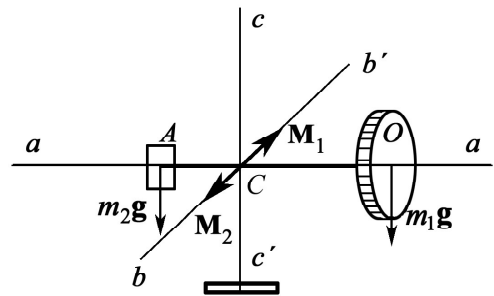


Рис. 19



Припустимо, що тягарець  $m_2$  змістили вліво від точки С (рис. 20). Тоді  $M_2 > M_1$  і у додатному напрямку осі  $bb'$  діятиме некомпенсований момент сил

$$M = M_2 - M_1 = m_2 gl. \quad (3)$$

Нехай кутова швидкість фігури гіроскопа напрямлена вправо уздовж осі  $aa'$ . Згідно з (2), у той самий бік буде напрямлений і момент імпульсу гіроскопа  $\mathbf{N}$ . З (1) випливає, що  $d\mathbf{N} \uparrow \uparrow \mathbf{M}$ . Якщо момент  $\mathbf{M}$  діє постійно, то вісь фігури гіроскопа буде обертатися навколо осі  $cc'$ . Це і буде прецесія. Кутова швидкість прецесії  $\Omega$  у даному випадку буде напрямлена вниз уздовж осі  $cc'$ .

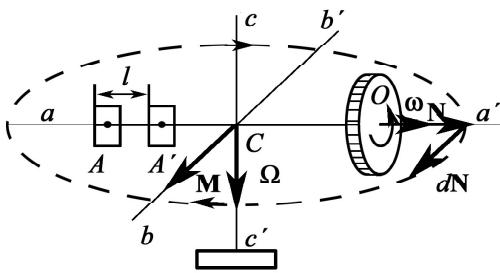


Рис. 20

Кінець вектора  $\mathbf{N}$  опише в горизонтальній площині коло радіусом  $N$ . З рисунка 21 видно, що

$$dN = Nd\varphi = I\omega \cdot d\varphi. \quad (4)$$

З рівняння (1)

$$dN = Mdt. \quad (5)$$

Прирівнявши праві частини рівностей (4) і (5), одержимо

$$\frac{d\varphi}{dt} \equiv \Omega = \frac{M}{I\omega}. \quad (6)$$

Ураховуючи (3), матимемо:

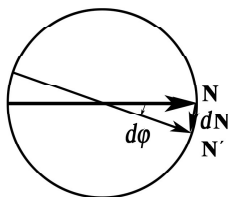


Рис. 21

$$\Omega = \frac{m_2 gl}{I\omega}, \quad (7)$$

і для момента інерції гіроскопа отримаємо вираз

$$I = \frac{m_2 gl}{\Omega\omega}. \quad (8)$$

Величину кутової швидкості прецесії можна знайти через кут повороту осі гіроскопа  $\varphi$  і час  $\tau$  протягом якого здійснюється цей поворот за співвідношенням

$$\Omega = \frac{\varphi}{\tau}.$$

Ураховавши, що  $\omega = 2\pi\nu$ , для момента інерції гіроскопа остаточно отримаємо

$$I = \frac{m_2 gl\tau}{2\pi\nu\varphi}. \quad (9)$$

Якщо  $\nu = const$ , то

$$\frac{m_2 gl_1 \tau_1}{2\pi\nu\varphi} = \frac{m_2 gl_2 \tau_2}{2\pi\nu\varphi} = \frac{m_2 gl_3 \tau_3}{2\pi\nu\varphi}. \quad (10)$$

### Хід роботи

- Зрівноважте гіроскоп з допомогою вантажу  $m_2$  ( $m_2=375$  г) так, щоб він мав горизонтальне положення. Позначте рівноважне положення вантажу. Визначте ціну поділки частотоміра гіроскопа.
- Увімкніть електропривід гіроскопа і переконайтеся, що він не зазнає прецесії. Зчитайте частоту обертання гіроскопа  $\nu$ .
- Змістіть тягарець на відстань  $l$  від рівноважного положення в той чи інший бік і спостерігайте явище прецесії гіроскопа.
- Зчитайте з таблиці час повороту  $\tau$  на кут  $\varphi=\pi/6$ . Виміри часу  $\tau$  для заданого кута повороту проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань.
- За формулою (9) визначте момент інерції гіроскопа.
- Пункти 3-5 повторіть не менше трьох разів для різних значень  $l$  і перевірте правильність формули (10).
- Похибки опосередкованих вимірювань моменту інерції  $I$  обчисліть для одного зі значень  $l$ .

### Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Що таке вільний гіроскоп? Що таке прецесія гіроскопа? Як знаходяться напрямки моменту сили, моменту імпульсу, кутової швидкості маховика та кутової швидкості прецесії гіроскопа? Де застосовуються гіроскопи?
3. Пояснити природу гіроскопічних сил.

### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.170-176]; [4, с.457-466]; [2, с.287-314]; [3, с.239-247].
3. [1, с.179]; [3, с.247-249, с.254-256].

Таблиці

Таблиця 1. Коефіцієнти Стьюдента  $t_{\alpha}(n)$

n	$\alpha$					
	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,38	3,08	6,31	12,70	31,80	63,70
3	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,92	1,48	2,02	2,57	3,36	4,03
7	0,90	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,90	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50
9	0,90	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
12	0,87	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
14	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
16	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
18	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
20	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
25	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
30	0,85	1,31	1,70	2,05	2,46	2,75
35	0,85	1,31	1,69	2,04	2,45	2,73
40	0,85	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
45	0,85	1,30	1,68	2,02	2,41	2,69
50	0,85	1,30	1,68	2,01	2,40	2,68
60	0,85	1,30	1,67	2,00	2,39	2,67
70	0,85	1,30	1,67	1,99	2,38	2,66
80	0,85	1,30	1,67	1,99	2,37	2,65

Таблиця 2. Фундаментальні фізичні константи

Константа	Позначення	Числове значення
Швидкість світла	$c$	$3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	$\gamma$	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м <sup>2</sup> ·кг <sup>-2</sup>
Стала Авогадро	$N_A$	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Стала Лошмідта	$L$	$2,69 \cdot 10^{25}$ м <sup>-3</sup>
Універсальна газова стала	$R$	8,314 Дж/(моль·К)
Стандартний об'єм газу	$V_m$	$22,42 \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup> /моль
Елементарний заряд	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	$m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Питомий заряд електрона	$e/m_e$	$1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Стала Фарадея	$F$	$9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Електрична стала	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Стала Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Таблиця 3. Густина речовин  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>Гази при нормальних умовах ( $T=273,15$  К,  $P=1,01 \cdot 10^5$  Па)

Азот	1,250	Кисень	1,429
Водень	0,089	Метан	0,717
Вуглекислий газ	1,977	Неон	0,900
Гелій	0,178	Повітря	1,293

**Рідини**

Бензол ( $t=20^\circ\text{C}$ )	879	Скипидар ( $t=16^\circ\text{C}$ )	858
Вода ( $t=4^\circ\text{C}$ )	1000	Спирт етиловий ( $t=0^\circ\text{C}$ )	789
Вода ( $t=100^\circ\text{C}$ )	958	Спирт метиловий ( $t=0^\circ\text{C}$ )	792
Гас ( $t=0^\circ\text{C}$ )	800	Толуол ( $t=18^\circ\text{C}$ )	870
Гліцерин ( $t=0^\circ\text{C}$ )	1260	Ртуть ( $t=0^\circ\text{C}$ )	13596

**Тверді тіла при 293 К ( $\rho \cdot 10^{-3}$ )**

Алюміній	2,69	Олово лите	7,23
Залізо	7,86	Сталь лита	7,7 - 8,0
Латунь	8,3 - 8,7	Свинець	11,22 - 11,44
Лід ( $t=0^\circ\text{C}$ )	0,91	Срібло	10,42 - 10,57
Мідь	8,88 - 8,96	Цинк	6,86 - 7,24
Нікель	8,4 - 9,2	Чавун	6,6 - 7,3

Таблиця 4. Деякі фізичні характеристики рідин

Коефіцієнт поверхневого натягу на межі "рідина-повітря"  $\sigma$  при  $20^\circ\text{C}$ , Н/м; коефіцієнт внутрішнього тертя  $\eta$  при  $20^\circ\text{C}$ , Па·с; коефіцієнт об'ємного розширення  $\beta$  при  $20^\circ\text{C}$ , К<sup>-1</sup>; точка кипіння  $t_k$  при  $P=1,01 \cdot 10^5$  Па; питома теплота пароутворення при точках кипіння  $r$ , Дж/кг; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  при  $20^\circ\text{C}$ , Вт/(м·К).

Рідина	$\sigma \cdot 10^3$	$\eta \cdot 10^3$	$\beta \cdot 10^6$	$t_k$	$r \cdot 10^{-5}$	$\lambda \cdot 10^2$
Бензол	30	0,673	124	80,2	3,94	—
Вода	72,6	1,005	21	100,0	22,6	60
Гліцерин	66	1480	50	290	—	29
Ртуть	500	1590	18	356,7	2,85	908
Спирт	22,0	1,2	110	78,3	8,57	17

Таблиця 5. Швидкість звуку  $v$ , м/с

Середовище	$v$	Середовище	$v$
Гази при ( $t=0^\circ\text{C}$ )		Тверді тіла (поздовжні хвилі)	
Азот	333,63	Алюміній ( $t=25^\circ\text{C}$ )	6400
Водень	1286	Залізо ( $t=17^\circ\text{C}$ )	5930
Вуглекислий газ	260,3	Латунь ( $t=25^\circ\text{C}$ )	4280 - 4700

Гелій	970	Мідь ( $t=18^\circ\text{C}$ )	4720
Кисень	314,84	Нікель ( $t=18^\circ\text{C}$ )	4900
Повітря (сухе)	331,46	Свинець ( $t=20^\circ\text{C}$ )	2400
Рідини		Срібло ( $t=20^\circ\text{C}$ )	3700
Бензол ( $t=25^\circ\text{C}$ )	1295	Скло ( $t=18^\circ\text{C}$ )	5000 - 6000
Вода ( $t=0^\circ\text{C}$ )	1407	Цинк ( $t=20^\circ\text{C}$ )	4170
Вода ( $t=20^\circ\text{C}$ )	1482	Ебоніт ( $t=17^\circ\text{C}$ )	2700

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матвеев О. М. Механіка і теорія відносності.– Київ: Вища школа, 1993.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т.1. Механика.– М: Наука, 1989.
3. Стрелков С.П. Механика.– М: Наука, 1975.
4. Хайкин С. Э. Физические основы механики.– М: Физматгиз, 1962.
5. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1.– М: Наука, 1982.
6. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М: Наука, 1982.
7. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т.1.– М:Гизгитл, 1956.
8. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И.Ивероной. – М: Наука, 1967.
9. Загальна фізика. Лабораторний практикум / За заг. ред. І.Т.Горбачука. – К: Вища школа, 1997.
10. Курек І.Г., Курек С.І., Олійнич-Лисюк А.В., Струк Я.М. Обчислення похибок прямих та опосередкованих вимірювань – Чернівці-2021. <https://archer.chnu.edu.ua/handle/123456789/3217>

## Зміст

Лабораторна робота № 1 . . . . .	4
Лабораторна робота № 2 . . . . .	9
Лабораторна робота № 3 . . . . .	12
Лабораторна робота № 4 . . . . .	18
Лабораторна робота № 5 . . . . .	23
Лабораторна робота № 6 . . . . .	26
Лабораторна робота № 7 . . . . .	29
Лабораторна робота № 8 . . . . .	32
Лабораторна робота № 9 . . . . .	36
Лабораторна робота № 10 . . . . .	39
Лабораторна робота № 11 . . . . .	42
Лабораторна робота № 12 . . . . .	46
Лабораторна робота № 13 . . . . .	51
Лабораторна робота № 14 . . . . .	54
Лабораторна робота № 15 . . . . .	58
Лабораторна робота № 16 . . . . .	62
Таблиці . . . . .	67
Список використаних джерел. . . . .	70

*Навчальне видання*

Механіка: Фізичний практикум:  
Методичний посібник для студентів денної форми навчання

Укладачі:  
Курек Ігор Геннадійович  
Курек Єлена Ігорівна  
Ткач Оксана Олександрівна  
Федорцова Ірина Василівна