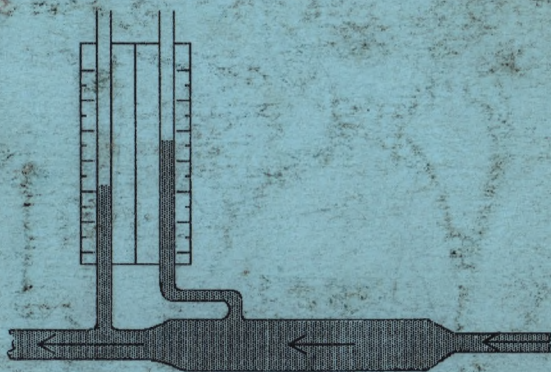


22,2
φ-50

Б.К.Остафійчук, В.Д.Федорів,
І.М.Гасюк, В.В.Угорчук

**ФІЗИЧНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ
ПРАКТИКУМ**
Механіка



ПРИКАРПАТСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ВАСИЛЯ СТЕФАНИКА

Б. К. Остафійчук, В. Д. Федорів,
І. М. Гасюк, В. В. Угорчук

**ФІЗИЧНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ
ПРАКТИКУМ**

Механіка

*За редакцією д-ра фіз.-мат. наук,
проф. Б. К. Остафійчука*

НБ ПІУС



744724

Івано-Франківськ
2009

УДК 535
ББК 22. 34о 73
О 76

Рекомендовано Вченою радою фізико-технічного факультету Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника (протокол № 1 від 17 квітня 2008 р.)

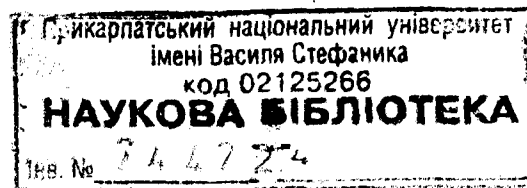
Рецензенти: к. ф.-м. н., доц. Я. П. Салій;
к. ф.-м. н., доц. В. М. Чабанюк

Фізичний лабораторний практикум. Механіка /
О 76 Б. К. Остафійчук, І. М. Гасюк, В. Д. Федорів, В. В. Угорчук ;
за ред. Б. К. Остафійчука. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 142 с. – Бібліограф.: 10 назв.

Навчальний посібник містить опис 20 лабораторних робіт з основних розділів механіки.

Для студентів фізичних і природничих спеціальностей університетів.

ББК 22. 34о 73
УДК 535



© Остафійчук Б. К., Гасюк І. М., Федорів В. Д.,
Угорчук В. В., 2009
© Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника, 2009

ПЕРЕДМОВА

Пропонований практикум із лабораторних робіт містить опис 20 лабораторних робіт із механіки й призначений, у першу чергу, для підготовки студентів до виконання фізичного експерименту, правильності його виконання та представлення отриманих результатів експерименту. Основна мета практикуму – не тільки забезпечити можливість вивчення студентами на дослідах важливих механічних явищ, але навчити їх користуватися різними, в тому числі сучасними, фізичними приладами, надати навички щодо їх наладки та перевірки правильності роботи.

Опис лабораторних робіт не претендує на те, щоб створити у студентів повну уяву про механічні явища, які вивчаються. В описах лабораторних робіт наведено мінімум інформації, без якої неможливе викладення експериментальної методики й коректне виконання лабораторного експерименту. Для отримання більш повної інформації про фізичні закономірності досліджуваних механічних явищ у кінці опису пропонується література для опрацювання.

Враховуючи рівень знань студентів-першокурсників, при опрацюванні отриманих експериментальних результатів рекомендується використовувати елементарну теорію похибок. Послідовність знаходження похибок вимірювання продемонстровано в описі першої лабораторної роботи.

Фізичний практикум призначений для студентів фізичних спеціальностей університетів, а також може використовуватися студентами інших природничих спеціальностей.

1. ВСТУП

1.1. Навчальна програма з курсу загальної фізики для студентів фізичних спеціальностей університету

Механіка

Вступ. Задачі та експериментальний метод фізики. Абстракції та моделі у фізиці. Фізичні величини та їх вимірювання. Система одиниць фізичних величин.

Кінематика матеріальної точки. Відносність руху. Системи координат. Системи відліку. Скаляри і вектори. Простір і час. Синхронізація годинників. Властивості простору і часу.

Переміщення, швидкість та прискорення під час криволінійного руху матеріальної точки. Способи опису руху. Вектор переміщення. Вектор швидкості. Вектор прискорення. Доцентрове і тангенціальне прискорення.

Кінематика твердого тіла. Число ступенів вільності твердого тіла. Розклад руху твердого тіла на складові. Кути Ейлера. Поступальний та обертальний рухи твердого тіла. Вектор кутової швидкості. Вектор елементарного кутового переміщення. Кутове прискорення. Миттєва вісь обертання.

Динаміка матеріальної точки. Поняття сили та її вимірювання. Закони Ньютона та межі їх застосування. Імпульс тіла та імпульс сили.

Перетворення координат. Інерціальні системи відліку і принцип відносності. Перетворення Галілея. Інваріанти перетворення. Формула додавання швидкостей. Принцип відносності Галілея – Ньютона.

Перетворення Лоренца. Постулати Ейнштейна. Перетворення Лоренца. Перетворення Галілея як граничний випадок перетворень Лоренца. Наслідки перетворень Лоренца. Відносність одночасності. Довжина рухомого тіла. Темп ходу рухомого годинника. Власний час. Формули додавання швидкостей і перетворення прискорення.

Рух системи матеріальних точок. Центр мас системи матеріальних точок. Імпульс центра мас системи матеріальних точок. Динамічне рівняння руху центра мас системи матеріальних точок.

Закон збереження імпульсу. Рівняння руху та закони збереження. Закон збереження імпульсу для ізольованої системи. Закон

збереження імпульсу для окремих проекцій. Застосування законів збереження імпульсу.

Закон збереження енергії. Робота сил. Потужність. Кінетична енергія тіла. Потенціальні сили. Робота потенціальних сил та потенціальна енергія. Нормування потенціальної енергії. Взаємозв'язок сили та потенціальної енергії. Повна енергія та енергія спокою. Закон збереження та перетворення енергії для системи матеріальних точок.

Рух тіл змінної маси. Реактивний рух. Рівняння руху тіла змінної маси. Формула Мещерського. Формула Ціолковського. Характеристична швидкість. Релятивістські ракети.

Удар. Характеристика процесів при ударі. Пружні й непружні зіткнення. Лобове зіткнення. Сповільнення нейтронів. Ефект Комптона. Непружні зіткнення двох частинок. Поглинання та випускання фотона.

Неінерціальні системи відліку. Час і простір у неінерціальних системах відліку. Сили інерції та їх знаходження.

Неінерціальні системи відліку, які рухаються прямолінійно. Маятник на візочку. Падаючий маятник. Невагомість. Принцип еквівалентності. Червоне зміщення.

Неінерціальні системи відліку, що обертаються. Коріолісове прискорення. Відцентрова сила інерції. Сила Коріоліса. Прояв сил інерції на Землі. Маятник Фуко. Закони збереження в неінерціальних системах відліку.

Динаміка твердого тіла. Замкнутість системи рівнянь для твердого тіла. Момент сили. Момент імпульсу. Основне рівняння обертального руху твердого тіла (рівняння моментів). Момент інерції. Тензор інерції. Головні осі тензора інерції. Знаходження головних осей. Теорема Гюйгенса. Приклади обчислення моменту інерції твердих тіл відносно осі.

Кінетична енергія твердого тіла. Кінетична енергія твердого тіла, що обертається навколо точки. Кінетична енергія твердого тіла при його довільному русі.

Рух твердого тіла, закріпленого в точці. Гіроскопи. Рівняння Ейлера. Вільні осі обертання твердого тіла. Нутація. Гіроскопи. Наближена теорія гіроскопа. Прецесія гіроскопа. Швидкість прецесії. Невільні гіроскопи. Гіроскопічні сили.

Рух при наявності сил тертя. Сухе тертя. Рідке тертя. Робота сил тертя. Явище застою. Явище заносу. Гранична швидкість під час

руху тіл у в'язкому середовищі. Наближення до граничної швидкості. Тертя кочення.

Рух у полі сил тяжіння. Закони Кеплера. Закон всесвітнього тяжіння. Напруженість та потенціал гравітаційного поля. Застосування закону збереження енергії до аналізу руху тіл у центральному гравітаційному полі. Космічні швидкості. Гравітаційна енергія кулеподібного тіла. Проблема двох тіл. Приведена маса.

Коливання. Гармонічні коливання. Динамічні рівняння гармонічних коливань маятника на пружині, математичного та фізичного маятників. Кінематичне рівняння гармонічних коливань. Амплітуда, частота, фаза. Додавання гармонічних коливань однакової частоти. Додавання гармонічних коливань із близькими частотами. Явище биття. Додавання взаємно перпендикулярних коливань.

Згасаючі коливання. Динамічне та кінематичне рівняння згасаючих коливань. Декремент згасання. Логарифмічний декремент згасання. Випадок великого тертя.

Вимушені коливання. Явище резонансу. Рівняння руху вимушених коливань. Добротність. Резонанс. Автоколивання і параметричні коливання.

Механіка пружних тіл. Суцільні тіла. Типи деформацій. Закон Гука для різних видів деформацій. Зв'язок між деформацією і напругою. Енергія пружно-деформованого тіла. Пружний гістерезис.

Механіка рідин і газів. Гідростатика. Напруги в рідинах. Тиск. Закон Паскаля. Плавання твердих тіл. Закон Архімеда.

Гідродинаміка. Стаціонарний і турбулентний потоки. Лінії течії та трубки течії. Рівняння Бернуллі. Витікання рідин з отвору. Формула Торрічеллі. Сили внутрішнього тертя. Число Рейнольдса. Швидкість руху в'язкої рідини по круглій трубі. Формула Пуазейля. Обтікання тіл. Лобовий опір. Підіймальна сила.

Хвильовий рух. Поширення короткочасного імпульсу в пружному середовищі. Відбивання імпульсу на межі двох середовищ. Поширення коливань в однорідному середовищі. Рівняння біжучої хвилі. Енергія хвильового руху. Потік енергії. Вектор Умова. Інтерференція хвиль. Принцип Гюйгенса. Стоячі хвилі. Явище Доплера.

Елементи акустики. Природа звуку. Звукове поле. Характеристики звукового поля. Відбивання та заломлення звуку та межі двох середовищ. Джерела звуку. Акустичний резонанс. Застосування ультразвуку.

Література

1. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1986.
2. Сивухин Д. И. Общий курс физики. Механика / Д. И. Сивухин. – М. : Наука, 1989.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1977.
4. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1975.
5. Кучерук І. М. Загальний курс фізики. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцин. – К. : Техніка, 1998.
6. Дущенко В. П. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка / В. П. Дущенко, І. М. Кучерук. – К. : Вища школа, 1987.
7. Детлаф А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1989.
8. Остроухов А. А. Розв'язування задач з курсу загальної фізики. Практикум / А. А. Остроухов. – К. : Вища школа, 1970.
9. Анциферов А. И. Практикум по решению физических задач. Механика и молекулярная физика / А. И. Анциферов. – М. : Просвещение, 1975.
10. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1969.
11. Савельев И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1977.
12. Сборник задач по общей физике / под ред. М. С. Цедрика. – М. : Просвещение, 1989.

1.2. Основні правила безпеки роботи в лабораторії

При виконанні лабораторних робіт із механіки слід дотримуватись таких правил:

1. Виконувати вимоги внутрішнього розпорядку, встановленого в лабораторії. Дотримуватись правил техніки безпеки під час роботи з електричними установками.
2. Вмикати установку в електричну мережу й розпочинати виконання досліду лише з дозволу викладача або лаборанта після перевірки готовності студента до виконання лабораторної роботи.
3. Забороняється залишати без нагляду вимірювальні прилади й установки, ввімкнені в електричну мережу.
4. Забороняється під час заняття:
 - загроможувати робоче місце сторонніми предметами;
 - ходити без потреби по лабораторії;
 - торкатись вузлів приладів та інших предметів, які не відносяться до даної лабораторної роботи;
 - виносити з лабораторії прилади, інструменти і т. п.
5. У разі виявлення недоліків у роботі приладів негайно повідомляти викладача.

1.3. Елементарна теорія похибок

Фізичні величини та їх вимірювання

Фізична величина – це кількісна міра процесу або властивостей тіла.

У процесі фізичного експерименту ми повинні виміряти фізичну величину, тобто порівняти її з іншою фізичною величиною, прийнятою за одиницю вимірювання в лабораторних умовах.

Усі вимірювання діляться на прямі та непрямі.

Прямими вимірюваннями називають такі, при яких значення фізичної величини знаходять безпосередньо за показами вимірювального приладу.

Непрямими вимірюваннями вважають такі значення фізичної величини, при яких знаходять її як функцію інших. Наприклад, вимірювання об'єму кулі знаходять за величиною діаметра; значення опору резистора – за величиною спаду напруги на ньому та струму, що протікає через нього.

Розрізняють істинне й дійсне значення фізичної величини. **Істинне значення** фізичної величини – це значення величини, яке ідеально відображає відповідну властивість об'єкта або процесу.

Дійсне значення фізичної величини – значення, яке знайдене експериментально і яке можна використовувати взамін істинного.

Відхилення результату, одержаного на досліді, від істинного значення, тобто

$$x_{\text{вим.}} - x_{\text{ист.}} = \Delta x,$$

називають похибкою окремого виміру.

Розрізняють такі похибки вимірювання: систематичні, випадкові та промахи.

Систематичні похибки – похибки, величина і знак яких від досліду до досліду зберігаються або змінюються закономірно. Їх можна поділити на декілька груп:

1. Похибки, природа і величина яких відома; їх можна врахувати введенням поправок.
2. Похибки відомого походження, але невідомої величини.
3. Похибки, про існування яких ми не здогадуємось.

Повторні вимірювання не зменшують вклад систематичних похибок.

Випадкові похибки – похибки, величина і знак яких змінюються непередбаченим чином від досліду до досліду. Випадкові похибки, як правило, зумовлені одночасною дією різних факторів, характер впливу яких на результат вимірювання з часом змінюється, що приводить до одержання різних значень вимірюваної величини.

Промахи – отримані значення вимірюваної величини, які суттєво відрізняються від очікуваного. Уникнути їх можна, виконавши повторні виміри. На цей вид похибок не зважають.

У лабораторних умовах беруть до уваги чотири види похибок вимірювання фізичної величини; поправки на систематичні, випадкові, похибки приладу та похибки округлення.

Визначення похибок при прямих вимірюваннях

Знаходження дійсного значення фізичної величини, яка найбільш наближена до істинного значення, ґрунтується на відомій теоремі з теорії імовірності, що границя середнього значення випадкової величини, яка підкоряється розподілу Гауса, при прямуванні числа вимірів n до ∞ прямує до істинного значення фізичної величини.

Середнє значення фізичної величини знаходимо за формулою:

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{n} = \frac{1}{n} \sum A_i.$$

Кожне значення вимірювання потрібно повторити декілька раз.

Різницю між середнім значенням \bar{A} вимірюваної величини й значенням A_i , отриманих при окремих вимірах, називають **похибками окремого виміру**:

$$\bar{A} - A_i = \Delta A_i.$$

Похибка окремого виміру може бути як додатна, так і від'ємна.

При обрахунках визначають **середню абсолютну похибку вимірюваної фізичної величини**, тобто

$$\Delta A = \frac{|\Delta A_1| + |\Delta A_2| + \dots + |\Delta A_n|}{n} = \frac{\sum |\Delta A_i|}{n}.$$

Мірою точності вимірюваної фізичної величини є відносна похибка, яка визначається відношенням середньої абсолютної похибки виміру до середнього значення:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A}.$$

Цю величину виражають, в основному, у відсотках:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%.$$

Істинне значення фізичної величини знаходиться в інтервалі $\bar{A} - \Delta A \leq A \leq \bar{A} + \Delta A$.

Визначення похибок при вимірах зручно виконувати за такою таблицею.

Таблиця

№ виміру	A_i	ΔA_i	$\frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%$
1.	A_1	ΔA_1	
2.	A_2	ΔA_2	
3.	A_3	ΔA_3	
.....	
n	A_n	ΔA_n	
Середнє значення	$\frac{\sum A_i}{n} = \bar{A}$	$\frac{ \Delta A_i }{n} = \Delta A$	$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%$

Визначення похибок при непрямих вимірюваннях

Якщо фізична величина є функцією фізичних величин, отриманих при прямих вимірюваннях $A = A(x, y, z)$, то, згідно з відомою теоремою, її середнє значення є функцією середніх значень величин, отриманих при прямих вимірюваннях, тобто

$$\bar{A} = A(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}).$$

Середню абсолютну похибку ΔA знаходять за правилами диференціювання функції багатьох змінних, замінивши знак диференціала d значком похибки Δ і вибравши значення таким чином, щоб величина похибки була максимальною, тобто

$$dA = \frac{\partial A(x, y, z)}{\partial x} dx + \frac{\partial A(x, y, z)}{\partial y} dy + \frac{\partial A(x, y, z)}{\partial z} dz$$

i

$$\Delta A = \left| \frac{\partial A(x, y, z)}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial A(x, y, z)}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial A(x, y, z)}{\partial z} \Delta z \right|$$

У тому випадку, коли фізична величина є функцією однієї змінної, формула набуває вигляду:

$$\Delta A = \left| \frac{dA}{dx} \Delta x \right|$$

Відносну похибку оцінюємо за формулою $\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\% = \frac{\Delta A}{\phi(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})} \cdot 100\%$. Оскільки відносна похибка в граничному випадку задається виразом

$$\varepsilon = \frac{dA}{A},$$

а диференціал натурального логарифма рівний

$$d(\ln A) = \frac{dA}{A} \approx \frac{\Delta A}{A},$$

то при непрямих вимірюваннях її можна визначити за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \approx d \ln A.$$

Якщо фізична величина є функцією однієї змінної, то

$$\varepsilon \approx d[\ln A(x)] = [\ln A(x)]' dx \approx [\ln A(x)]' \Delta x.$$

Обробка результатів непрямих вимірювань фізичної величини, яка є функцією однієї змінної

Приклад 1. Вирахувати об'єм кулі діаметром D .

Для знаходження об'єму кулі скористаємось відомою формулою

$V_k = \frac{1}{6} \pi D^3$, де діаметр D отримуємо в результаті прямих вимірювань.

Результати вимірювань заносимо в таблицю.

№ п/п	D_i , (мм)	ΔD_i , (мм)	\bar{V}_k , (мм ³)	ΔV_k , (мм ³)	ε , %
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
Середнє значення	$\bar{D} =$	$\Delta D =$	$\bar{V}_k =$	$\Delta V_k =$	$\varepsilon =$

Порядок обчислення

1. Знаходимо середнє арифметичне діаметра \bar{D} за формулою

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{n}.$$

2. Обчислюємо абсолютні похибки окремих вимірів ΔD_i , і абсолютну похибку виміру діаметра ΔD .

3. Знаходимо середнє значення об'єму кулі: $\bar{V}_k = V(\bar{D}) = \frac{1}{6} \pi \bar{D}^3$.

4. Знаходимо абсолютну похибку виміру об'єму:

$$\Delta V \approx dV(D) = d\left(\frac{1}{6} \pi D^3\right) = \frac{3}{6} \pi D^2 dD \approx \frac{1}{2} \pi \bar{D}^2 \Delta D.$$

5. Знаходимо відносну похибку отриманого результату згідно з формулою:

$$\begin{aligned} \varepsilon &\approx d \ln V(D) = (\ln V(D))' dD \approx \left[\ln\left(\frac{1}{6} \pi D^3\right) \right]' dD = \left(\ln \frac{1}{6} + \ln \pi + 3 \ln D \right)' dD = \\ &= \left(0 + 0 + 3 \frac{1}{D} \right) dD. \end{aligned}$$

Прийнявши $D = \bar{D}$, а $dD \approx \Delta D$, одержимо робочу формулу для знаходження відносної похибки:

$$\varepsilon = \frac{3}{\bar{D}} \Delta D.$$

6. Кінцевий результат запишемо у вигляді

$$\bar{V} - \Delta V \leq V \leq \bar{V} + \Delta V.$$

Обробка результатів вимірювання фізичної величини, яка є функцією багатьох змінних

Приклад 2. Продемонструємо цей випадок на прикладі знаходження величини опору за спадом напруги на ньому та струму, який протікає в ньому.

Величини U_i та I_i , отримані прямими вимірюваннями, заносимо в таблицю.

Таблиця

№ п/п	U_i (В)	ΔU_i (В)	I_i (А)	ΔI_i (А)	\bar{R} , (Ом)	ΔR , (Ом)	ε , %
1.							
2.							
3.							
....							
n							
Середнє значення	$\bar{U} = \frac{\sum U_i}{n}$	$\Delta U = \frac{\sum \Delta U_i}{n}$	$\bar{I} = \frac{\sum I_i}{n}$	$\Delta I = \frac{\sum \Delta I_i}{n}$	$\bar{R} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}}$	$\Delta R =$	$\varepsilon =$

Порядок обчислення

1. Знаходимо середнє арифметичне вимірної напруги та величину струму:

$$\bar{U} = \frac{\sum U_i}{n}, \quad \bar{I} = \frac{\sum I_i}{n}.$$

2. Знаходимо значення похибок окремих вимірів ΔU_i та ΔI_i і відповідні абсолютні похибки.

3. Обчислюємо середнє значення опору $\bar{R} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}}$.

4. Виводимо формулу для знаходження абсолютної похибки вимірюваного опору:

$$\begin{aligned} dR(I, U) &= \frac{\partial R(I, U)}{\partial I} dI + \frac{\partial R(I, U)}{\partial U} dU = \frac{\partial}{\partial I} \left(\frac{U}{I} \right) dI + \frac{\partial}{\partial U} \left(\frac{U}{I} \right) dU = \\ &= -\frac{U}{I^2} dI + \frac{1}{I} dU. \end{aligned}$$

Замінюємо диференціали на прирости фізичної величини, мінуси на плюси. В отриманій формулі для знаходження ΔR значення струму і напруги замінюємо відповідними середніми значеннями.

$$\Delta R = \frac{\bar{U}}{\bar{I}^2} \Delta I + \frac{\Delta U}{\bar{I}}.$$

5. Знаходимо відносну похибку $\varepsilon = \frac{\Delta R}{\bar{R}} \cdot 100\%$.

Зауваження. Пункти 4 та 5 можна виконати таким чином.

4.1. Знаходимо вираз для обчислення відносної похибки, згідно з наближеною формулою $\varepsilon \approx d \ln R(U, I)$:

$$\begin{aligned} \text{а) } & \text{логарифмуємо розрахункову формулу } \ln R(U, I) = \ln \left(\frac{U}{I} \right) = \\ & = \ln U - \ln I \text{ і диференціюємо її } d \ln R(U, I) = d \ln U - d \ln I = \frac{dU}{U} - \frac{dI}{I}; \end{aligned}$$

б) замінюємо всі мінуси на плюси, диференціали d міняємо на прирости Δ , а значення U та I – на їх середні. В отриману формулу $\varepsilon = \frac{\Delta U}{\bar{U}} + \frac{\Delta I}{\bar{I}}$ підставляємо відповідні числові значення.

5.1. Обчислюємо абсолютну похибку ΔR за формулою:

$$\Delta R = \varepsilon \cdot \bar{R}.$$

Кінцевий результат записуємо у вигляді

$$(\bar{R} - \Delta R) \leq R \leq (\bar{R} + \Delta R).$$

1.4. Загальні вимоги до виконання лабораторних робіт

1. На першому занятті студенти знайомляться з переліком та послідовністю виконання лабораторних робіт та проходять інструктаж з техніки безпеки, про що робиться відповідний запис у спеціальному журналі.

2. Студент допускається до виконання лабораторних робіт тільки після перевірки викладачем:

- знання теоретичного матеріалу по темі лабораторної роботи;
- знання будови лабораторної установки;
- знання порядку виконання й методики обробки експериментальних даних;
- наявності протоколу виконуваної лабораторної роботи;
- наявності правильно підготовленого звіту попередньої лабораторної роботи.

3. Отримані дослідні дані заносяться в таблицю і підписуються викладачем на занятті.

4. Результати обробки експериментальних даних проводяться на занятті й подаються викладачеві.

5. По закінченню виконання лабораторної роботи необхідно вимкнути установку, прибрати робоче місце і здати лаборанту прилади та інструменти.

6. Непідготовлений студент не допускається до занять і виконує роботу в спеціально призначений час.

2. Практикум із лабораторних робіт

Лабораторна робота № 1

Вимірювання об'ємів тіл правильної форми

Мета роботи: освоїти метод лінійного ноніуса та метод мікрометричного гвинта на прикладі визначення об'ємів тіл; освоїти методику обробки результатів експерименту при непрямих вимірюваннях.

Прилади та матеріали: штангенциркуль, мікрометр, деталі для вимірювання (куля, циліндр).

Короткі теоретичні відомості

При визначенні об'ємів тіл та їх густин необхідно вимірювати їх лінійні розміри. Для підвищення точності вимірів користуються вимірювальним приладом, який побудований за принципом методу збігів.

Ноніус – невелика додаткова шкала до основної шкали вимірювального приладу, яка дає можливість підвищити точність вимірювання. Ця шкала ковзає вздовж основного масштабу (рис. 1.1).

Поділки на основній шкалі та шкалі ноніуса наносять так, що $(n - 1)$ поділка основної шкали збігається з поділкою ноніуса. Якщо $\Delta\alpha_n$ і $\Delta\alpha_m$ – відповідно ціни поділок ноніуса і основної шкали, то

$$n \cdot \Delta\alpha_n = (n - 1) \Delta\alpha_m, \quad (1)$$

звідки точність ноніуса, тобто різницю ціни поділок ноніуса та основної шкали можна визначити так:

$$n \cdot \Delta\alpha_n = n \cdot \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_m. \quad (2)$$

Розділимо рівність на n :

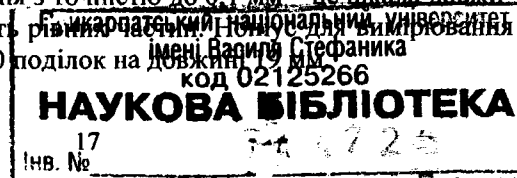
$$\Delta\alpha_n = \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_m / n,$$

звідки маємо:

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_n = \Delta\alpha_m / n. \quad (3)$$

Точність ноніуса рівна відношенню ціни найменшої поділки основної шкали до числа поділок ноніуса.

Ноніус для вимірювання з точністю до 0,1 мм – це шкала довжиною 9 мм, поділена на десять рівних частин. Ноніус для вимірювання з точністю до 0,05 мм має 20 поділок на довжину 9 мм.



Штангенциркуль – прилад для вимірювання лінійних розмірів з точністю від 0,1 до 0,02 мм. Будова зображена на рис. 1.1.

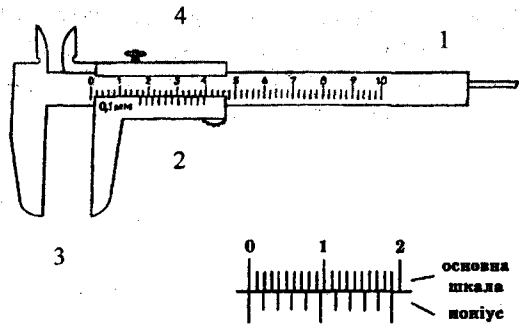


Рис. 1.1
1 – стальна лінійка з міліметровими поділками;
2 – рамка з ноніусом;
3 – ніжки;
4 – гвинт

Мікрометр – прилад для вимірювання лінійних розмірів із точністю до 0,01 мм. Будова зображена на рис. 1.2.

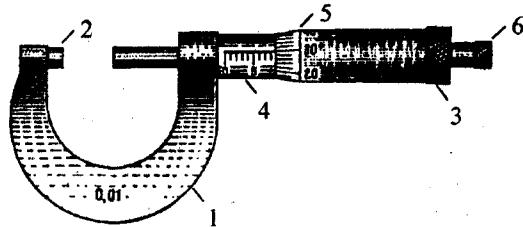


Рис. 1.2
1 – стальна скоба;
2 – нерухома опорна п'ята;
3 – мікрометричний гвинт;
4 – стебло з основною шкалою;
5 – обід барабана з поділками;
6 – тріскачка

Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступальне переміщення, яке пропорційне куту повороту. Деталь затискається лише п'ятою та мікрометричним гвинтом.

По шкалі стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. Відлік сотих часток мілі-

метра здійснюють за поділками на барабані.

Порядок виконання роботи

I. Визначення об'єму кулі.

Об'єм кулі визначаємо за формулою:

$$V_k = \frac{\pi D^3}{6}, \quad (4)$$

де D – діаметр кулі.

1. Мікрометром провести ряд вимірів діаметра кулі. Визначити середнє значення діаметра \bar{D} та абсолютну похибку ΔD . У випадку незмінних значень вимірів діаметра кулі абсолютна похибка рівна похибці мікрометра. Отримані дані записати в таблицю 1.

2. За формулою

$$\bar{V}_k = \frac{\pi \bar{D}^3}{6} \quad (5)$$

визначити середнє значення об'єму кулі.

3. Абсолютну похибку визначення об'єму кулі знаходимо за формулою

$$\Delta V_k = \frac{3\pi \bar{D}^2}{6} \Delta D. \quad (6)$$

4. Відносну похибку вимірювання об'єму кулі проводять відповідно до формули

$$\varepsilon = \frac{\Delta V_k}{\bar{V}_k} \cdot 100\%. \quad (7)$$

II. Визначення об'єму циліндра.

Середнє значення об'єму циліндра

$$\bar{V}_y = \frac{\pi \bar{D}^2 \bar{H}}{4}, \quad (8)$$

де \bar{H} – середнє значення висоти циліндра,

\bar{D} – середнє значення його діаметра.

Абсолютну похибку ΔV_y знаходимо за формулою

$$\Delta V_y = \frac{\pi \bar{H} \bar{D} \Delta D}{2} + \frac{\pi \bar{D}^2 \Delta H}{4}, \quad (9)$$

де ΔD – абсолютна похибка вимірювання діаметра циліндра,

ΔH – абсолютна похибка вимірювання висоти циліндра.

1. З допомогою штангенциркуля провести ряд повторних вимірювань діаметра D та висоти H циліндра. Знайти їх середнє значення та, відповідно, абсолютні похибки. Результати записати в таблиці 2.

2. За формулою (8) визначити середнє значення об'єму циліндра.
3. За формулою (9) визначити абсолютну похибку визначення об'єму.
4. Оцінити відносну похибку виміру об'єму за формулою (10):

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{V}_y}{\bar{V}_y} \cdot 100\% \quad (10)$$

Таблиця 1

№ п/п	D_i (мм)	ΔD_i (мм)	V_k (мм ³)	ΔV_k (мм ³)	ε (%)
1.					
2.					
3.					
	$\bar{D}_i =$	$\Delta \bar{D}_i =$	$\bar{V}_k =$	$\Delta \bar{V}_k =$	$\varepsilon =$

Таблиця 2

№ п/п	D_i (мм)	ΔD_i (мм)	H_i (мм)	ΔH_i (мм)	V_y (мм ³)	ΔV_y (мм ³)	ε (%)
1.							
2.							
3.							
	$\bar{D}_i =$	$\Delta \bar{D}_i =$	$\bar{H}_i =$	$\Delta \bar{H}_i =$	$\bar{V}_y =$	$\Delta \bar{V}_y =$	$\varepsilon =$

Контрольні запитання

1. Будова ноніуса. Як визначити похибку ноніуса?
2. Як побудувати ноніус для підвищення точності вимірювання за даним масштабом у n разів?
3. Яка будова й правила користування штангенциркулем і мікрометром?
4. Похибки вимірювань. Випадкові, систематичні похибки та промахи.
5. Обробка результатів при прямих вимірюваннях фізичної величини.
6. Обробка результатів при непрямих вимірюваннях фізичної величини.

Література

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. проф. В. И. Ивероной. – М. : Наука, 1967. – 352 с.
3. Физический практикум / под ред. Г. С. Кембровского. – Минск : Изд-во университетское, 1986. – 352 с.
4. Практикум по курсу общей физики / Н. Н. Майсова. – М. : Высшая школа, 1970. – 448 с.

Лабораторна робота № 2

Зважування тіл на аналітичних терезах

Мета роботи: оволодіти методикою зважування тіл на аналітичних терезах.

Прилади та матеріали: аналітичні терези, важки густиною $\rho_1 = 2,7 \text{ г/см}^3$, тіла для зважування (свинцеві дробинки густиною $\rho_2 = 11,4 \text{ г/см}^3$).

Короткі теоретичні відомості

Будова аналітичних терезів

Основою аналітичних терезів є коромисло, в середині якого закріплена агатова призма. Агатова призма опирається на плоску агатову подушку, яка кріпиться зверху колони. На кінцях коромисла, на однаковій відстані від середини розміщені ще дві призми, на які підвішені чашки.

Ваги забезпечені аретиром, який дозволяє коромисло і чашки підняти вгору й вивести призми з дотику з відповідними подушками. Аретир приводиться в дію за допомогою гвинта, розміщеного під плитою.

Для зважування тіл на аналітичних терезах використовують набір гир масою від 100 г до 10 мг. Зважування з більшою точністю забезпечується застосуванням рейтера – дротинки-гирі, яку розміщують зверху на одне з плеч коромисла. Якщо вона розміщена на першій поділці коромисла, то ним створюється момент сили, еквівалентний навантаженню в 1 мг, що знаходиться в чашці. Переміщення рейтера виконується спеціальним стержнем, який керується відповідною ручкою. Аналітичні ваги дозволяють зважувати тіла, що не перевищують певну граничну масу, вказану в паспорті терезів.

Більшість терезів для збільшення згасання коливань стрілки забезпечені демпферним пристроєм.

Стрілки терезів рухаються над шкалою з відрахунком від 0 до 10 мг в обидві сторони. У деяких терезах шкала розміщена на кінці стріли й проектується на екран за допомогою підсвічування оптичним пристроєм, який звуть вейтографом.

Коротка теорія зважування тіл на аналітичних терезах

Зважування тіл на аналітичних терезах ґрунтується на рівності нулю моментів сил, які діють на коромисло. Нехай на одне плече коромисла підвішений вантаж із невідомою масою m_1 , а на інше – еталон маси m_2 . Тоді умова рівноваги коромисла виразиться формулою:

$$(P_1 - F_{A1})l_1 - (P_2 - F_{A2})l_2 = 0, \quad (1)$$

де P_1 – вага тіла,

P_2 – вага рівноваг,

F_{A1} і F_{A2} – сили Архімеда, які діють відповідно на вантаж і рівноваги,

l_1 і l_2 – плечі коромисла.

З рівняння (1) знаходимо масу зважуваного тіла:

$$(m_1 g - F_{A1})l_1 = (m_2 g - F_{A2})l_2,$$

звідки

$$m_1 = m_2 \frac{l_2}{l_1} + \frac{F_{A1}l_1 - F_{A2}l_2}{gl_1}. \quad (2)$$

Враховуючи рівноплечість аналітичних терезів, вираз (2) набуде вигляду:

$$m_1 = m_2 + \frac{\Delta P_A}{g},$$

$$\text{де } \Delta P_A = F_{A1} - F_{A2}.$$

Оскільки ідеально рівноплечих терезів не існує, то в результаті зважування вноситься деяка похибка, яку можна усунути застосуванням спеціальних способів зважування.

Визначення поправки на дію сили Архімеда

Для рівноплечих терезів, коли густина речовин зважування тіла та рівноваг відрізняються, умова рівноваги коромисла настає не при рівності мас тіла і гирьки, а при умові рівності ваги тіла і сили Архімеда:

$$P_1 - V_1 \rho_n g = P_2 - V_2 \rho_n g, \quad (3)$$

де P_1 – вага тіла у вакуумі,

P_2 – вага гирьки у вакуумі,
 V_1 – об'єм тіла,
 V_2 – об'єм гирьки,
 ρ_n – густина повітря,

$$V_1 = \frac{m_1}{\rho_1}, V_2 = \frac{m_2}{\rho_2}, \quad (4)$$

де m_1 і ρ_1 – відповідно маса і густина зважуваного тіла,

m_2 і ρ_2 – відповідно маса і густина гирьки.

Підставивши (4) у (3), отримаємо:

$$m_1 g - \frac{m_1}{\rho_1} \rho_n g = m_2 g - \frac{m_2}{\rho_2} \rho_n g$$

або

$$m_1 \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_1} \right) = m_2 \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_2} \right),$$

звідки

$$m_1 = m_2 \frac{1 - \frac{\rho_n}{\rho_2}}{1 - \frac{\rho_n}{\rho_1}}. \quad (5)$$

За малістю величин $\frac{\rho_n}{\rho_1}$ і $\frac{\rho_n}{\rho_2}$ можна записати

$$m_1 = m_2 \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_2} \right) \left(1 + \frac{\rho_n}{\rho_1} \right). \quad (6)$$

Або, перемноживши, дістанемо

$$m_1 = m_2 \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_2} + \frac{\rho_n}{\rho_1} - \frac{\rho_n^2}{\rho_1 \rho_2} \right). \quad (7)$$

Оскільки $\frac{\rho_n^2}{\rho_1 \rho_2}$ дуже мала величина і нею можна знехтувати, то

$$m_1 = m_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_n}{\rho_1} - \frac{\rho_n}{\rho_2} \right) \right). \quad (8)$$

Величина $\Delta m = m_2 \left(\frac{\rho_n}{\rho_1} - \frac{\rho_n}{\rho_2} \right)$ – поправка на дію Архімедової сили.

Ураховуючи, що густина повітря при кімнатній температурі $\rho_n = 0,0012 \text{ г/см}^3$, маса тіла визначиться формулою:

$$m_1 = m_2 + m_2 \cdot 0,0012 \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right). \quad (9)$$

Правила зважування на аналітичних терезах

1. Розміщуємо зважуване тіло і гирьки тільки на аретированих терезах.
2. Гирьки брати й розміщувати на чашки терезів пінцетом.
3. Зважуване тіло і рівноваги розміщують так, щоб їх центри ваги по можливості збігались із центрами чашок.
4. Тіло кладуть на ліву, а гирьки – на праву чашки.
5. Не потрібно повністю звільняти коромисла аретиром, поки чашки ще мало врівноважені.
6. Звільняти й аретирувати коромисло необхідно завжди повільно й плавно.
7. Зупиняти коливання чашок терезів необхідно досить обережно, краще – листком паперу.
8. Після закінчення зважування терези обов'язково потрібно аретирувати, зняти навантаження й закрити футляр.

Порядок зважування тіл на аналітичних терезах

- I. Визначити нульову точку терезів.
- II. Провести зважування тіла.
- III. Визначити чутливість навантажених терезів.

I. Визначити нульову точку.

Для визначення нульової точки необхідно взяти три максимальні значення відхилення стрілки вліво і два – вправо. Тоді розміщення нульової точки знаходять так:

$$a_{0i} = \frac{\frac{a_1 + a_3 + a_5}{3} + \frac{a_2 + a_4}{2}}{2}$$

а середнє значення – із трьох вимірів:

$$a_0 = \frac{a_{01} + a_{02} + a_{03}}{3}$$

Результати виміру заносять у таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Відхилення стрілки		Нульове положення
	ліворуч	праворуч	
1.	$a_1 =$ $a_3 =$ $a_5 =$	$a_2 =$ $a_4 =$	$a_{01} =$
2.	$a_1 =$ $a_3 =$ $a_5 =$	$a_2 =$ $a_4 =$	$a_{02} =$
3.	$a_1 =$ $a_3 =$ $a_5 =$	$a_2 =$ $a_4 =$	$a_{03} =$

II. Зважити тіло з точністю до міліграма. Знайти середнє значення точки рівноваги при навантаженні терезів. Середнє значення точки рівноваги визначають із трьох вимірів.

Середнє значення $a' = \frac{a_1' + a_2' + a_3'}{3}$

III. Визначити чутливість навантажених терезів.

1. На праву чашку (або використовуючи рейтер) додатково навантажити терези масою 1 мг.

2. Методом коливань знайти положення точки рівноваги.

Результати виміру заносять у таблицю 3.

Таблиця 2

№ п/п	Відхилення стрілки		Положення точки рівноваги при навантаженні терезів	Маса важків
	ліворуч	праворуч		
1.	$a_1 =$	$a_2 =$	$a_1' =$	
	$a_3 =$	$a_4 =$		
	$a_5 =$			
2.	$a_1 =$	$a_2 =$	$a_2' =$	
	$a_3 =$	$a_4 =$		
	$a_5 =$			
3.	$a_1 =$	$a_2 =$	$a_3' =$	
	$a_3 =$	$a_4 =$		
	$a_5 =$			

Таблиця 3

№ п/п	Відхилення стрілки		Положення точки рівноваги при донавантаженні терезів масою 1 мг
	ліворуч	праворуч	
1.	$a_1 =$	$a_2 =$	$a_1'' =$
	$a_3 =$	$a_4 =$	
	$a_5 =$		
2.	$a_1 =$	$a_2 =$	$a_2'' =$
	$a_3 =$	$a_4 =$	
	$a_5 =$		
3.	$a_1 =$	$a_2 =$	$a_3'' =$
	$a_3 =$	$a_4 =$	
	$a_5 =$		

Середнє значення точки рівноваги терезів знаходимо за формулою:

$$a'' = \frac{a_1'' + a_2'' + a_3''}{3}$$

3. Визначити чутливість навантажених терезів:

$$\omega = \frac{a' - a''}{1\text{мг}} = (a' - a'') (\text{мг}^{-1}).$$

Чутливість указує, на скільки поділок переміщує стрілку маса в 1 мг.

4. Знайти ціну однієї поділки на шкалі:

$$\nu = \frac{1}{a' - a''} (\text{мг}).$$

IV. Знайти поправку на недовантаження при зважуванні тіла, яке зумовлене відхиленням стрілки при рівновазі навантажених терезів від нульової точки ненавантажених терезів.

$$\Delta m = (a' - a_0) \cdot \nu = \frac{a' - a_0}{a' - a''}.$$

V. Знайти масу зважуваного тіла:

$$M = m + \Delta m,$$

де m – маса важків при зважуванні тіла.

VI. Знайти масу тіла, врахувавши дію виштовхувальної сили повітря:

$$M' = M + M \cdot 0,0012 \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right),$$

де ρ_1 і ρ_2 – відповідно, густини зважуваного тіла і гирьки.

Контрольні запитання

1. Будова аналітичних терезів і теорія зважування тіл на них.
2. Чутливість терезів.
3. Методика точного зважування тіл за допомогою аналітичних терезів:
 - а) метод двійного зважування (метод Гауса);
 - б) метод тарування (метод Борда);
 - в) метод постійного навантаження (метод Менделєєва).
4. Вивести робочу формулу для визначення маси зважуваного тіла:

$$M' = M + M \cdot 0,0012 \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right).$$

Література

1. Дуценко В. П. Фізичний практикум / В. П. Дуценко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
2. Загальна фізика: лабораторний практикум / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
3. Практикум по общей физике / под. ред. проф. В. Ф. Ноздрева. – М. : Просвещение, 1971. – 312 с.

Лабораторна робота № 3

Вивчення законів кінематики і динаміки поступального руху на машині Атвуда

Мета роботи: перевірити закони рівноприскореного руху та другий закон динаміки.

Прилади та матеріали: машина Атвуда ФМ 11, секундомір.

Короткі теоретичні відомості

Машина Атвуда дає змогу забезпечити рівномірний та рівноприскорені рухи тягарців, а також виміряти проміжки часу, протягом яких тягарці проходять задані відстані при рухах. Будова машини Атвуда зображена на рис. 3.1.

- 1 – вертикальний стовп;
- 2 – легкий алюмінієвий блок;
- 3 – “невагома” нитка;
- 4 – вантажі однакової маси;
- 5 – додаткові вантажі;
- 6 – суцільна підставка

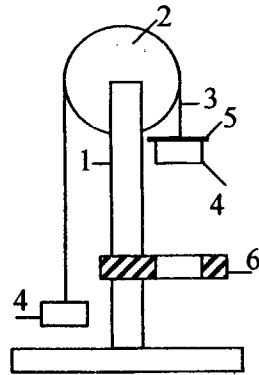


Рис.3.1.

У комплекті установки є додаткові тягарці, якими користуються для приведення системи в рівноприскорений рух.

Розглянемо рух системи, яка складається з двох вантажів (рис. 3.1), маса кожної з яких M , і блока, який будемо вважати невагомим. Якщо на один із них покладемо тягарець масою m і система пройде відстань x , то, згідно з законом збереження і перетворення механічної енергії, нехтуючи силами тертя, отримаємо:

$$(F_n - Mg)S + [(M + m)g - F_n]S = \left(\frac{2M + m}{2}\right)v^2, \quad (1)$$

$$mgS = \frac{2M + m}{2}v^2. \quad (2)$$

Прийнявши до уваги, що $v^2 = 2aS$, з (2) отримаємо формулу (3) для прискорення системи:

$$a = \frac{m}{2M + m}g = \frac{1}{\frac{2M}{m} + 1}g. \quad (3)$$

З формули (3) випливає, що збільшення маси додаткового тягарця приводить до збільшення прискорення системи.

Порядок виконання роботи

I. Перевірка закону шляху: $S = \frac{at^2}{2}$.

1. Ввімкнути струм у колі електромагніта, що забезпечить утримування вантажів. На правий вантаж покласти тягарець масою m .

2. Підставку 6 встановити на певній відстані S_i від правого вантажу. Розімкнути коло електромагніта, в результаті чого одночасно запускається секундомір, який і вимірює час проходження відстані S_i . Результати вимірів заносимо в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	S (м)	t_{11} (с)	t_{21} (с)	t_{31} (с)	t_c (с)	a (м/с ²)	g (м/с ²)	ε %
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

3. Для фіксованих S_i при однаковій масі тягарця виміряти t_i як середнє із трьох вимірювань. Прискорення системи в усіх трьох випадках буде однаковим. Перевірити виконання співвідношення

$$a = \frac{2S_1}{t_1^2} \approx \frac{2S_2}{t_2^2} \approx \dots \approx \frac{2S_n}{t_n^2}. \quad (4)$$

4. Знайти середнє значення \bar{a} і визначити прискорення вільного падіння за формулою:

$$g_c = \bar{a}(2M + m) / m. \quad (5)$$

5. Порівняти теоретичне й експериментальне значення прискорення вільного падіння, визначити відносну похибку за формулою:

$$\varepsilon = [(g_e - g_T) / g_T] \cdot 100\%. \quad (6)$$

II. Перевірка другого закону Ньютона: $F = ma$.

1. Якщо маса m додаткового вантажу складається з кількох тягарців, то, перекладаючи тягарці з правої сторони на ліву, ми цим самим забезпечимо рух системи незмінної маси M' з різним прискоренням.

Можна показати, що система масою M' рухатиметься під дією сили

$$F = (m_1 - m_2)g = (m_1 + m_2)a = M'a, \quad (7)$$

де m_1 – маса правого тягарця, m_2 – маса лівого тягарця.

Якщо зі зміною мас змінювати відстань, яку проходить система, то в цьому випадку будемо мати

$$F_1 = M'a_1, \quad F_2 = M'a_2 \quad (8)$$

та

$$S_1 = \frac{1}{2}a_1t_1^2 \text{ і } S_2 = \frac{1}{2}a_2t_2^2. \quad (9)$$

Поділивши рівняння (8) і (9), матимемо:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2} \text{ і } \frac{S_1}{S_2} = \frac{a_1t_1^2}{a_2t_2^2}, \quad (10)$$

звідси випливає:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1t_2^2}{S_2t_1^2}.$$

Правильність цього співвідношення необхідно перевірити.

2. Замкнемо коло електромагніта. Покладемо на правий вантаж систему тягарців масою m , забезпечивши цим самим масу системи величиною M' . На певній відстані S_i від правого вантажу закріпимо суцільну підставку.

3. Розімкнувши коло електромагніта, вимірюємо час проходження системою відстані S_i як середнє із трьох вимірювань.

4. Змінюючи масу вантажів, перекладаючи тягарці з правої на ліву сторону машини Атвуда, залишаючи незмінною масу системи, проводимо вимірювання часу проходження відстані S_i , яку також змінюємо при i -му досліді. Результати вимірів заносимо в таблицю 2.

Таблиця 2

$M' = m_1 - m_2$ (кг)	$F = M'g$ (Н)	S (м)	t (с)	$\frac{F_1}{F_2}$	$\frac{S_1t_{2c}^2}{S_2t_{1c}^2}$
	$F_1 =$	$S_1 =$	$t_1 =$		
			$t_2 =$		
			$t_3 =$		
			$t_{1c} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} =$		
	$F_2 =$	$S_2 =$	$t'_1 =$		
			$t'_2 =$		
			$t'_3 =$		
			$t_{2c} = \frac{t'_1 + t'_2 + t'_3}{3} =$		

5. Перевіряємо наближене виконання співвідношення

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2}$$

Контрольні запитання

1. Кінематичні величини, які характеризують поступальний рух тіла (вектор переміщення, вектор швидкості, вектор прискорення).
2. Прямолінійний рівномірний та рівноприскорений рухи. Рівняння руху у векторній та скалярній формах.
3. Закони динаміки матеріальної точки.

Література

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. проф. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.
3. Дущенко В. П. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка / В. П. Дущенко, І. М. Кучерук. – К. : Вища школа, 1987. – 432 с.
4. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1986. – 320 с.

Лабораторна робота № 4

Визначення модуля Юнга за допомогою деформації розтягу

Мета роботи: дослідити пружні властивості тіла й визначити фізичні величини, що характеризують ці властивості.

Прилади та матеріали: стальна дротина, набір тягарців, оптичний мікромметр, штангенциркуль.

Короткі теоретичні відомості

Зміну розмірів і форми тіла під дією зовнішніх сил називають деформацією. Якщо після припинення дії зовнішньої сили тіла повертаються у вихідний стан, то таку деформацію називають пружною.

Усі види деформації можуть бути зведені до деформацій стиску (розтягу) і зсуву, що одночасно протікають.

Однією з характеристик деформації розтягу є нормальна напруга σ_n , яка чисельно рівна пружній силі, що припадає на одиницю площі ΔS перерізу тіла, нормального до дії сили:

$$\sigma_n = \frac{\Delta F_n}{\Delta S} \quad (1)$$

Згідно із законом Гука, відносна деформація

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \sigma, \quad (2)$$

де Δl – абсолютне видовження, яке рівне $l - l_0$,

α – коефіцієнт пружності,

l_0 – початкова довжина дротини.

Величину, обернену коефіцієнту пружності $E = \frac{1}{\alpha}$, називають модулем пружності, або модулем Юнга. Якщо відносну деформацію позначити $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$, то закон Гука для деформації розтягу можна записати так:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{\Delta F_n}{\Delta S} = \frac{\sigma_n}{E}, \quad \text{або } \sigma_n = E \varepsilon. \quad (3)$$

З формули видно, що модуль Юнга дорівнює напрузі, при якій абсолютне видовження тіла рівне його початковій довжині ($\Delta l = l$).

У випадку, коли тіло має форму циліндра діаметром d , то його площа поперечного перерізу

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

Тоді

$$E = \frac{4\Delta F_n l}{\pi d^2 \Delta l}, \quad (4)$$

де $\Delta F_n = P$ – вага тягарця.

За формулою (4) визначаємо модуль Юнга за деформацією розтягу.

Прилад для визначення модуля Юнга зображено на рис. 4.1. Досліджувана сталевий дратинка 1 довжиною $l = 1,4$ м закріплена на кронштейні. Деформація розтягу здійснюється під дією тягарців 4. З метою усунення прогину кронштейна на величину деформації кронштейн навантажують тягарцями 6 через посередництво двох дротин 2.

При дослідженні тягарці 4 перекладають на місце тягарців 6, змінюючи тільки навантаження дротин, не міняючи загального навантаження на кронштейн. Абсолютне видовження дротини визначають за допомогою мікрометра 5.

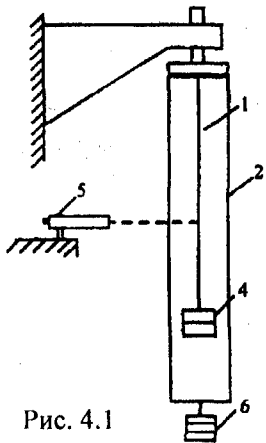


Рис. 4.1

Порядок виконання роботи

1. Виміряти діаметр дротини 1 в кількох місцях. Обчислити його середнє значення.
2. Виставити мітку на дротині до збігу її із середнім значенням шкали оптичного мікрометра 5.
3. Навантажити дротину одним тягарцем і виміряти абсолютне видовження Δl_1 , потім другий тягарець – Δl_2 і т. д.

4. Розвантажуючи дротину поступово по одному тягарцю, записати відповідно значення $\Delta l_3, \Delta l_2, \Delta l_1$.

5. Отримані значення $\Delta l_1'$ і $\Delta l_1''$ занести в таблицю 1. Обчислити середні значення абсолютного видовження

$$\Delta l_i = \frac{\Delta l_1' + \Delta l_1''}{2}$$

та відповідні значення модуля Юнга

$$E = \frac{4P_i l}{\pi d_c^2 \Delta l_i}$$

6. Визначити похибки вимірювання модуля Юнга.

Таблиця 1

№ п/п	d (м)	P_i (Н)	$\Delta l_1'$ (м)	$\Delta l_1''$ (м)	Δl_i (м)	$E_i, \left(\frac{H}{M^2}\right)$	$\Delta E_i, \left(\frac{H}{M^2}\right)$	ε (%)
1.								
2.								
3.								
	$\bar{d} =$	\times	\times	\times	\times	$\bar{E} =$	$\Delta E =$	$\varepsilon =$

Контрольні запитання

7. Пружна деформація розтягу та її характеристики.
8. Закон Гука для деформації розтягу.
9. Довести, що при деформації розтягу (стиску) об'єм тіла змінюється.
10. Проаналізувати діаграму розтягу.

Література

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. проф. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.
3. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1975. – 424 с.

Лабораторна робота № 5

Визначення модуля зсуву методом коливань

Мета роботи: освоїти методику визначення модуля зсуву методом коливань.

Прилади та матеріали: крутильний маятник, секундомір, лінійка, мікрометр.

Короткі теоретичні відомості

Якщо дrottину або стержень, закріплені з однієї сторони, закручувати, приклавши до другого кінця момент пари сил M , то кут закручування, згідно із законом Гука, рівний

$$\varphi = kM, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Величину, обернену до k , називають модулем кручення:

$$G = \frac{1}{k}.$$

Тоді закон Гука для деформації кручення можна записати:

$$M = G\varphi. \quad (2)$$

Закон Гука для деформацій зсуву має вигляд:

$$\gamma = \frac{\sigma_\tau}{N}, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\alpha}{b} = \operatorname{tg} \gamma \approx \gamma$$

де γ – відносний зсув (рис. 5.1),

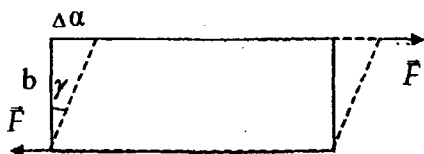


Рис. 5.1

$\sigma_\tau = \frac{F}{S}$ – дотична напруга;
 N – модуль зсуву,
 S – площа поперечного перерізу паралелепіпеда.

Зв'язок між модулем кручення G і модулем зсуву визначається формулою:

$$G = \frac{N\pi r^4}{2L}, \quad (4)$$

де r – радіус дrottини, L – її довжина.

Визначення модуля зсуву методом коливань ґрунтується на залежності періоду коливань маятника на дrottині (рис. 5.2) від пружних властивостей матеріалу, з якої її виготовлено.

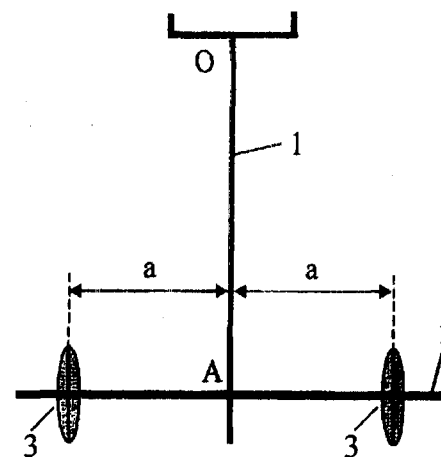


Рис. 5.2

Маятник складається із циліндричної дrottини 1, жорстко закріпленої в т. O . До нижнього кінця дrottини в т. A прикріплено горизонтальну рейку 2 із двома симетрично розміщеними тягарцями 3 масами m ($m=1,2$ кг).

Період вільних коливань крутильного маятника виражається співвідношенням:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{G}}, \quad (5)$$

де I – момент інерції маятника відносно осі OA .

Момент інерції розглядуваної системи відносно осі OA рівний:

$$I = I_0 + 2ma^2, \quad (6)$$

де I_0 – момент інерції горизонтальної рейки без тягарців і дrottини; $2ma^2$ – момент інерції тягарців відносно осі; a – відстань тягарців до осі обертання.

Для визначення модуля зсуву вимірюють період коливань крутильного маятника при двох різних розміщеннях тягарців на рейці:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + 2ma_1^2}{G}}; \quad (7)$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + 2ma_2^2}{G}}. \quad (8)$$

З формул (7) і (8) виключимо I_0 . Отримаємо:

$$G(T_2^2 - T_1^2) = 8\pi^2 m(a_2^2 - a_1^2),$$

звідки

$$G = \frac{8\pi^2 m(a_2^2 - a_1^2)}{(T_2^2 - T_1^2)}. \quad (9)$$

Підставивши (9) в (4), отримаємо робочу формулу для визначення модуля зсуву:

$$\frac{8\pi^2 m(a_2^2 - a_1^2)}{(T_2^2 - T_1^2)} = \frac{N\pi r^4}{2L}, \text{ звідки}$$

$$N = \frac{16\pi Lm(a_2^2 - a_1^2)}{(T_2^2 - T_1^2)r^4}. \quad (10)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти лінійкою довжину дротини від верхнього затискача до рейки.

2. Мікрометром виміряти діаметр дротини в кількох місцях та знайти середнє значення діаметра i , відповідно, середнє значення радіуса.

3. Виставити тягарці на відстані a_1 від дротини та знайти період повних коливань T_1 . Для цього рейку повернути на кут 10° і відпустити, щоб вона вільно коливалась. Виміряти час p' яти повних коливань і визначити T_1 як $T_1 = \frac{t}{5}$.

4. Виставити тягарці на відстані a_2 від дротини та знайти період повних коливань T_2 (аналогічно до T_1).

5. Результати вимірювань занести у звітну таблицю й обчислити модуль зсуву матеріалу дротини за формулою (10).

6. Оцінити похибки експерименту.

Таблиця даних, результатів вимірювань та обчислень

№ п/п	$L, \text{ м}$	$\Delta L, \text{ м}$	$a_1, \text{ м}$	$\Delta a_1, \text{ м}$	$a_2, \text{ м}$	$\Delta a_2, \text{ м}$	$T_1, \text{ с}$
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							

№ п/п	$\Delta T_1, \text{ с}$	$T_2, \text{ с}$	$\Delta T_2, \text{ с}$	$R, \text{ м}$	$\Delta R, \text{ м}$	$N, \text{ Па}$	$\Delta N, \text{ Па}$	$\varepsilon, \%$
1.								
2.								
3.								
сер. зн.								

Контрольні запитання

1. Сформулювати закон Гука та вказати основні характеристики деформації зсуву.
2. Деформація кручення.
3. Який зв'язок між модулем зсуву та модулем кручення?
4. Вивести робочу формулу для розрахунку модуля кручення циліндричної дротини методом коливань.

Література

1. Яворський Б. М. Курс фізики / Б. М. Яворський [та ін.]. – К. : Радянська школа. – Ч. 1.
2. Хайкін С. Е. Фізичні основи механіки / С. Е. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.
3. Савельєв И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
4. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1975. – 424 с.

Лабораторна робота № 6

Визначення швидкості польоту тіла за допомогою балістичного крутильного маятника

Мета роботи: ознайомитись з одним із методів практичного застосування законів збереження енергії та моменту імпульсу для механічної системи.

Прилади та матеріали: балістичний крутильний маятник, лінійка, куля.

Короткі теоретичні відомості

Схема установки зображена на рис. 6.1.

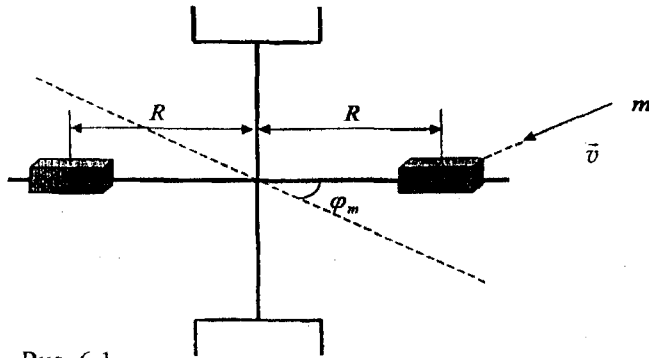


Рис. 6.1

Після пострілу куля застрягає в маятнику, і він починає коливатися навколо вертикальної осі. Вважаючи удар абсолютно непружним та нехтуючи моментом сил тертя, скористаємось законом збереження моменту імпульсу та законом збереження енергії. Закон збереження моменту імпульсу виражається формулою:

$$mvl = (I_1 + ml^2)\omega, \quad (1)$$

де m – маса кулі ($m = 2$ г), v – її швидкість, l – відстань від осі обертання маятника до точки попадання кулі, ω – кутова швидкість маятника в початковий момент обертання.

Після удару маятник набуває кінетичної енергії, яка при його обертанні перетворюється в енергію пружної деформації сталльної дротинки:

$$E_n = \frac{1}{2}G\varphi^2,$$

де G – модуль кручення, φ – кут повороту маятника.

У момент, коли кут φ набуває максимального значення, $E_k = E_n$, тобто закон збереження енергії має вигляд:

$$\frac{1}{2}(I_1 + ml^2)\omega^2 = \frac{1}{2}G\varphi^2. \quad (2)$$

З рівняння (1) та (2) отримаємо

$$v^2 = \frac{G\varphi^2}{m^2l^2}(I_1 + ml^2). \quad (3)$$

Оскільки $ml^2 \ll I_1$, то формула (3) набуде вигляду:

$$v^2 = \frac{G\varphi^2 I_1}{m^2l^2}. \quad (4)$$

Величину G знайдемо, скориставшись виразом для періоду коливань крутильного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{G}}. \quad (5)$$

Для цього, змінивши відстань між тягарцями, отримаємо:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_1}{G}}; \quad (6)$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_2}{G}}, \quad (7)$$

де T_1 і T_2 – періоди коливань, відповідно, при моментах інерції I_1 та I_2 .

Візьмемо відношення (6) до (7), з якого отримаємо:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1^2}{T_2^2}, \text{ звідки}$$

$$I_2 = \frac{T_2^2}{T_1^2} I_1. \quad (8)$$

Врахуємо, що

$$I_1 = I_2 + \Delta I. \quad (9)$$

З рівнянь (8) та (9) знайдемо I_1 :

$$I_1 = \frac{T_1^2}{T_1^2 - T_2^2} \Delta I. \quad (10)$$

З рівнянь (4), (6) та (10) знаходимо формулу для швидкості польоту кулі:

$$v = \frac{2\pi\varphi}{ml} \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} \Delta I. \quad (11)$$

Величину ΔI знайдемо, користуючись виразами

$$I_1 = I_0 + 2MR_1^2 \quad (12)$$

$$I_2 = I_0 + 2MR_2^2, \quad (13)$$

де I_0 – момент інерції маятника, коли центри ваги важків збігаються із віссю обертання маятника; I_1 – момент інерції, коли обидва важки знаходяться на відстані R_1 від осі обертання; I_2 – момент інерції, коли обидва важки знаходяться на відстані R_2 від осі обертання; M – маса важків.

Якщо $R_1 > R_2$, то

$$\Delta I = 2M(R_1^2 - R_2^2). \quad (14)$$

Врахувавши (14), формула (11) для величини швидкості кулі набуде вигляду:

$$v = \frac{4\pi\varphi M}{ml} \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} (R_1^2 - R_2^2). \quad (15)$$

Порядок виконання роботи

1. Встановити маятник так, щоб риска на мисочці показувала кут $\alpha = 0$.

2. Встановити важки на відстані R_1 від осі обертання.

3. Виконати постріл і виміряти максимальний кут відхилення маятника φ_1 .

4. Знайти період коливання T_1 , вимірявши час п'яти коливань.

5. Максимально наблизити важки до осі обертання й виміряти відстань R_2 між віссю маятника та серединою одного з важків.

6. Виконати постріл і визначити період коливань T_2 , аналогічно до знаходження T_1 .

7. Виміряні величини записати у звітну таблицю.

8. Кут φ знаходимо як середнє значення φ_1 та φ_2 .

9. За формулою (15) вирахувати величину швидкості кулі. Оцінити точність результату.

Таблиця даних, результатів вимірювань та обчислень

№ п/п	φ_1 , рад	φ_2 , рад	$\bar{\varphi}$, рад	$\Delta\varphi$, рад	l , м	Δl , м	R_1 , м	ΔR_1 , м
1.								
2.								
3.								
сер. зн.								

№ п/п	R_2 , м	ΔR_2 , м	T_1 , с	ΔT_1 , с	T_2 , с	ΔT_2 , с	v , м/с	Δv , м/с	ε , %

Контрольні запитання

1. Сформулювати закон збереження механічної енергії.
2. Сформулювати закон збереження моменту імпульсу.
3. Чому вимірювання проводяться при двох положеннях перемішуваних вантажів?
4. Вивести робочу формулу

$$v = \frac{4\pi\varphi M}{ml} \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} (R_1^2 - R_2^2).$$

Література

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под. ред. проф. В. И. Ивероной. – М. : [б. и.], 1967. – 352 с.
2. Хайкін С. Е. Фізичні основи механіки / С. Е. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
4. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М.: Просвещение, 1975. – 424 с.

Лабораторна робота № 7

Вивчення обертового руху твердого тіла

Мета роботи: визначити момент інерції та перевірити основне рівняння обертового руху твердого тіла.

Прилади та матеріали: маятник Обербека, вантажі, лінійка, штангенциркуль.

Короткі теоретичні відомості

У роботі необхідно перевірити рівняння обертового руху

$$I\epsilon = \vec{M}, \quad (1)$$

де I – момент інерції тіла, ϵ – кутове прискорення, $\vec{M} = \sum \vec{M}_i$ – векторна сума моментів сил, прикладених до тіла.

Перевірку рівняння (1) здійснюють за допомогою маятника Обербека, який складається з чотирьох стержнів і двох шківів різного радіуса, закріплених на

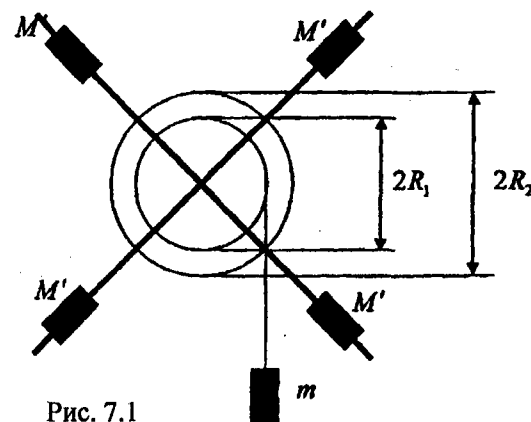


Рис. 7.1

одній горизонтальній осі. На стержнях, по одному на кожному, переміщуються і закріплюються в необхідному положенні вантажі однакової маси. Маятник обертається під дією сили натягу нитки, яка намотана на шків і до кінця якої прикріплений вантаж (рис. 7.1).

Для маятника рівняння обертового руху, при умові рівності нулю моменту сил тертя, має вигляд

$$I\epsilon = RF. \quad (2)$$

Рівняння поступального руху вантажу на нитці:

$$ma = mg - F_n. \quad (3)$$

Рівняння, яке пов'язує прискорення тіла та кутове прискорення маятника

$$a = \varepsilon R, \quad (4)$$

де R – радіус шківів, F_n – натяг нитки, a – прискорення вантажу на нитці, m – маса вантажу.

З (3) сила натягу нитки буде рівна

$$F_n = m(g - a), \quad (5)$$

а момент сили натягу, під дією якої маятник обертається,

$$M = mR(g - a). \quad (6)$$

Прискорення a визначають за відомим часом проходження тілом відстані h :

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (7)$$

Тоді

$$M = mR \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (8)$$

Якщо момент інерції маятника сталий, то при різних обертових моментах буде виконуватися співвідношення

$$I = \frac{M_1}{\varepsilon_1} \approx \frac{M_2}{\varepsilon_2} = \dots = const. \quad (9)$$

Виконання умови (9) необхідно перевірити в роботі.

Моменти сили M знаходять за формулою (8), змінюючи величину маси m . Кутове прискорення обчислюють із формули $a = \varepsilon R$, звідки з урахуванням (7) знаходимо кутове прискорення маятника ε :

$$\varepsilon = \frac{2h}{Rt^2}. \quad (10)$$

Момент інерції маятника можна знайти як суму моментів інерції хрестовини і тягарців масою M' у припущенні, що вони є матеріальними точками.

$$I = I_0 + 4M'l^2, \quad (11)$$

де I_0 – момент інерції хрестовини.

$$I_0 = 2 \cdot \frac{1}{12} m_1 L^2, \quad (12)$$

де l – відстань від осі обертання до центра мас тягарців, L – довжина хрестовини, m_1 – маса стержня ($m_1 = 102$ г), $M' = 200$ г.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти довжину стержня L і за формулою (12) визначити момент інерції I_0 .

2. Тягарці на стержнях закріпити на однакових відстанях l від осі обертання й за формулою (11) обчислити момент інерції хрестовини I .

3. Виміряти радіус шківів R .

4. Намотати нитку на шків і підвісити на ній вантаж на висоті h .

5. Ввімкнути кнопку “ПУСК” і зафіксувати час опускання важків. Повторюючи дослід 3 рази, обчислити за формулами (8) та (10) M_1 і ε_1 та їх середні значення.

6. Збільшивши масу важків на нитці, виконати вимірювання, вказані в п. 4. Знайти середні значення M_2 та ε_2 .

7. Перевірити виконання рівності (9), що підтвердить правильність основного закону динаміки обертового руху.

8. Визначити середнє значення моменту $\bar{I} = \frac{I_1 + I_2}{2}$ інерції та порівняти його зі значенням, отриманим за формулою (11).

Таблиця

	R (м)	h (м)	t (с)	M (Н·м)	ε (рад/с)	$\frac{M}{\varepsilon}$ (кг·м ²)	
$m_1 =$							$\left(\frac{M_1}{\varepsilon_1} \right) =$
$m_2 =$							$\left(\frac{M_2}{\varepsilon_2} \right) =$
							$\bar{I} =$

Контрольні запитання

1. Дати означення моменту сили, моменту імпульсу та моменту інерції тіла.
2. Вивести основне рівняння обертового руху твердого тіла.
3. Сформулювати та довести теорему Штейнера.
4. У чому полягає суть динамічного методу визначення моменту інерції?

Література

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум : навч. посібник / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Физический практикум: механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероной. – М. : Наука, 1967. – 352 с.
3. Дущенко В. П. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка / В. П. Дущенко, І. М. Кучерук. – К. : Вища школа, 1987. – 432 с.
4. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1986. – 320 с.

Лабораторна робота № 8

Визначення прискорення сили тяжіння за допомогою оборотного маятника

Мета роботи: ознайомлення з одним із методів дослідження гравітаційного поля Землі.

Прилади та матеріали: маятник універсальний ФМ-13, масштабна лінійка.

Короткі теоретичні відомості

Механічні рухи або процеси, які характеризуються певною мірою повторюваності, називають коливаннями.

Розрізняють коливання механічні, електромагнітні, електро-механічні та інші. Коливання, при яких рухи точно повторюються через рівні проміжки часу, називають періодичними. Такі коливання описуються за допомогою періодичних функцій вигляду

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де x – відстань коливної точки від положення рівноваги (зміщення), A – максимальне зміщення коливної точки від положення рівноваги – амплітуда, $(\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза коливань, φ_0 – початкова фаза, ω_0 – циклічна частота гармонічних коливань.

Період коливань коливної точки

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

Кількість коливань за секунду називають частотою:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Частоту вимірюють у герцах (Гц).

Гармонічним законом описуються так звані вільні (власні) коливання – коливання, механічна енергія яких із часом не змінюється.

Опишемо динаміку таких коливань на прикладі коливань фізичного маятника. Фізичним маятником називають тіло, яке вільно коливається навколо осі, яка не проходить через центр мас (рис. 8.1).

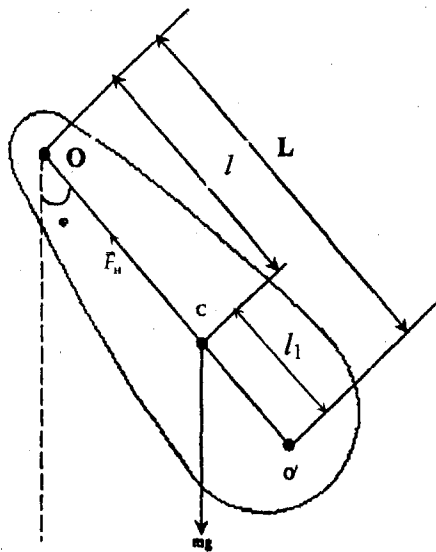


Рис. 8.1

При відхиленні маятника на кут φ виникає обертовий момент сили тяжіння $M = mgl \sin \varphi$,

де l – відстань від точки O до центра мас C .

Динамічне рівняння обертового руху запишемо, припускаючи, що тертя на осі відсутнє:

$$I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -mgl \sin \varphi, \quad (4)$$

де I – момент інерції тіла відносно горизонтальної осі, яка проходить через точку підвісу O . Для малих кутів відхилення $\sin \varphi \approx \varphi$ і рівняння набуває вигляду:

$$I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -mgl \varphi$$

або

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{mgl}{I} \varphi = 0. \quad (5)$$

Позначивши величину $\frac{mgl}{I} = \omega^2$, отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \omega_0^2 \varphi = 0. \quad (6)$$

Отримане рівняння є динамічним рівнянням фізичного маятника. Простою підстановкою можна переконатися, що розв'язком рівняння є функція

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin(\omega_0 t + \alpha_0), \quad (7)$$

тобто коливання фізичного маятника є гармонічними.

Період коливань такого маятника дорівнює:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}. \quad (8)$$

Величина $\frac{I}{ml}$ має розмірність довжини і її називають зведеною довжиною фізичного маятника:

$$L = \frac{I}{ml}. \quad (9)$$

Таким чином, період коливань фізичного маятника є функцією L і g :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (10)$$

Якщо визначити період коливань фізичного маятника T і зведену довжину маятника L , то прискорення вільного падіння можна обчислити за формулою:

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

Точку O' , яка лежить на прямій OC на відстані L від точки O , називають точкою коливань. Якщо підвісити фізичний маятник у цій точці, то його період коливань не зміниться.

Якщо точка O' – точка підвісу маятника, то в цьому випадку зведена довжина

$$L' = \frac{I'}{ml_1}. \quad (12)$$

Згідно з теоремою Штейнера,

$$I' = I_C + m(L-l)^2,$$

де I_C – момент інерції фізичного маятника відносно центра мас;

$l_1 = L-l$ – відстань у т. O' до центра мас C .

Тоді

$$L' = \frac{I_C + m(L-l)^2}{m(L-l)}.$$

Оскільки

$$L = \frac{I_C + ml^2}{ml} = \frac{I_C}{ml} + l,$$

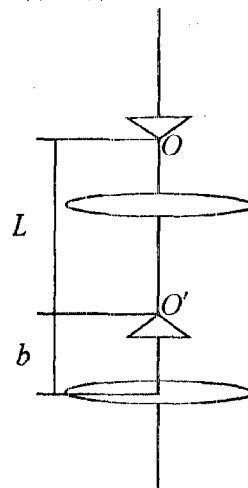


Рис. 8.2

то $L-l = \frac{I_C}{ml}$.

Тому

$$L' = \frac{I_C + m \frac{I_C}{ml_2}}{m \frac{I_C}{ml}} = l + \frac{I_C}{ml} = L.$$

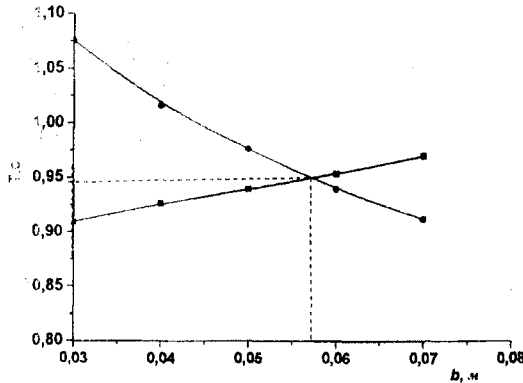


Рис. 8.3

Отже, точка підвісу і його центр коливань є взаємно спряженими. Нехай маємо фізичний маятник (рис. 8.2), в якого точки підвісу O та O' зафіксовані. Період коливань маятника навколо осі, що проходить через т. O , при переміщенні нижньої сочевиці

знизу вгору буде зменшуватися за рахунок зменшення моменту інерції.

Повернувши маятник на 180° (т. O' стає точкою підвісу), переміщуємо ту ж саму сочевицю знизу вгору на відстань l , при цьому період коливань зростатиме (рис. 8.3). Ордината точки перетинів графіків є періодом коливань оборотного маятника, а зведеною довжиною фізичного маятника відстань між ніжовими опорами L .

За формулою $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ визначають прискорення вільного падіння.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку "Маятник універсальний". Підключити фотодатчик до блока за допомогою кабеля з маркіруванням "ФМ-13".

2. Зняти фізичний (оборотний) маятник із верхнього кронштейна. Встановити нижній кронштейн із фотодатчиком у крайнє нижнє положення, так щоб площина кронштейна, помальована синім кольором, збігалася з одним із штрихів шкали.

3. Натиснути кнопку "СЕТЬ" блока. При цьому повинно ввімкнутися табло індикації.

4. Підвісити оборотний маятник на одній із призматичних опор. Вихідні положення сочевиць і ніжових опор маятника вказує викладач або лаборант.

5. Відхилити маятник на $5-6^\circ$ від положення рівноваги, відпустити його та, натиснувши кнопку "ПУСК" установки, без поштовху відпустити маятник. За показами таймера визначити значення часу 20-30 коливань маятника. Визначити середнє значення періоду коливань маятника за формулою:

$$T_1 = 2t_1/n,$$

де t_1 – повний час коливань, с;

n – число півперіодів коливань (фотодатчик реєструє кожний перетин оптичної осі маятника).

6. Пересуваючи вниз на одну поділку нижню сочевицю, для кожного положення сочевиці b визначити період коливань.

7. Повернути маятник на 180° і підвісити його на другу ніжову опору.

8. Пересуваючи верхню сочевицю вниз від верхнього кінця на одну поділку, знайти періоди коливань фізичного маятника за формулою:

$$T_2 = 2t_2/n.$$

Результати вимірювань занести в таблицю.

Таблиця 1

№ п/п	Рухома сочевиця вниз				Рухома сочевиця вгору			
	n	t_1 (с)	b (м)	T (с)	n	t_2 (с)	b (м)	T (с)
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

9. Побудувавши графіки залежностей періоду коливань T фізичного маятника від b . Визначити період коливань оборотного маятника.

10. За шкалою вертикальної стійки виміряти відстань між можливими опорами – зведену довжину L .

11. Визначити прискорення вільного падіння за формулою (11).

Контрольні запитання

1. Які маятники називають математичними, фізичними та оборотними.
2. Записати кінематичне рівняння гармонічних коливань.
3. Вивести динамічне рівняння коливань фізичного маятника.
4. Як залежить прискорення вільного падіння від географічної широти та відстані до центру Землі?

Література

1. Вінниченко В. Е. Фізичний практикум / В. Е. Вінниченко. – К. : Радянська школа.
2. Кучерук І. М. Заг. фізика: механіка, молекулярна фізика і термодинаміка / І. М. Кучерук. – К. : Вища школа, 1993. – 452 с.
3. Хайкін С. Е. Фізичні основи механіки / С. Е. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.
4. Савельєв І. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
5. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1975. – 424 с.

Лабораторна робота № 9

Визначення моменту інерції маятника Максвелла

Мета роботи: дослідити закон збереження механічної енергії на прикладі маятника Максвелла та визначити момент інерції металічних кілець.

Прилади та матеріали: маятник Максвелла ФМ-12 на фотоелементах, комплект змінних кілець із різним моментом інерції.

Короткі теоретичні відомості

Принцип роботи приладу ФМ-12 базується на основному законі

фізики – законі збереження і перетворення енергії. Механічна енергія замкнутої консервативної системи під час руху системи не змінюється. Загальний вигляд маятника Максвелла показано на рис. 9.1. Основа (1) приладу обладнана гвинтами, які дозволяють здійснити вирівнювання приладу. В основу вмонтована колонка, до якої прикріплений нерухомий верхній кронштейн (2) і рухомий нижній кронштейн. На верхньому кронштейні знаходиться електромагніт (3), фото-

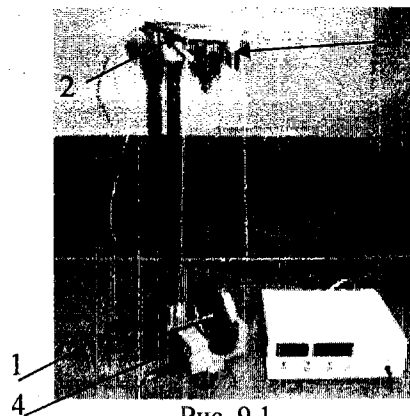


Рис. 9.1

електричний датчик і вузол підвіски (4) для закріплення й регулювання довжини біфілярної підвіски маятника. Нижній кронштейн разом із прикріпленим до нього фотоелектричним датчиком можна переміщати вздовж колонки й фіксувати в довільно вибраному положенні. Маятник (5) приладу – ролик, закріплений на осі й завішений на двох нитках (6) біфілярним способом. На ролик накладають змінні кільця, що змінюють момент інерції системи.

У верхньому положенні маятник утримується електромагнітом. Довжина маятника визначається за міліметровою шкалою на колонці приладу. Час руху маятника фіксується мілісекундоміром, включення й виключення якого здійснюються сигналами фотоелектричних датчиків.

Визначення моменту інерції маятника Максвелла. Нехай центр мас маятника Максвелла в початковий момент часу знаходиться на висоті h у стані спокою (рис. 9.2). Його потенціальна енергія $E_p = mgh$, де m – маса маятника;

$$m = m_0 + m_d + m_k, \quad (1)$$

де $m_0 = 0,019$ кг – маса осі маятника;

$m_d = 0,100$ кг – маса диска;

m_k – маса накладного кільця, кг.

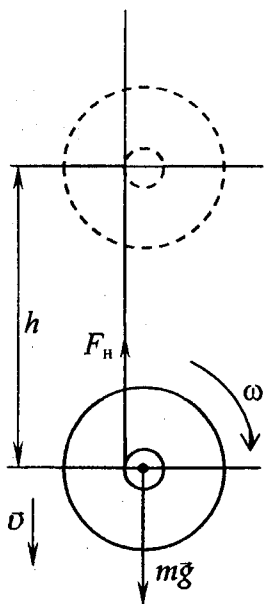


Рис. 9.2. Ілюстрація до виведення робочої формули

Після початку руху потенціальна енергія зменшується й перетворюється в кінетичну енергію поступального руху центра мас маятника $E_k = \frac{m v^2}{2}$ і кінетичну енергію обертального руху $E_{об} = \frac{I_M \omega^2}{2}$, де v – швидкість центра мас, ω – кутова швидкість обертання маятника, I_M – момент інерції маятника відносно осі, що проходить через центр мас. На висоті $h = 0$ $E_p = 0$, тоді, згідно із законом збереження механічної енергії,

$$E_p = E_k + E_{об},$$

або

$$mgh = \frac{m v^2}{2} + \frac{I_M \omega^2}{2}. \quad (2)$$

Оскільки поступальний рух центра мас є рівноприскореним, то $h = \frac{a t^2}{2}$; $a = \frac{2h}{t^2}$, де t – час руху, a – прискорення центра мас,

$$\text{тоді } v = at = \frac{2h}{t}, \quad (v_0 = 0).$$

Враховуючи зв'язок між v , ω та радіусом обертання відносно миттєвої осі, отримуємо $\omega = \frac{2v}{D}$, де D – зовнішній діаметр осі маятника з намотаною на неї ниткою підвіски. Враховуючи вираз для v , маємо $\omega = \frac{4h}{tD}$. Тоді формула (2) запишеться:

$$mgh = \frac{2mh}{t^2} + \frac{8I_M h}{t^2 D^2}. \quad (3)$$

Звідси момент інерції маятника Максвелла:

$$I_M = \frac{1}{4} m D^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (4)$$

Діаметр диска разом із намотаною ниткою підвіски визначаємо за формулою:

$$D = D_0 + 2D_h, \quad (5)$$

де D_0 – діаметр внутрішнього диска маятника, D_h – діаметр нитки. Момент інерції маятника I'_M можна визначити, беручи до уваги його геометричну форму:

$$I'_M = I_0 + I_d + I_k, \quad (6)$$

де I_0 – момент інерції осі маятника,

$$I_0 = \frac{m_0 R_0^2}{2}. \quad (7)$$

$R_0 = 0,004$ м – радіус осі;

I_d – момент інерції внутрішнього диска маятника:

$$I_d = 2m_d R_d^2, \quad (8)$$

$R_d = 0,021$ м – середній радіус диска;

I_K – момент інерції основного кільця маятника:

$$I_K = m_K (R_K^2 + b^2 / 4), \quad (9)$$

$R_K = 0,048$ м – середній радіус кільця;

b – ширина кільця, м.

Хід роботи

1. Підготувати прилад до роботи. Зняти кільце з маятника.
2. Нижній кронштейн приладу зафіксувати у крайньому нижньому положенні шкали так, щоб площина кронштейна, зображена синім кольором, збігалася з однією з міток шкали.
3. Провести регулювання положення основи за допомогою опор регулювання так, щоб диск на біфілярному підвісі знаходився в центрі вікна фотодатчика.
4. Встановити необхідну довжину біфілярного підвісу таким чином, щоб нижній край зрізу змінного кільця маятника знаходився на 4–5 мм нижче оптичної осі фотодатчика.
5. Натиснути кнопку “СЕТЬ”; при цьому повинно включитися табло індикації. Натиснути кнопку “СТОП”, при цьому повинні включитися електромагніти.
6. Обертаючи маятник за годинниковою стрілкою, рівномірно, виток до витка, намотати нитку на вісь маятника й зафіксувати його у верхньому положенні за допомогою електромагніта.
7. При натисканні кнопки “ПУСК” на блоці маятник повинен почати розкручуватись, при цьому таймер має провести відлік часу.
8. За допомогою візира по шкалі вертикальної стійки визначити хід маятника h .
9. Натиснути кнопку “СТОП”. Привести маятник у вихідне положення.
10. Натиснути кнопку “ПУСК” на блоці. При цьому автоматично обнуляється табло й починається новий відлік часу.
11. Записати в таблицю покази таймера, тобто час ходу маятника t .

Кільце	№	t , с	Δt , с	h , м	Δh , м	I_{M_i} , кг·м ²	ΔI_{M_i} , кг·м ²	I'_{M_i} , кг·м ²	ε , %
1.	1.								
	2.								
	3.								
	сер. 32								
2.	1.								
	2.								
	3.								
	сер. 54								
3.	1.								
	2.								
	3.								
	сер. 34								

12. На ролик маятника закріпити довільно вибране кільце, зачиснути його до упирання.
13. Виконати операції пунктів 4 – 12, врахувавши масу кільця.
14. Знайти теоретичне значення моменту інерції кільця за формулою (6). Порівняти експериментальне і теоретичне значення. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Теорема про рух центра мас твердого тіла.
2. Динаміка твердого тіла. Момент інерції.
3. Рівняння обертового руху твердого тіла.
4. Енергія обертового руху твердого тіла. Повна механічна енергія твердого тіла.
5. Закон збереження механічної енергії на прикладі маятника Максвелла.
6. Експериментальна установка та методика вимірювання моменту інерції.

7. Виведення робочої формули.

Література

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум : навч. посібник / заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Каленков С. Г. Практикум по физике. Механика / С. Г. Каленков, Г. И. Соломаха. – М. : Высш. школа, 1990.
3. Дущенко В. П. Фізичний практикум / В. П. Дущенко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
4. Практикум по общей физике / под ред. В. Ф. Ноздрева. – М. : Просвещение, 1971.
5. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
6. Хайкін С. С. Фізичні основи механіки / С. С. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.

Лабораторна робота № 10

Визначення моменту інерції гіроскопа

Мета роботи: дослідним шляхом визначити момент інерції гіроскопа.

Прилади та матеріали: експериментальна установка, секундомір.

Короткі теоретичні відомості

Гіроскопом називається симетричне тверде тіло, яке обертається

з великою швидкістю навколо осі симетрії, що є однією з вільних осей. Гіроскоп має три ступені вільності, якщо він закріплений так, що може здійснити будь-який поворот навколо нерухокої точки. Ця точка називається центром підвісу. Якщо центр маси гіроскопа і центр підвісу збігаються, то результуючий момент сил тяжіння всіх частин гіроскопа відносно центра підвісу дорівнює нулю.

Оскільки тертя в місцях закріплення осі гіроскопа мале, то можна вважати момент сил тертя таким, що дорівнює нулю. Крім того, припустимо, що на гіроскоп не діють ніякі інші сили.

Таким чином, сумарний момент зовнішніх сил, що діє на гіроскоп, дорівнюватиме нулю. Такий гіроскоп називають вільним. Прикладом вільного гіроскопа, що має три ступені вільності, може бути гіроскоп на кардановому підвісі (рис. 10.1).

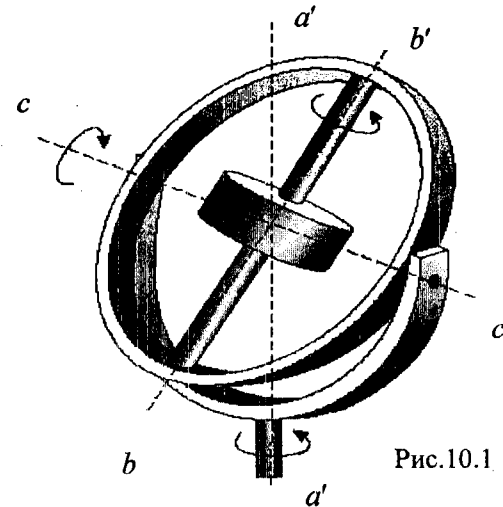


Рис.10.1

Нехай вісь bb' гіроскопа з вертикаллю становить гострий кут (рис. 10.2). До осі bb' гіроскопа прикладемо вертикальну зовнішню силу \vec{P} . Момент \vec{M} цієї сили напрямлений вздовж осі cc' . Під дією цієї сили за деякий час dt момент імпульсу \vec{L} гіроскопа дістане приріст $d\vec{L}$, тобто

$$d\vec{L} = \vec{M}dt. \quad (1)$$

Зміну вектора

\vec{L} гіроскопа під дією зовнішніх сил називають **прецесією**. Цей рух характеризується кутовою швидкістю $\vec{\Omega}$ прецесії. За час dt проекція вектора \vec{L} на горизонтальну площину N повернеться на кут $d\varphi$. З трикутників OOD і $DO'C$

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

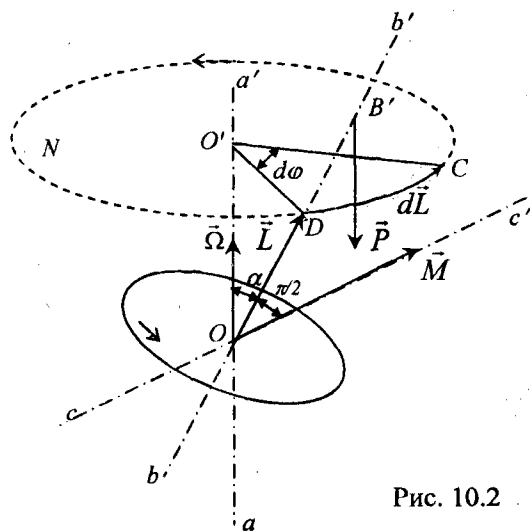


Рис. 10.2

Врахувавши (1), маємо

$$d\varphi = \frac{M dt}{L \sin \alpha}, \quad (2)$$

де α – кут, утворений вектором \vec{L} з вертикаллю.

Перепишемо рівняння (2) дещо в іншій формі, а саме:

$$M = L \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha. \quad (2a)$$

У цьому рівнянні похідна $\frac{d\varphi}{dt}$ – кутова швидкість обертання вектора

\vec{L} , а отже, й осі гіроскопа навколо вертикалі. Це кутова швидкість прецесії Ω . Таким чином, $\Omega = \frac{d\varphi}{dt}$. Тоді $M = L\Omega \sin \alpha$, а звідси

$$\Omega = \frac{M}{L \sin \alpha}. \quad (3)$$

Якщо власна вісь обертання гіроскопа розташована горизонтально, то рівняння (3) дещо спроститься й матиме вигляд

$$\Omega = \frac{M}{L}.$$

Наведені міркування справедливі лише за умови $\Omega \ll \omega$, де ω – кутова швидкість власного обертання гіроскопа. Згідно з наближеною теорією гіроскопа повний момент імпульсу рівний

$$L \approx I\omega. \quad (4)$$

З урахуванням (4) маємо:

$$\Omega = \frac{M}{I\omega}. \quad (5)$$

Момент сили \vec{P} можна знайти за такою формулою:

$$M = P \cdot l, \quad (6)$$

де l – плече сили. Якщо вісь bb' гіроскопа горизонтальна, то l дорівнює відстані від точки прикладання сили до осі обертання aa' .

Підставивши (6) у (5), дістанемо

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

звідки

$$l = \frac{Pl}{\Omega\omega}. \quad (8)$$

Оскільки $\Omega = \frac{\varphi}{t}$, а $P = mg$, то отримаємо кінцеву формулу для визначення моменту інерції гіроскопа:

$$I = \frac{mgl t}{\varphi\omega}. \quad (9)$$

Опис лабораторної установки

Конструкцію лабораторної установки FRM-10 подано на рис. 10.3.

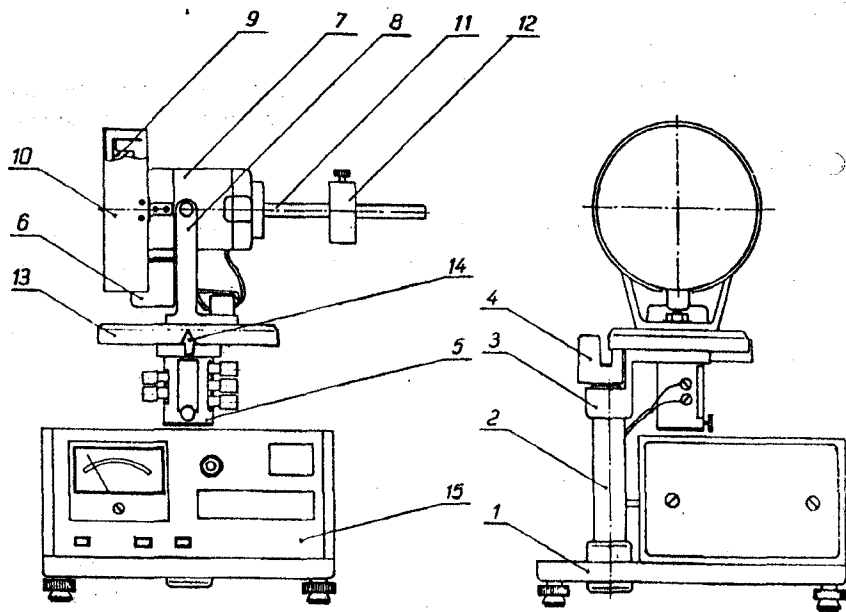


Рис. 10.3

На основі 1, яка оснащена ніжками з регульованою висотою, що дозволяють провести вирівнювання приладу, закріплена колонка 2. На ній знаходиться кронштейн 3, на якому закріплений фотоелектричний датчик 4 і зовнішня втулка з'єднання, що обертає, 5. З'єднувач дозволяє гіроскопу обертатися навколо вертикальної осі й забезпечує живлення електричним струмом фотоелектричний датчик 6 і електричний двигун 7 через роз'єм. Електричний двигун змонтований на кронштейні 8. На валу двигуна закріплений вантаж 9, захищений екраном 10. Важіль 11, закріплений на корпусі двигуна, має нанесену метричну шкалу. На важелі закріплений вантаж 12. Переміщуючи вантаж по важелю й змінюючи положення центра мас системи, можна вирівноважити гіроскоп. Кут повороту гіроскопа навколо вертикальної осі можна вимірювати. На диску 13 нанесена кутова шкала і є покажчик 14. На колі диска через кожних 5° просвердлено отвори, які підраховуються фотоелектричним датчиком 4, і інформація про кут

повороту гіроскопа передається в блок управління й вимірювань ФРМ-10 15. Вантаж 9 має на зовнішньому колі насічки, які підраховуються фотоелектричним датчиком 6, і інформація про швидкість обертання електричного двигуна передається в блок управління.

Порядок виконання роботи

1. Встановити вісь гіроскопа в горизонтальне положення й вирівноважити гіроскоп. Відзначити положення тягарця на осі. Пересунути тягарець і виміряти плече сили.

2. Привести в рух гіроскоп ввімкненням вимикача "ПУСК" і почекаати 3–5 хв, протягом яких власна швидкість обертання гіроскопа стабілізується.

3. Виконати вимірювання часу, протягом якого гіроскоп повернеться на 30° . Визначити кутову швидкість прецесії за формулою

$$\Omega = \frac{\varphi}{t}. \text{ Виміряти момент інерції гіроскопа.}$$

4. Визначити момент інерції гіроскопа ще для 2 положень тягарця. Отримані дані занести в таблицю.

№ досліду	$l, \text{ м}$	$\Delta l, \text{ м}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\Delta \varphi, \text{ рад}$	$t, \text{ с}$	$\Delta t, \text{ с}$	$I, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta I, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\epsilon, \%$
1.									
сер. знач.									
2.									
сер. знач.									
3.									
сер. знач.									

Контрольні запитання

1. Що називається гіроскопом?
2. Наближена теорія гіроскопа.
3. Сформулюйте закон збереження моменту імпульсу.
4. Явище прецесії гіроскопа.

Література

1. Загальна фізика : Лабораторний практикум : навч. посібник / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Каленков С. Г. Практикум по физике. Механика / С. Г. Каленков, Г. И. Соломаха. – М. : Высш. школа, 1990.
3. Дущенко В. П. Фізичний практикум. / В. П. Дущенко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
4. Практикум по общей физике / под ред. В. Ф. Ноздрева. – М. : Просвещение, 1977.
5. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
6. Хайкін С. С. Фізичні основи механіки / С. С. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.

Лабораторна робота № 11

Визначення швидкості звуку в повітрі методом додавання взаємно перпендикулярних коливань

Мета роботи: ознайомитися з одним із способів визначення швидкості звуку в повітрі.

Прилади та матеріали: звуковий генератор із телефоном, вимірювальна лінійка, осцилограф, мікрофон.

Короткі теоретичні відомості

Швидкість звуку в повітрі можна визначити зі співвідношення

$$v = \lambda \nu,$$

де v – швидкість звуку, λ – довжина звукової хвилі в повітрі, ν – частота звукових коливань.

На відрізку z (рис. 11.1) різницю фаз коливань $\Delta\varphi$ можна представити співвідношенням:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{z}{\lambda}; \quad \lambda = 2\pi \frac{z}{\Delta\varphi},$$

де $\Delta\varphi = 2\pi$,

$$z = \Delta\varphi \frac{\lambda}{2\pi}.$$

Таким чином, довжину хвилі можна виміряти за відстанню між

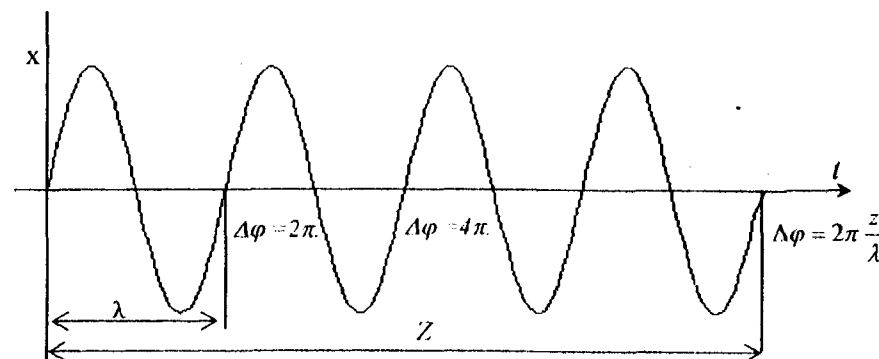


Рис. 11.1

двома точками хвилі та за різницею фаз між ними.

Різницю фаз коливань у двох точках звукової хвилі можна визначити, користуючись методом додавання двох взаємно перпендикулярних коливань. При додаванні таких коливань з однаковими амплітудами і періодами вигляд траєкторій результуючого коливання залежить від різниці фаз цих коливань.

Якщо електричні коливання від виходу генератора подати на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа ("Вхід X"), а від мікрофона, що знаходиться на певній відстані від гучномовця (під'єданого до тих самих виводів генератора), – на вертикально відхиляючі пластини ("Вхід Y"), то електронний промінь на екрані осцилографа рухатиметься у двох взаємно перпендикулярних напрямках, описуючи при цьому різноманітні фігури, названі фігурами Ліссажу.

Нехай частинка здійснює два взаємно перпендикулярні коливання з однаковими частотами. У напрямку осі Ox рівняння коливань має вигляд:

$$x = A_1 \sin \omega t, \quad (1)$$

а в напрямку осі Oy –

$$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2),$$

де A_1, A_2 – амплітуди коливань, ω – частота, φ_0 – зсув фаз цих коливань.

З рівняння (1)

$$\frac{x}{A_1} = \sin \omega t. \quad (3)$$

Тоді

$$\cos \omega t = \sqrt{1 - \frac{x^2}{A_1^2}}. \quad (4)$$

Запишемо рівняння (2) у вигляді:

$$\frac{y}{A_2} = \cos(\omega t + \varphi_0) = \cos \omega t \cdot \cos \varphi_0 - \sin \omega t \cdot \sin \varphi_0. \quad (5)$$

Підставивши формули (3) і (4) в рівняння (5), отримаємо

$$\frac{y}{A_2} = \sqrt{1 - \frac{x^2}{A_1^2}} \cos \varphi_0 - \frac{x}{A_1} \sin \varphi_0.$$

Перенесемо $\left(-\frac{x}{A_1} \sin \varphi_0\right)$ в ліву частину рівняння й піднесемо

обидві частини рівняння до квадрата:

$$\frac{y^2}{A_2^2} + 2 \frac{xy}{A_1 A_2} \sin \varphi_0 + \frac{x^2}{A_1^2} \sin^2 \varphi_0 = \cos^2 \varphi_0 - \frac{x^2}{A_1^2} \cos^2 \varphi_0$$

або

$$\frac{x^2}{A_1^2} + 2 \frac{xy}{A_1 A_2} \sin \varphi_0 + \frac{y^2}{A_2^2} = \cos^2 \varphi_0.$$

У випадку, якщо $\varphi_0 = 0, \pi, 2\pi, \dots$ (початкові фази однакові), то

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1,$$

отримуємо рівняння еліпса, приведеного до координатних осей. Якщо $A_1 = A_2$, то еліпс перетворюється в коло. У решті випадків різниці фаз дають рівняння еліпсів, що не приведені до вибраних осей.

Якщо $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots$, то

$$y = \pm \frac{A_1}{A_2} x.$$

У нашому випадку вигляд траєкторії залежатиме від різниці фаз електричних коливань, що подаються від мікрофона і від звукового генератора. Різниця фаз, у свою чергу, залежить від відстані l між динаміком і мікрофоном. Якщо цю відстань змінювати, пересуваючи мікрофон, то форма траєкторії буде змінюватися (повертатися). При збільшенні відстані між динаміком і мікрофоном на довжину звукової хвилі різниця фаз коливань, що подаються на осцилограф, збільшується на 2π . Таким чином, траєкторія при цьому зробить один повний оберт. Мінімальне значення відстані l_{\min} між двома положеннями мікрофона, при якому на екрані осцилографа траєкторія зробить повний оберт, є довжиною звукової хвилі у вакуумі.

Порядок виконання роботи

1. Скласти експериментальну установку, підключивши генератор, осцилограф, акустичну головку та мікрофон.
2. Визначити, які необхідно виконати прямі вимірювання для визначення швидкості звуку в повітрі при заданій температурі. Скласти таблицю.
3. Ввімкнути звуковий генератор і встановити відповідну частоту.
4. Пересуваючи мікрофон від динаміка, а потім у напрямку до динаміка, визначити середню довжину звукової хвилі, добиваючись на екрані осцилографа однакових фігур Ліссажу у двох послідовних положеннях. Вимірювання виконати по три рази для частот 1500, 1700 і 2000 Гц. Результати вимірювань записати в таблицю.
5. Виконати обробку результатів вимірювання. Порівняти отримане значення швидкості поширення звуку з табличним значенням при температурі вимірювання.

№ п/п	ν , Гц	$\Delta\nu$, Гц	l , м	Δl , м	v , м/с	Δv , м/с	ε , %
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							

Контрольні запитання

1. Джерела звуку. Акустичні коливання.
2. Додавання коливань одного напрямку методом векторних діаграм.
3. Рівняння руху частинки, яка здійснює коливання у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Фігури Ліссажу.
4. Методика визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом додавання взаємно перпендикулярних коливань.

Література

1. Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики / Н. Н. Майсова. – К. : Вища школа, 1970.
2. Дущенко В. П. Фізичний практикум. / В. П. Дущенко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
4. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1975. – 424 с.

Лабораторна робота № 12

Визначення швидкості звуку в повітрі методом інтерференції хвиль

Мета роботи: ознайомитися з одним із способів отримання стоячих звукових хвиль та визначити швидкість звуку в повітрі при сталій температурі інтерференційним методом.

Прилади та матеріали: металічна труба з рухомих поршнем, звуковий генератор із телефоном, вимірювальна лінійка, осцилограф, мікрофон.

Короткі теоретичні відомості

Метод визначення швидкості звуку базується на властивостях звукової стоячої хвилі. Стоячі хвилі є частинним випадком інтерференції хвиль. Стоячі хвилі характеризуються точками, коливання в яких відсутні (це точки *B* на рис. 12.1, які називають вузлами), і точками, в яких амплітуда є максимальною (це точки *C* на рис. 12.1, які

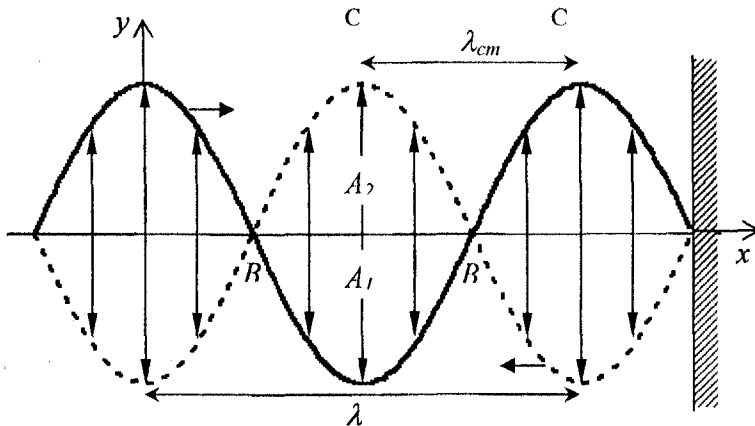


Рис. 12.1

називають пучностями). Коливання у всіх точках стоячої хвилі, що лежать між двома сусідніми вузлами, відбувається з різними амплітудами, але однаковими фазами. Відстань між сусідніми вузлами або

пучностями називається довжиною стоячої хвилі ($\lambda_{ст}$). Довжина звукової (біжучої) хвилі

$$\lambda = 2\lambda_{ст} \quad (1)$$

В експериментальній установці, що складається зі звукового генератора з телефоном, трубки і рухомого поршня, а також мікрофона, під'єданого до входу осцилографа, звукові хвилі поширюються тільки вздовж трубки.

Звукові стоячі хвилі утворюються: 1) із прямої хвилі (суцільна лінія на рис. 12.2), що йде від телефону до поршня і 2) відбитої від поршня хвилі, фаза якої змінюється на протилежну, оскільки відбивання відбувається від середовища з більшою густиною.

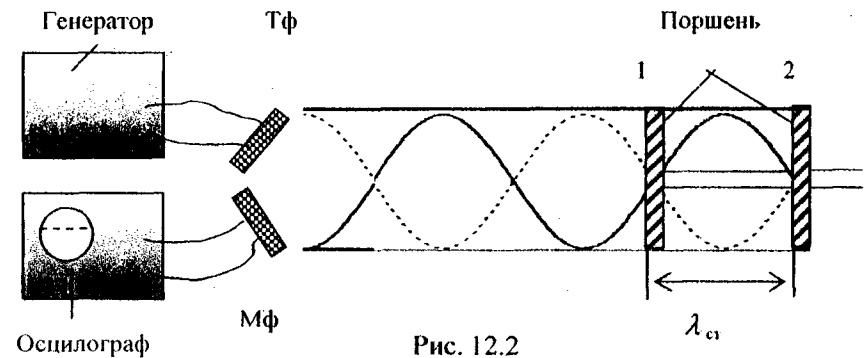


Рис. 12.2

У даному випадку при відбиванні відбулася втрата половини хвилі. При певних умовах у трубці виникає акустичний резонанс – явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань у коливній системі при наближенні частоти зовнішньої сили, що викликає вимушені коливання, до частоти власних коливань даної коливної системи. У даному випадку ми маємо справу з явищем, коли коливання густини стовпа повітря в трубці досягають максимальної амплітуди.

Для спостереження акустичного резонансу (рис. 12.2) необхідно, щоб стовп повітря в трубці між поршнем і відкритим кінцем резонував на звукові хвилі, що збуджуються джерелом звуку – телефоном. Для цього необхідно, щоб довжина l стовпа повітря задовольняла умову:

$$l = (2m - 1) \frac{\lambda_{ст}}{2}, \quad (2)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$.

У роботі знаходять відстань Δl між двома найближчими положеннями поршня – двома сусідніми вузлами, що відповідають найбільшій амплітуді (гучності) звуку у трубі. За формулою (1) довжина стоячої звукової хвилі $\lambda_{ст} = \Delta l$, а шукана довжина звукової хвилі

$$\lambda = 2\lambda_{ст} = 2\Delta l. \quad (3)$$

Якщо поступово пересувати поршень від телефону, то можна добитися резонансу, тобто максимального звучання повітряного стовпа трубки. У трубці буде чутне послідовне підсилення й послаблення звуку, тобто утворюються стоячі хвилі, причому біля поршня завжди буде вузол, а біля відкритого кінця, де розміщений мікрофон, – пучність. Знаючи довжину звукової хвилі λ і частоту ν , яка задається звуковим генератором, визначають фазову швидкість поширення звукової хвилі в повітрі за формулою:

$$v = \lambda \nu = 2\Delta l \nu. \quad (4)$$

Порядок виконання роботи

1. Включивши генератор та осцилограф, дають приладам прогрітися. Встановити частоту звукового генератора 1000 Гц.
2. Повільно й рівномірно рухаючи поршень від телефону, відзначають крейдою на лінійці послідовні положення поршня, що характеризуються різким посиленням звуку по всій довжині трубки. Інтенсивність звуку фіксують при допомозі осцилографа.
3. Вимірюють відстані Δl між отриманими точками й записують у таблицю дані.
4. Витерши крейду, провести ще чотири аналогічні вимірювання, потім знайти середнє значення Δl для заданої частоти.
5. За формулою (3) обчислюють довжину звукової хвилі, а за формулою (4) – фазову швидкість поширення звукової хвилі.
6. Встановити послідовно частоти генератора 1400 Гц, 1700 Гц. Повторити п. 2–5 для кожної частоти.
7. Виконати обчислення похибок вимірювань фазової швидкості для кожного з дослідів, встановити, як залежить фазова швид-

кість звукових хвиль від частоти. За результатами роботи зробити висновки.

Таблиця

№ п/п	ν , Гц	$\Delta \nu$, Гц	Δl , м	$\Delta(\Delta l)$, м	v , м/с	Δv , м/с	ε , %
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							

Контрольні запитання.

1. Поширення коливань у пружному середовищі. Поздовжні та поперечні хвилі. Звукова хвиля.
2. Рівняння плоскої біжучої гармонічної хвилі.
3. Довжина хвилі та швидкість її поширення. Фазова швидкість. Швидкість поширення звуку та її залежність від густини середовища, температури.
4. Інтерференція хвиль. Умова максимумів та мінімумів.
5. Стояча хвиля. Рівняння стоячої хвилі. Довжина стоячої хвилі.
6. Методика визначення швидкості поширення звуку в повітрі при даній температурі методом резонансу.
7. Принцип побудови та дії установки для визначення швидкості поширення звуку в повітрі.

Література

1. Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики / Н. Н. Майсова. – К. : Вища школа, 1970.
2. Дущенко В. П. Фізичний практикум / В. П. Дущенко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
3. Хайкін С. Е. Фізичні основи механіки / С. Е. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1996.

Лабораторна робота № 13

Вивчення стоячих хвиль у струні

Мета роботи: ознайомитися з теорією поперечних хвиль у струнах, експериментально визначити спектр власних частот струни й зняти залежність частоти власних коливань струни від сили натягу.

Прилади та матеріали: механічне пристосування із закріпленою струною, динамометр, генератор звукових сигналів.

Короткі теоретичні відомості

Гнучка однорідна струна, натягнута між двома точками й введена з положення рівноваги, може здійснювати коливання різного вигляду. Якщо одному з кінців натягнутої струни надати коливальний рух у поперечному напрямі (наприклад, вібратором), то по струні розповсюджуватиметься біжуча поперечна хвиля. Від іншого закріпленого кінця струни вона відбиватиметься, і її рух буде спрямований у протилежному напрямі (рис. 13.1).

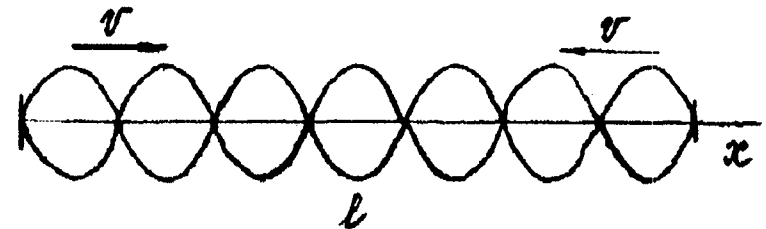


Рис. 13.1

У результаті накладання двох біжучих хвиль однакової частоти, які поширюються в протилежні сторони, виникають стоячі хвилі. Явища, що виникають при накладанні хвиль однакової частоти, носять спільну назву інтерференції.

Отримасмо рівняння стоячої хвилі. Рівняння двох плоских хвиль можна написати таким чином. Для хвилі, що йде в напрямі позитивної осі x :

$$\xi_1(x, t) = A \sin 2\pi\nu \left(t - \frac{x}{\nu} \right). \quad (1)$$

Для відбитої від кінця струни хвилі і що йде в напрямі негативної осі x :

$$\xi_2(x, t) = A \sin 2\pi\nu \left(t + \frac{x}{\nu} \right), \quad (2)$$

де ν – частота;

ν – швидкість поширення хвилі у струні.

У результаті накладання двох хвиль отримаємо:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 + \xi_2 = A \sin 2\pi\nu \left(t - \frac{x}{\nu} \right) - A \sin 2\pi\nu \left(t + \frac{x}{\nu} \right) = \\ &= -2A \sin \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \cos(2\pi\nu t), \end{aligned} \quad (3)$$

де $\lambda = \nu / \nu$ – довжина хвилі.

Множник $\cos(2\pi\nu t)$ показує, що в струні виникає коливання з тією ж частотою ν , що й коливання зустрічних хвиль.

$$\text{Множник } 2A \sin \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) = \xi_0 \quad (4)$$

незалежний від часу, виражає амплітуду результуючого ξ_0 коливання точок простору. Коливання, що виникло, описується рівнянням (3) і називається стоячою хвилею. У певних точках амплітуда стоячої хвилі рівна сумі амплітуд обох коливань; такі точки називаються пучностями. В інших точках результуюча амплітуда дорівнює нулю; ці точки називаються вузлами стоячої хвилі.

Визначимо координати точок пучностей і вузлів. Амплітуда, яка визначається рівністю (4), максимальна в точках, для яких

$$\sin \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) = 1. \quad (5)$$

У цих точках $\xi_0 = 2A$.

Тому положення пучностей визначаємо з умови:

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm \left(n + \frac{1}{2} \right) \pi, \quad (6)$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

Отже, координати пучностей дорівнюють:

$$x = \pm (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (7)$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

У вузлах стоячої хвилі амплітуда результуючого коливання дорівнює нулю, звідки за формулою (4) обчислимо умову виникнення вузлів:

$$\sin \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) = 0 \quad (8)$$

або

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = \pm \pi n. \quad (9)$$

Отже, координати вузлів дорівнюють:

$$x = \pm n \frac{\lambda}{2}, \quad (10)$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

Стояча хвиля є результатом накладання двох біжучих хвиль рівної амплітуди, що поширюються в протилежні сторони. Обидві хвилі, що біжать, несуть із собою однакову енергію в протилежних напрямках. Тому результуюча стояча хвиля, на відміну від хвилі, що біжить, не переносить енергію.

Для того, щоб у струні могли існувати стоячі хвилі, на кінцях струни довжиною l повинен завжди бути вузол зсуву, тобто

$$l = \frac{\lambda}{2} n,$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

У решті випадків неузгодженого віддзеркалення відбудеться догасіння хвиль. Оскільки довжина хвилі пов'язана зі швидкістю поширення хвилі вздовж струни λ , частотою коливань струни ν співвідношенням $\nu = \lambda \nu$, то

$$v_n = \frac{n}{2l} v, \quad (11)$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

Отже, струна може коливатися не з однією частотою, а із цілим спектром частот. Це відповідає тому факту, що струна може розглядатися як система, що складається з нескінченного числа матеріальних точок. Тому в загальному випадку спектр стоячої хвилі дискретний.

Дослід показує, що швидкість v розповсюдження хвилі вздовж струни визначається величиною натягнення F_H і лінійною щільністю ρ матеріалу струни:

$$v = \sqrt{\frac{F_H}{\rho}}. \quad (12)$$

З (11) і (12) одержуємо остаточний вираз для частот коливань струни:

$$v_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F_H}{\rho}}. \quad (13)$$

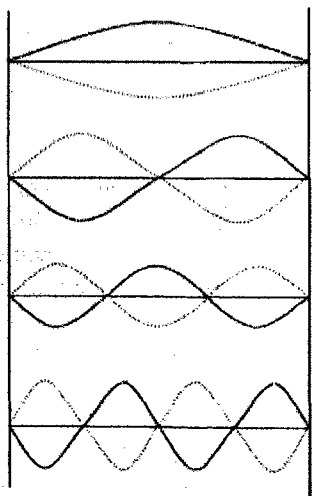


Рис. 13.2

вих хвиль різної частоти.

Це частота так званих власних коливань струни, залежна від параметрів коливальної системи: l, ρ, F_H .

При коливаннях із будь-якою власною частотою v_n струна в кожен момент має певну форму (рис. 13.2).

Частота, що відповідає $n=1$, називається основною, інші називаються гармоніками основної частоти, або обертонами. Стоячі хвилі широко використовуються в музичній техніці для отримання звуко-

Опис лабораторної установки

Установка для вивчення хвиль у струні (рис. 13.3) складається зі струни, вібратора й електричного генератора, а також механізму для натягнення струни. Сила натягу струни калібрується за допомогою динамометра, проградуйованого в ньютонах. Вібратор є системою, що складається з постійного магніту, котушки підмагнічування та якоря, що коливається. Струна, що скріплена одним кінцем з якорем вібратора, одержує коливання, які поширюються вздовж струни й відбиваються від іншого її закріпленого кінця. Вібратор живиться від генератора змінного струму, частота якого може довільно змінюватися експериментатором.

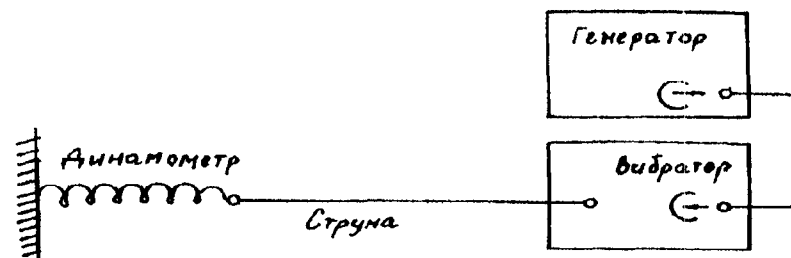


Рис. 13.3

Порядок виконання роботи

Дослід 1. Дослідження залежності швидкості розповсюдження поперечних хвиль у струні від сили її натягнення $v \sim \sqrt{F_H}$.

1. Включіть генератор і дайте йому прогрітися протягом 3–5 хв.
2. При дослідженні експериментальної залежності $v = f(F_H)$ обмежимося випадком, коли $n=1$. При зміні сили натягу струни F_H буде змінюватися й частота збудження стоячих хвиль, але завжди можна знайти таку частоту збудження стоячих хвиль, щоб у струні укладалася одна півхвиля – тон або перша гармоніка.
3. Послідовно встановлюючи вказані в таблиці сили натягу струни, кожного разу підбирайте таку частоту вимушених коливань, щоб спостерігалася явище резонансу для першої гармоніки. У цьому ви-

падку амплітуда коливань струни повинна бути максимальною, самі коливання стійкі, а поведінка струни – спокійна, без биття.

4. Дослід повторити не менше трьох разів, а дані занести в таблицю 1.

5. Для кожного випадку визначити середнє значення частоти і за цими значеннями – швидкість поширення хвиль у струні за формулою:

$$v = \nu \cdot \lambda = \nu \cdot 2l.$$

6. Обчисліть квадрати швидкостей.

7. Побудуйте графік залежності квадрата швидкості поширення хвилі від сили натягнення струни (на міліметровому папері).

Таблиця 1

$F, (H)$								
1.								
$\nu (Гц)$ 2.								
3.								
сер. зн.								
$v (м/с)$								
$v^2 (м^2/с^2)$								

Примітка. Довжина біжучої хвилі для першої гармоніки дорівнює подвоєній довжині струни.

Дослід 2. Вивчення залежності частоти коливання струни від номера гармоніки.

1. Провести вказане дослідження для двох значень сили натягнення струни в межах від **0,5 Н** до **1 Н**. Встановлювати силу натягу струни більше **1 Н** небажано, оскільки спостерігати стоячі хвилі для вищих гармонік важко.

2. Спочатку, плавно збільшуючи частоту вимушених коливань, отримайте стоячі хвилі для всіх гармонік від 1 до 6 включно. Одночасно проведіть попередній запис частот для кожної гармоніки. Через так зване явище затягування максимальна амплітуда коливань може фіксуватися при частоті дещо вищій за резонансну. Для уникнення цього ефекту підбір частот гармонік слід вести, наближаючись до

резонансу з боку вищих частот. Таким чином, спостереження гармонік слід вести кожного разу, починаючи з 6-ї і закінчуючи 1-ю.

3. Повторити вимірювання частот коливань струни не менше трьох разів для кожного значення сили натягу струни.

Примітка. Поблизу резонансу зміну частоти слід вести поволі й плавно, весь час уважно спостерігаючи та відзначаючи зростання амплітуди й частоту генератора.

4. Отримавши резонанс, запишіть частоту в таблицю 2 і переходьте до відшукування резонансної частоти для гармоніки меншого порядку. Дані занесіть у таблицю 2.

Таблиця 2

№ n/n	$F, (H)$	$\nu_1 (Гц)$	$\nu_2 (Гц)$	$\nu_3 (Гц)$	$\nu_4 (Гц)$	$\nu_5 (Гц)$	$\nu_6 (Гц)$
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							
1.							
2.							
3.							
сер. зн.							

6. Встановіть зв'язок між основною частотою стоячої хвилі й частотами гармонік, знайдіть ці співвідношення. Зробіть висновок про залежність частоти стоячої хвилі від номера гармоніки.

Контрольні запитання

1. Поясніть, як виникають стоячі хвилі у струні. Одержати рівняння стоячої хвилі у струні.
2. Що таке вузли і пучності стоячої хвилі? Яка відстань між сусідніми вузлами – пучностями? Знайдіть координати вузлів і пучностей.
3. Від яких параметрів залежать власні частоти струни із закріпленими кінцями? Що таке основний тон струни – обертони?

Що називається довжиною хвилі?

4. Які коливання називаються вимушеними? Чому при деяких частотах зовнішньої дії спостерігається різке збільшення амплітуди коливань струни?
5. Як у даній роботі визначається швидкість поширення хвилі в струні?
6. Чи залежить швидкість поширення хвилі у струні від частоти, від довжини хвилі? Чому спектр стоячих хвиль дискретний? Від чого залежить частота основного тону, обертонів?

Література

1. Стрелков С. П. Механика / С. П. Стрелков. – М.: Наука, 1975. – 559 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1982. – Т. 1. – 432 с.
3. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М.: Просвещение, 1965. – 438 с.

Лабораторна робота № 14

Визначення швидкості поширення звуку у твердому тілі й модуля Юнга

Мета роботи: ознайомитися з одним зі способів отримання стоячих звукових хвиль та визначити швидкість звуку і модуля Юнга шляхом вимірювання резонансних частот поздовжніх звукових коливань у стержнях, виготовлених із матеріалів, що слабо поглинають звук (метали).

Прилади та матеріали: установка для вивчення поширення звуку у твердому тілі ВФ-02: стержні (сталь, алюміній, латунь), звуковий генератор із телефоном, осцилограф, мікрофон.

Короткі теоретичні відомості

При поширенні звуку в ізотропних твердих тілах спостерігаються як поздовжні, так і поперечні хвилі, причому швидкість їх поширення залежить від пружних властивостей тіл, крізь які проходить хвиля.

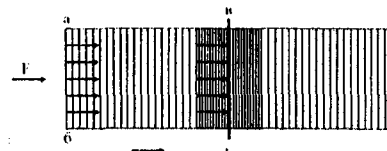


Рис. 14.1.

Для цього розглянемо деякий елемент, який умовно вирізаний у суцільному пружному середовищі, скажімо, довгий пружний стержень (рис. 14.1). Нехай на крайній перерізі стержня подієв короткочасний імпульс сили, перпендикулярний перерізу (удар молотком). Частинок середовища, які знаходяться в крайньому перерізі, набувають прискорення в напрямі дії сили і зміщуються. Сусідній шар унаслідок інерції виявляється деформованим і в ньому виникають пружні сили, які прагнуть відновити первинний об'єм. Під дією пружних сил, що напрямлені проти швидкості частинок першого шару, ці частинки зупиняються, проте набувають швидкості частинки другого шару. Це приводить до зникнення деформації в другому шарі й до виникнення її в третьому. Зсув частинок і деформація передаються далі від шару до шару.

Знайдемо швидкість поширення імпульсу. Припустимо, що у момент t імпульс стиску досягнув перерізу ab . У цей момент на переріз ab діє сила F , яка дорівнює силі, з якою був нанесений удар по перерізу ab (якщо сили внутрішнього тертя є малими і ними можна знехтувати). Під дією сили F частинки, які лежать перед перерізом ab були стиснуті. Нехай величина відносного стиску дорівнює ε . Оскільки стержень однорідний, то зміну густини можна вважати пропорційною стиску $\Delta\rho = \varepsilon\rho$, де ρ – густина недеформованого стержня.

Стиск та ущільнення, очевидно, поширюються із загальною швидкістю, яку позначимо c . За час Δt через переріз ab буде переміщена маса:

$$\Delta m = S \Delta x \Delta \rho, \text{ де } \Delta x = c \Delta t.$$

Відповідно, момент імпульсу:

$$\Delta m c = S c \Delta t \Delta \rho c = S \Delta \rho c^2 \Delta t. \quad (1)$$

Цей момент імпульсу дорівнює імпульсу сили, яка діє на переріз:

$$F \Delta t = \Delta p S \Delta t. \quad (2)$$

Прирівнявши праві частини рівності (1) і (2), отримаємо:

$$\Delta \rho c^2 = \Delta p$$

або

$$c^2 = \frac{\Delta p}{\Delta \rho}. \quad (3)$$

Відмітимо, що ми не накладали ніяких обмежень на характер середовища, з якого вирізаний стержень (крім того, що воно пружне і суцільне). Таким чином, співвідношення (3) справедливе для твердих, рідких і газоподібних середовищ.

Оскільки $\Delta p = \frac{\varepsilon}{\alpha}$ і $\Delta \rho = \varepsilon\rho$, то

$$c = \sqrt{\frac{1}{\alpha\rho}}. \quad (4)$$

Якщо імпульс поширення в ізолюваному елементі середовища, поздовжні розміри якого набагато більші від поперечних (стержень, провід і т. д.), то коефіцієнт пружності α пов'язаний із модулем Юнга

відомим співвідношенням $\frac{1}{\alpha} = E$. Відповідно, швидкість поширення поздовжніх хвиль у стержні:

$$c_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (5)$$

де c_{\parallel} – швидкість поширення поздовжньої звукової хвилі, E – модуль Юнга матеріалу, з якого зроблений стержень, і ρ – його густина.

Для збудження поздовжніх коливань у стержні достатньо яким-небудь чином викликати в одному з його кінців попереми́нне стискання й розтягування в напрямі довжини. Завдяки дуже малому згасанню пружної хвилі в стержні і її повному відбиванню на межі розділу стержень – повітря при певних частотах коливань встановлюються стоячі хвилі. Якщо стержень закріплений посередині, то при такому збудженні вузол стоячої хвилі знаходиться в місці закріплення, а пучності – на кінцях стержня. У цьому випадку на стержні вкладається непарне число $\lambda/2$, оскільки відстань між вузлами дорівнює половині довжини хвилі. Цю умову можна записати так:

$$L = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

де L – довжина стержня, λ – довжина біжучої хвилі, $n = 0, 1, 2, 3$.

Скориставшись рівностями:

$$\text{і } \lambda = 2\lambda_{cm} = 2L \quad (7)$$

$$v = 2\lambda_{cm} \nu = 2L\nu,$$

(8)

де λ_{cm} – довжина стоячої хвилі,

ν – частота генератора,

можна отримати формулу для знаходження швидкості поширення поздовжньої звукової хвилі в стержні:

$$c = \frac{2L}{2n + 1} \nu. \quad (9)$$

Визначивши резонансні частоти ν , при яких встановлюються стоячі хвилі, можна знайти швидкість поширення поздовжніх хвиль у стержні, для випадку, коли $n = 0$:

$$c = 2L\nu. \quad (10)$$

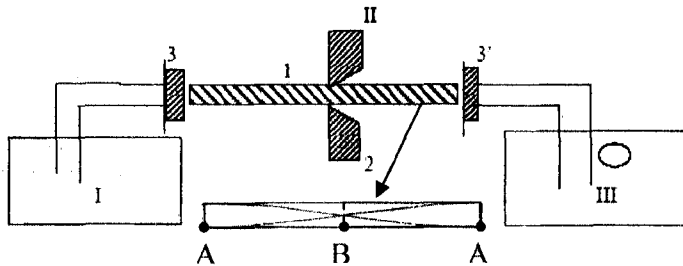
Звідси й модуль Юнга:

$$E = c^2 \rho. \quad (11)$$

Теорія стоячих хвиль описана в лабораторній роботі № 13 та [3], [4].

Опис лабораторної установки

Схема установки представлена на рис. 14.2. Установка складається зі звукового генератора *I*, приладу *II* із тримачем стержня і двома електромагнітами для збудження й приймання поздовжніх коливань і катодного осцилографа *III*. Досліджуваний стержень *I* закріплюється затискачем *2* на своїй середині так, щоб його нижній і верхній кінці були розташовані навпроти полюсів генератора звукових коливань *3* і приймача *3'*. Для посилення збудження поздовжніх коливань джерело збудження і приймач необхідно розташувати ближче до кінців стержня, що досягається за допомогою мікрогвинтів, жорстко пов'язаних з електромагнітами. Змінна електрична напруга від генератора підводиться до котушки збудження. У результаті, на нижній кінець стержня буде діяти періодична сила з частотою, що дорівнює частоті генератора, і у феромагнітному стержні будуть виникати подовжні хвилі. Якщо стержень зроблений із немагнітного матеріалу, то для збудження подовжніх хвиль до його кінців приклеюють тонкі пластинки з м'якого заліза.



Верхній електромагніт – приймач *3'* – це перетворювач звукових коливань в електричні. Його котушка приєднується до клем „вхід

вертикального підсилювача” катодного осцилографа. Підсилені електричні коливання, що поступають від приймача, спостерігаються на екрані осцилографа. Поступово змінюючи частоту коливань напруги, можна добитися резонансу, тобто збігу частоти вказаних коливань з однією з частот власних коливань стержня.

Хід роботи

1. Включивши вимірювальний блок та осцилограф, дають приладам прогрітися на протязі 5 хвилин.
2. Включіть на вимірювальному блоці живлення, згідно з умовами виконання лабораторної роботи, необхідний діапазон „МЕТАЛІ”.
3. Встановіть за допомогою щупа зазори між електромагнітом і стержнем близько 0,1 мм.
4. Регулюючи величину зазору і змінюючи частоту генератора, добийтесь явища резонансу, про що свідчить зростання сигналу з приймача на екрані осцилографа в 2–4 рази, при цьому фіксуючи частоту.
5. Отримані результати вимірювання занести в таблицю.
6. За формулою (10) та (11) розрахувати значення швидкості звуку та модуля Юнга для різних твердих тіл.
7. Указані вимірювання провести зі стержнями, виготовленими з різних матеріалів (алюміній, сталь, латунь).
8. Виконати обчислення похибок вимірювань швидкості та модуля Юнга ($\bar{E} = \bar{c}^2 \bar{\rho}$) для кожного з дослідів.
9. Порівняти результати вимірювань із табличними даними.
10. Встановити, як залежить швидкість звукових хвиль від частоти. За результатами роботи зробити висновки.

Таблиця 1

№ п/п	v , Гц	Δv , Гц	L , м	ΔL , м	c , м/с	Δc , м/с	E , Па	ΔE , Па	$E_{\text{таб.}}$, Па	ρ , кг/м ³	$\Delta \rho$, кг/м ³	ϵ , %
<i>Алюміній</i>												
1.												
2.												
3.												
сер. зн.												
<i>Сталь</i>												
1.												
2.												
3.												
сер. зн.												
<i>Латунь</i>												
1.												
2.												
3.												
сер. зн.												

Контрольні запитання

1. Поширення короткочасного імпульсу в пружному середовищі. Поздовжні та поперечні хвилі. Звукова хвиля.
2. Рівняння плоскої біжучої гармонічної хвилі.
3. Довжина хвилі та швидкість її поширення. Фазова швидкість. Швидкість поширення звуку та її залежність від густини середовища, температури.
4. Інтерференція хвиль. Умова максимумів та мінімумів.

5. Стояча хвиля. Рівняння стоячої хвилі. Довжина стоячої хвилі.
6. Методика визначення швидкості поширення звуку методом резонансу.
7. Принцип побудови та дії установки для визначення швидкості поширення звуку у твердих тілах.
8. Як розрахувати модуль Юнга матеріалу стержня за відомою величиною швидкості поширення в ньому поздовжніх хвиль?

Література

1. Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики / Н. Н. Майсова. – К. : Вища школа, 1970.
2. Дущенко В. П. Фізичний практикум. / В. П. Дущенко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
3. Хайкін С. Е. Фізичні основи механіки / С. Е. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1996.
4. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1965. – 438 с.

Лабораторна робота № 15

Визначення декременту згасаючих коливань

Мета роботи: дослідити основні характеристики згасаючих коливань.

Прилади та матеріали: маятник для отримання згасаючих коливань, міліметрова лінійка, секундомір.

Короткі теоретичні відомості

У реальній механічній коливній системі початково надана їй енергія при коливаннях зменшується внаслідок роботи щодо подолання сил тертя. З часом максимальне зміщення коливного тіла від положення рівноваги, швидкість та прискорення зменшуються – коливання згасають (рис. 13.1). Такий коливний рух не є періодичним: стани коливної системи не повторюються. Тому при описі згасаючих коливань поняттями амплітуди, періоду й частоти можна користуватися тільки умовно.

Закон зменшення амплітуди залежить від характеру сил тертя. Найбільш простим і разом із тим достатньо поширеним є випадок, коли сила тертя прямо пропорційна швидкості v :

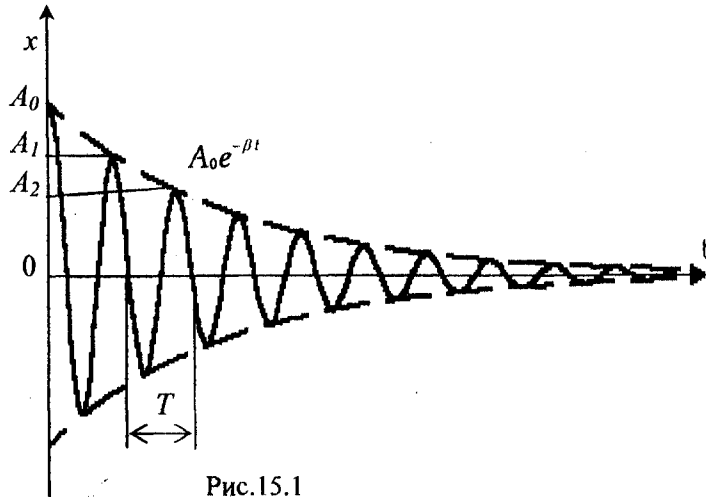


Рис. 15.1

$$F_T = -bv = -b \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

де x – зміщення тіла від положення рівноваги; b – додатна константа, що характеризує силу тертя. У цьому випадку динамічне рівняння руху тіла має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - b \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

де m – маса тіла, $-kx$ – сила, що повертає тіло до положення рівноваги (квазіпружна сила).

Рівняння (2) перепишемо як:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3)$$

де $2\beta = b/m$; $\omega_0^2 = k/m$; ω_0 – частота власних коливань системи, що відбуваються без сили тертя. Розв'язок рівняння (3) шукатимемо в комплексній формі:

$$x = A_0 e^{i\gamma t}, \quad (4)$$

де A_0 – зміщення в початковий момент часу $t = 0$, γ – величина, яку необхідно означити. Підставивши знайдений розв'язок (3) у диференціальне рівняння (4), отримаємо:

$$A_0 e^{i\gamma t} (\gamma^2 - 2i\beta\gamma - \omega_0^2) = 0. \quad (5)$$

Оскільки множник $A_0 e^{i\gamma t} \neq 0$, то

$$\gamma^2 - 2i\beta\gamma - \omega_0^2 = 0. \quad (6)$$

Звідси

$$\gamma = i\beta \pm \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = i\beta \pm \omega, \quad (7)$$

де

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (8)$$

Підставивши (7) у (4), отримаємо

$$x = A_0 e^{-\beta t} e^{\pm i\omega t}. \quad (9)$$

При великій силі тертя, якщо $\beta > \omega_0$, величина ω є уявною. Тоді величина $i\omega t$ є дійсною й відповідно до (9) зміщення x зменшу-

ватиметься за експоненціальним законом: коливань не буде (рис. 13.2).

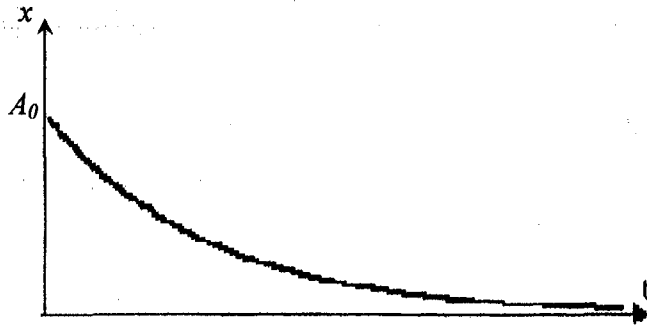


Рис. 15.2

Якщо тертя є невеликим ($\beta < \omega_0$), то величина ω – дійсна. Тоді $e^{\pm i\omega t} = \cos \omega t \pm i \sin \omega t$ і співвідношення (9) набуде вигляду $x = A_0 e^{-\beta t} (\cos \omega t \pm i \sin \omega t)$.

Дійсна й уявна частини цього виразу, тобто $x_1 = A_0 e^{-\beta t} \cos \omega t$ та $x_2 = A_0 e^{-\beta t} \sin \omega t$, є розв'язками рівняння (3). Лінійна комбінація $x = c_1 x_1 + c_2 x_2$, де c_1 і c_2 – довільні сталі, також буде розв'язком того ж рівняння.

Оскільки функції синус і косинус відрізняються тільки значеннями аргументу, то розв'язок можна виразити тільки через одну із вказаних функцій:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (10)$$

де A_0 та φ_0 – початкові амплітуда і фаза. Вони не залежать від властивостей системи, а визначаються початковими умовами, при яких почався рух.

Вираз (10) описує згасаючі коливання, для яких величину

$$A = A_0 e^{-\beta t} \quad (11)$$

умовно називають амплітудою. З (11) випливає, що з часом амплітуда згасаючих коливань зменшується за експоненціальним законом,

причому при збільшенні коефіцієнта β згасання коливань прискорюється. Тому величину β називають коефіцієнтом згасання.

Циклічна частота згасаючих коливань ω визначається зі співвідношення (8). Вона завжди є меншою за частоту власних коливань системи ω_0 .

Величину

$$T = 2\pi/\omega \quad (12)$$

умовно називають періодом згасаючих коливань. $T > T_0 = 2\pi/\omega_0$, де T_0 – період власних коливань при відсутності тертя.

З (11) видно, що за час

$$\tau = 1/\beta \quad (13)$$

амплітуда згасаючих коливань зменшується в e раз. Цей час називають часом згасання (релаксації) коливань.

Ступінь зменшення амплітуди коливань за один період характеризують логарифмічним декрементом згасання Θ . Він визначається як натуральний логарифм відношення двох послідовних амплітуд, розділених проміжком часу, що рівний періоду коливань T :

$$H = \ln \frac{A_1}{A_2} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T = \frac{1}{\tau \nu}, \quad (14)$$

де $\nu = 1/T = \omega/(2\pi)$ – частота згасаючих коливань.

Число коливань, здійснених системою за час згасання τ :

$$N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{H}. \quad (15)$$

Тому логарифмічний декремент згасання Θ можна означити як величину, обернену числу коливань, після здійснення яких амплітуда зменшується в e раз. Так, якщо $\Theta = 0,01$, то це означає, що коливання згасають (амплітуда зменшується в e разів) після здійснення 100 коливань.

Фізичною величиною, яка характеризує енергетичні втрати системи, що здійснює згасаючі коливання, є добротність Q : помножене на 2π відношення енергії, запасеної системою, до енергії, що втрачається нею за один період:

$$Q = 2\pi \frac{E}{|dE/dt|T} \quad (16)$$

При малих значеннях β , коли втрати енергії незначні, $\omega \approx \omega_0$. У цьому випадку енергія системи рівна $E = \frac{m\omega^2 A^2}{2}$. Тоді з (16) з урахуванням (12) отримаємо

$$Q = \pi / \beta T \quad (17)$$

Застосувавши співвідношення (12), (14) і (15), можна отримати зв'язок добротності з іншими характеристиками коливаний:

$$Q = \frac{\omega}{2\beta} = \frac{\pi\nu}{\beta} = \pi\tau\nu = \frac{\pi}{\Theta} = \pi N_e \quad (18)$$

З останньої рівності видно, що добротність рівна числу коливаний, здійснених за час згасання, збільшеному в π раз. Так, якщо $N_e = 100$ коливаний, то добротність системи $Q = 314$.

Порядок виконання роботи

1. Визначити, які необхідно виконати прямі вимірювання для визначення логарифмічного декременту згасання. Скласти таблицю.
2. Ввімкнути установку, виміряти час 5 коливаний.
3. Провести вимірювання амплітуд – початкової та через n коливаний.
4. Застосовуючи робочі формули

$$k = \frac{A_1}{A_n} = \left(\frac{A_1}{A_n} \right)^n \quad \text{та} \quad \Theta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_n} = \beta T,$$

визначити декремент згасання, логарифмічний декремент згасання, коефіцієнт згасання.

5. Назвати систематичні та випадкові похибки, що можуть бути допущені при вимірюванні.
6. Виконати обробку результатів експерименту. Зробити висновки.

Таблиця даних, результатів вимірювань та обчислень

№ досліду	φ_1, \circ	$\varphi_1, \text{рад}$	$\Delta\varphi_1, \text{рад}$	φ_n, \circ	$\varphi_n, \text{рад}$	$\Delta\varphi_n, \text{рад}$	T, с	k	Θ	ε
1.										
сер. знач.										
2.										
сер. знач.										
3.										
сер. знач.										

Контрольні запитання

1. Коливні процеси. Гармонічний коливний рух. Числові характеристики гармонічних коливаний.
2. Кінематичні й динамічні рівняння гармонічних коливаний. Зміщення точки, швидкість, прискорення, квазіпружна сила.
3. Згасаючі коливання. Рівняння згасаючих коливаний.
4. Основні характеристики згасаючих коливаний, їх фізичний зміст.
5. Методика дослідження. Принцип будови та дії установки для визначення декременту й коефіцієнта згасання коливаний.
6. Виведення робочих формул.

Література

1. Практикум по общей физике / под ред. В. Ф. Поздрева. – М. : Просвещение, 1971.
2. Физический практикум / под ред. Г. С. Кембровского. – Минск : Изд-во университетское, 1986. – С. 99–104.

3. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
4. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М.: Просвещение, 1975. – 424 с.
5. Хайкін С. С. Фізичні основи механіки / С. С. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.

Лабораторна робота № 16

Дослідження сил лобового опору в повітрі

Мета роботи: дослідним шляхом визначити силу лобового опору та встановити її залежність від розмірів і форми тіл.

Прилади та матеріали: аеродинамічна труба, аеродинамічні терези, набір тіл різної форми, аерометр, штангенциркуль.

Короткі теоретичні відомості

На тіла, що рухаються в реальних газах, діє сила лобового опору (опору рухові), а за певних умов і підймальна сила. Процеси, які зумовлюють появу цих сил, виникають у тонкому завихреному пограничному шарі. Його товщина, як відмічав М. С. Жуковський, залежить від швидкості потоку; якщо швидкість мала, його товщина значна, а якщо швидкість велика, товщина мала. У пограничному шарі відбувається різке збільшення швидкості від $v_0 = 0$ на поверхні тіла до величини порядку швидкості набігаючого потоку.

При невеликих швидкостях потоку ($Re < 100$) в пограничному шарі – ламінарний режим течії (потік плавно обтікає тіло) – результуюча сила тиску на поверхні, наприклад кулі, дорівнює нулю, оскільки лінії течії симетричні. Сила, яка діє на кулю з боку газу, є силою внутрішнього тертя. Її визначають за законом Стокса $F_x \sim v$.

При збільшенні швидкості потоку картина обтікання різко змінюється, позаду тіла з'являються вихори, які взагалі нерегулярно відриваються від тіла й виносяться потоком, утворюючи вихрову доріжку. Тому в збуреній ділянці за тілом, в якій є вихори, тиск стає меншим за тиск у незбуреному потоці перед тілом. Узагалі, згідно з принципом відносності Галілея, сили, що виникають при взаємодії тіла з газом, не залежать від того, чи рухається тіло, а газ – нерухомий чи газ – рухомий, а тіло – нерухоме. Це покладено в основу аеродинамічних досліджень в аеродинамічній трубі.

Різниця тисків перед фронтом тіла й позаду нього приводить до появи опору рухові. Силу опору F_x визначають за формулою Ньютона:

$$F_x = C_x \rho S v^2, \quad (1)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору; ρ – густина газу; S – міделів переріз (найбільша площа перерізу тіла площиною, перпендикулярною до потоку); v – швидкість потоку. Коефіцієнт лобового опору істотно залежить від форми тіла та його орієнтації відносно потоку. Він також є функцією від числа Рейнольдса (Re).

При обтіканні рідиною симетричного тіла підймальна сила не виникає. Для її виникнення необхідно, щоб тіло, яке обтікається рідиною, було несиметричне або знаходилося несиметрично відносно напрямку потоку. У системі крило – повітря внутрішні сили взаємодії, тобто сили в'язкого тертя і сили тиску, не можуть змінити загальний момент імпульсу. Якщо він до утворення вихорів дорівнював нулю, то, за законом збереження моменту імпульсу, після утворення вихорів момент імпульсу не повинен змінитися. Із цього випливає, що одночасно з утворенням вихорів повинна виникнути циркуляція повітря навколо крила в напрямі, протилежному напрямку обертання вихорів. Унаслідок дії сил в'язкості при несиметричному обтіканні повітрям тіла (крила літака) навколо нього виникає циркуляція повітря, яку називають приєднаним вихором. У результаті цього швидкість повітря над крилом буде більша, ніж під крилом, і, згідно з рівнянням Бернуллі, при циркуляції повітря статичний тиск над крилом зменшується, а під ним збільшується, що зумовлює виникнення підймальної сили крила, напрямленої вгору.

Завдання роботи – перевірити залежність F_x від форми тіла та швидкості потоку повітря й оцінити коефіцієнт C_x для деяких тіл.

Силу лобового опору визначають за допомогою аеродинамічної труби та аеродинамічних терезів. Аеродинамічна труба (рис. 16.1) являє собою циліндр, на кінці якого розміщений вентилятор (компресор), що створює сильний потік

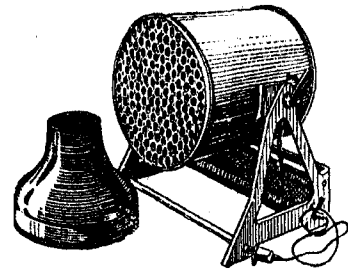


Рис. 16.1

повітря через трубу й компенсує витрати енергії струменя. Для створення рівномірності потоку повітря об'єм труби заповнено системою

паралельних трубок діаметром 2,5 см кожна і закінчується вона дещо звуженим дифузором. Швидкість потоку регулюється силою струму в електродвигуні, яка змінюється реостатом.

Для вимірювання сили лобового опору F_x , а також підймальної сили F_y , використовують двокомпонентні аеродинамічні терези. При вимірюванні F_x або F_y коромисло терезів CD переміщується, відповідно, в горизонтальному і вертикальному напрямках, а модель досліджуваного тіла здійснює тільки поступальний рух (рис. 16.2). Такі

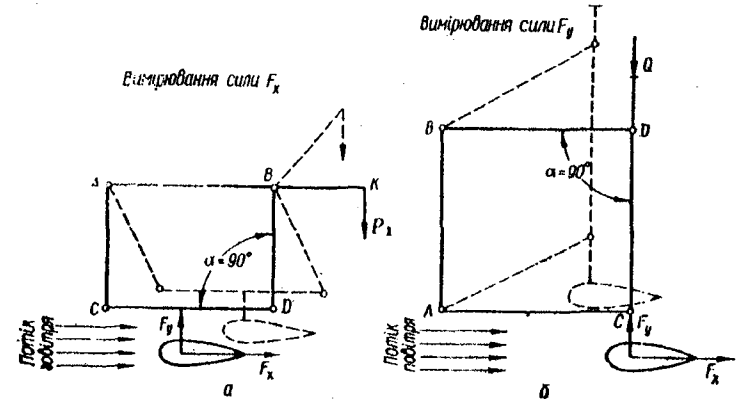


Рис. 16.2

сукупні переміщення забезпечуються особливою конструкцією терезів (шарнірне з'єднання рухомих частин коромисла; A, B, C, D – шарніри; $BD = BK$ і $AC = BD$). При рівновазі терезів момент сили F_x , зрівноважується моментом сили P_1 (рис. 16.2, а). При цьому дія сили P зрівноважується реакцією опори коромисла в шарнірах A і B , якщо кут $\alpha = 90^\circ$. Робоче положення терезів для вимірювання F_x показано на рис. 16.3. Модель досліджуваного тіла закріплюється в затискачі 4. Вантаж 1 призначений для компенсації ваги моделі (при цьому стрілка терезів розміщена проти нуля шкали). Тягарцем 2 змінюють чутливість терезів. Для забезпечення стійкого положення рівноваги терезів тягарець 2 рекомендується поміщати в пайнижче положення. Під час дії потоку повітря на модель нове положення рівноваги терезів досягається накладанням різноважок на шальку терезів 3. Швидкість потоку повітря вимірюють за допомогою аерометра.

Виведення робочої формули

Терези знаходяться в рівновазі, якщо момент сили лобового опору F_x , що діє на тіло з боку потоку повітря, зрівноважується моментом сили P_1 , що діє на тягарець:

$$M_{оп} = M_{тяж}$$

або

$$F_x L = P_1 l,$$

де L – відстань від точки кріплення тіла до його середини, l – відстань від нульової позначки терезів до центра мас тягарця. Оскільки $F_x = C_x \rho S v^2$, а $P_1 = mg$ (де m – маса тягарця), то

$$C_x \rho S v^2 L = mgl.$$

Враховуючи, що $S = \pi d^2/4$, отримаємо $C_x \rho \pi d^2 v^2 L/4 = mgl$, звідки остаточно отримаємо вираз для знаходження коефіцієнта лобового опору:

$$C_x = \frac{4mgl}{\rho \pi d^2 v^2 L}.$$

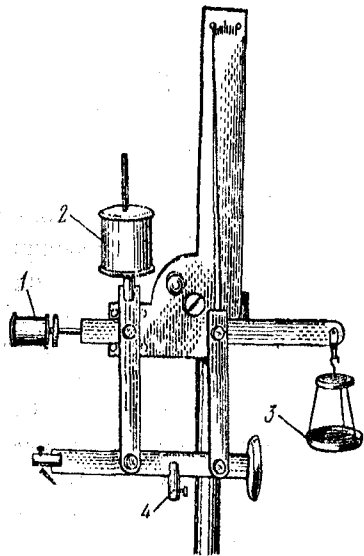


Рис. 16.3

Порядок виконання роботи

1. Встановити аеродинамічну трубу, модель досліджуваного тіла й аерометр на однаковому горизонтальному рівні.
2. Увімкнути електродвигун і створити в трубі найменшу швидкість потоку (реостат увімкнено на повний опір). Внести в потік повітря аерометр і виміряти швидкість потоку на виході труби. Потім, по черзі, вносити в потік повітря моделі досліджуваних тіл, прикріплені до терезів (кругла пластинка, куля, найкраще обтічне тіло), і виміряти силу лобового опору F_x . Досліди повторити не мен-

ше 3–5 разів. Результати вимірювань й обчислень записати в таблицю. Зробити висновок про залежність C_x від форми тіла і швидкості потоку.

3. Виміряти міделеві перерізи моделей досліджуваних тіл і за формулою (1) визначити коефіцієнт лобового опору C_x при відповідних значеннях Re . Здобуті результати занести в таблицю. Зробити висновки про залежність C_x від форми тіла й швидкості потоку.

Таблиця

Форма тіла	№ п/п	m , кг	l , м	Δl , м	L , м	ΔL , м	d , м	Δd , м	v , м/с	C_x
Куля	1.	0,001	0,073	0,001	0,041				8	0,402
	2.		0,071	0,001	0,041			8		
	3.		0,072	0,001	0,041			8		
	сер. зн.		0,072	0,001	0,041			8		
Півкуля	1.	0,001	0,085		0,051				8	0,117
	2.		0,082		0,050			8		
	3.		0,081		0,052			8		
	сер. зн.		0,083		0,051			8		
Добре обтічне тіло	1.	0,001	0,150		0,073				8	1,077
	2.		0,145		0,072			8		
	3.		0,150		0,071			8		
	сер. зн.		0,148		0,073			8		

Контрольні запитання

1. Який режим течії називають ламінарним, турбулентним?
2. Який фізичний зміст числа Рейнольдса?
3. Які основні прилади й установки експериментальної аеродинаміки?
4. Чим зумовлена поява лобового опору?
5. Що таке коефіцієнт лобового опору? Від чого він залежить?
6. Поясніть методику визначення коефіцієнта лобового опору в повітрі.

Література

1. Загальна фізика : Лабораторний практикум : навч. посібник / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Каленков С. Г. Практикум по физике. Механика / С. Г. Каленков, Г. И. Соломаха. – М. : Высш. школа, 1990.
3. Дущенко В. П. Фізичний практикум / В. П. Дущенко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
4. Практикум по общей физике / под ред. В. Ф. Ноздрева. – М. : Просвещение, 1971.
5. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
6. Хайкін С. С. Фізичні основи механіки / С. С. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.

Лабораторна робота № 17

Дослідна перевірка рівняння Бернуллі

Мета роботи: перевірити дослідним шляхом справедливості рівняння Бернуллі.

Прилади та матеріали: експериментальна установка, мензурка, секундомір.

Короткі теоретичні відомості

Опис експериментальної установки

Установка для дослідної перевірки рівняння Бернуллі є трубкою змінного перерізу. Від кожного перерізу відходять вертикальні манометричні трубки. Міліметрова лінійка дає можливість відрахувати різницю рівнів рідини в обох вертикальних трубках (рис. 15.1).

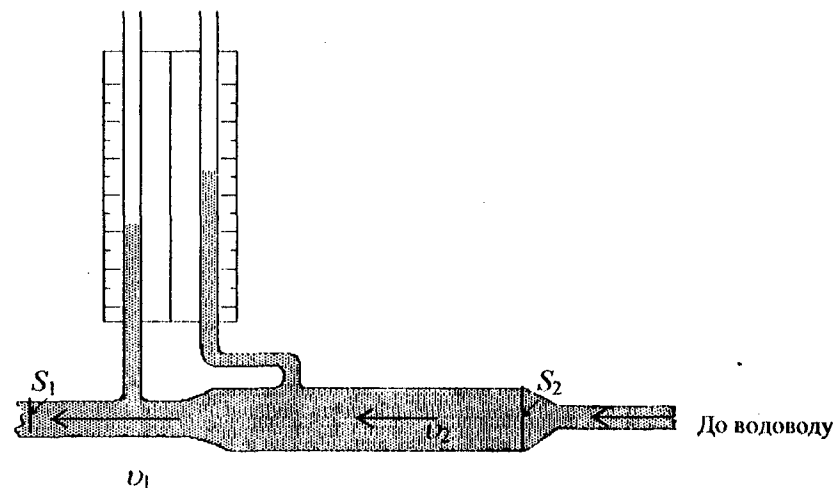


Рис. 17.1

Виведення робочої формули

Перевірка справедливості рівняння Бернуллі здійснюється шляхом порівняння об'ємної витрати води, визначеної за різницею

тисків у перерізах труб S_1 та S_2 (рис. 17.1) (на основі рівняння Бернуллі) з об'ємною витратою води, виміряною за допомогою мензурки та секундоміра.

Згідно з рівнянням Бернуллі, для лінії течії при стаціонарному потоці ідеальної рідини сума статичного, гідростатичного й динамічного тисків є величина стала:

$$P + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}, \quad (1)$$

де P – статичний тиск, ρgh – гідростатичний тиск, $\frac{\rho v^2}{2}$ – динамічний тиск, ρ – густина рідини, h – висота, на якій визначається швидкість стаціонарного потоку рухомої рідини, v – швидкість потоку рідини.

Нехай площі поперечних перерізів трубок рівні S_1 і S_2 , відповідні їм швидкості стаціонарного руху води v_1 та v_2 , статичні тиски – P_1 і P_2 . Тоді рівняння Бернуллі для горизонтальної трубки й умова нерозривності потоку запишеться:

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

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \text{ або } D_1^2 v_1 = D_2^2 v_2,$$

де D_1 і D_2 – діаметри трубок.

Розв'язавши систему рівнянь (2) щодо v_2 , отримаємо:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}\right)}}. \quad (3)$$

Витрата води (об'єм води, який проходить через поперечний переріз за одну секунду) визначається за формулою:

$$Q = S_2 v_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}\right)}}. \quad (4)$$

Різниця тисків, виміряна за допомогою манометра, дорівнює

$$P_1 - P_2 = \rho g \Delta h, \quad (5)$$

де ρ – густина води, Δh – різниця висот стовпів води в манометричних трубках.

Беручи до уваги, що $D_1^4 \gg D_2^4$, отримаємо першу робочу формулу для підрахунку витрат води:

$$Q = \frac{\pi D_2^2}{4} \cdot \sqrt{2g \Delta h}. \quad (6)$$

Діаметр $D_2 = 7$ мм.

Другу робочу формулу

$$Q' = \frac{V}{t} \quad (7)$$

отримаємо безпосередньо вимірюванням об'єму води V , що натікає в мензурку за час t .

Порівнюючи величину витрати води Q з величиною Q' , отриманою за формулою (6), переконаємося у справедливості рівняння Бернуллі.

Порядок виконання роботи

1. Частково відкрити водопровідний кран, пустити воду в установку. Забезпечити стаціонарний потік води.
2. Зробити відлік різниці рівнів Δh води в обох колінах манометра.
3. Вставити водозливний шланг у мензурку, включивши одночасно секундомір; виключити секундомір у момент відведення шланга від мензурки. Вимірювання повторити 3 рази.
4. Аналогічні виміри провести для трьох різних значень швидкості потоку, яка регулюється краном.
5. Результати вимірювань занести в таблицю; розрахувати витрати води Q та Q' й порівняти їх для кожного зі значень швидкості потоку. Обчислити похибку експерименту. Зробити висновки про збіг обчислених значень у межах похибки вимірювань.

Таблиця 1

№ n/n	$\Delta h, м$	$t, с$	$Q, м^3/с$	$\Delta Q, м^3/с$	$\epsilon, \%$	$Q', м^3/с$	$\Delta Q', м^3/с$	$\epsilon, \%$
u_1	1.							
	2.							
	3.							
	с/з							
u_2	1.							
	2.							
	3.							
	с/з							
u_3	1.							
	2.							
	3.							
	с/з							

Контрольні запитання

1. Яку рідину називають ідеальною? Що таке лінія течії, трубка течії, поле швидкостей, стаціонарна течія?
2. Сформулюйте теорему про нерозривність струменя рідини.
3. Тиск у рухомій рідині. Вимірювання тиску рухомої рідини.
4. Сформулюйте і виведіть рівняння Бернуллі.
5. Що таке питома кінетична енергія рідини, питома потенціальна енергія рідини, питома енергія тиску?
6. Схема установки для перевірки рівняння Бернуллі.
7. Виведення робочої формули.

Література

1. Душенко В. П. Фізичний практикум / В. П. Душенко [та ін.]. – К. : Радянська школа, 1980. – Ч. 1.
2. Практикум по общей физике / под ред. В. Ф. Ноздрева. – М. : Просвещение, 1971.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987.
4. Хайкін С. С. Фізичні основи механіки / С. С. Хайкін. – К. : Радянська школа, 1966.

Лабораторна робота № 18

Визначення коефіцієнта тертя кочення й ковзання за допомогою похилого маятника

Мета роботи: вивчити причини виникнення тертя кочення. Визначити коефіцієнт тертя кочення.

Прилади та матеріали: установка ФМ-16, штангенциркуль.

Короткі теоретичні відомості

Під час кочення циліндра по поверхні виникають сили тертя. Якщо циліндр котиться без ковзання, то створюється сила тертя спокою. Величина цієї сили визначається законом Кулона:

$$F \leq kN, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт тертя спокою,
 N – сила нормального тиску.

Сила тертя завжди паралельна стичній поверхні тіл. Якщо циліндр котиться із проковзуванням, то появляється сила тертя ковзання, величина якої визначається рівністю

$$F_1 = k_1 N. \quad (2)$$

Коефіцієнт тертя k_1 залежить не тільки від властивостей поверхонь, що труться, але й від відносної швидкості.

При малих швидкостях його вважають постійним і рівним $k_1 \approx k$.

Під час кочення циліндра по площині необхідно враховувати непружну деформацію площини і циліндра. Сила реакції опори \vec{Q} не проходить через центр ваги циліндра, а трохи

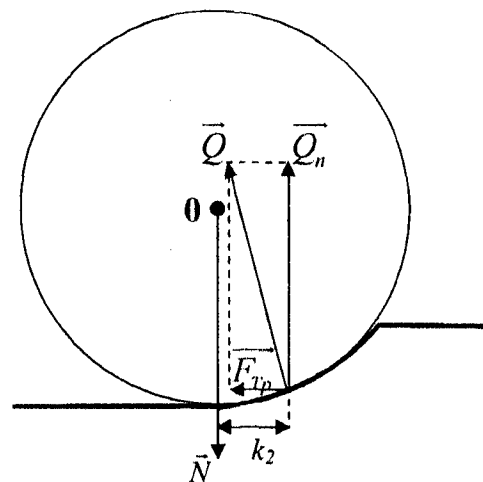


Рис.18.1

вперед у напрямку руху. Горизонтальна складова являє собою силу тертя кочення $F_{тр}$. Момент сили тертя кочення відносно т. О рівний добутку нормальної складової сили реакції Q_n на зміщення k_2 (рис. 18.1):

$$M = F_{mp} \cdot R = Q_n \cdot k_2, \quad (3)$$

де k_2 – плече дії сили;

R – радіус циліндра.

З рівняння (3)

$$F_{mp} = k_2 \frac{Q_n}{R}.$$

Нормальну складову сили реакції Q_n можна вважати рівною вазі циліндра

$$Q_n \approx N.$$

Тоді

$$F_{mp} = k_2 \frac{N}{R}. \quad (4)$$

Величину k_2 називають коефіцієнтом тертя кочення. Він суттєво відрізняється від коефіцієнтів k і k_1 , оскільки є розмірною величиною і, по суті, характеризує плече сили тиску опори відносно осі циліндра.

Маятник похилий, зображений на рис. 18.2, включає в себе: основу 1; стійку 2, у верхній частині якої встановлюється верхній кронштейн 3 із платформою 4; маятник кочення встановлюється на верхньому кронштейні 3 по чергово.

Платформа 4 має прямокутне вікно, в яке вставляються змінні зразки у вигляді пластин із латуні, сталі, алюмінію і фторпла-

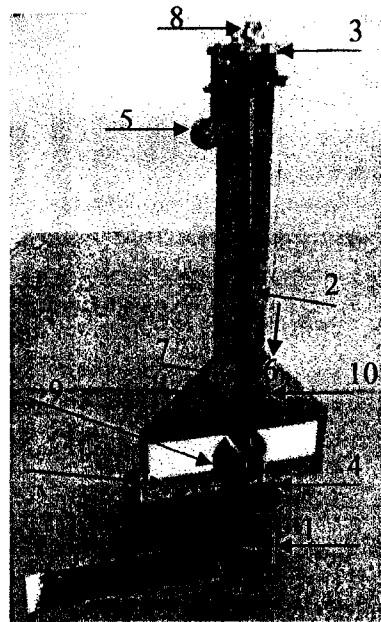


Рис. 18.2

сту. В нижній частині платформи нанесена шкала відліку кута відхилення маятника. За допомогою гвинта 5 платформа відхиляється від вертикального положення. Кут відхилення платформи визначається за допомогою шкали 6, яка закріплена в нижній частині платформи.

Маятник кочення являє собою металічний стержень 7, з призматичною опорою 8 та обоймою 9, в яку вставляються змінні зразки у вигляді зрізаної кулі.

Маятник кочення – це металічна куля, підвішена на капроновій нитці 10. Кулі є змінними й виготовляються з алюмінію, латуні та сталі. Кут нахилу маятника відраховують по шкалі. Тертя кочення виникає під час кочення кульки по поверхні твердого пластичного тіла. Виникнення тертя кочення можна пояснити деформаціями кульки і площини. Визначення коефіцієнта тертя кочення ґрунтується на вимірюванні величини амплітуди коливань маятника, яка зменшується в результаті роботи сил тертя кочення.

Знайдемо вираз для визначення коефіцієнта тертя кочення. За n коливань при переході маятника з т. В у точку В' маятник втрачає енергію $\Delta E_p = mg \Delta h$, яка рівна роботі сил опору на пройденому кулькою шляху S .

$$\Delta E_p = \Delta A,$$

де ΔA – робота сил тертя кочення.

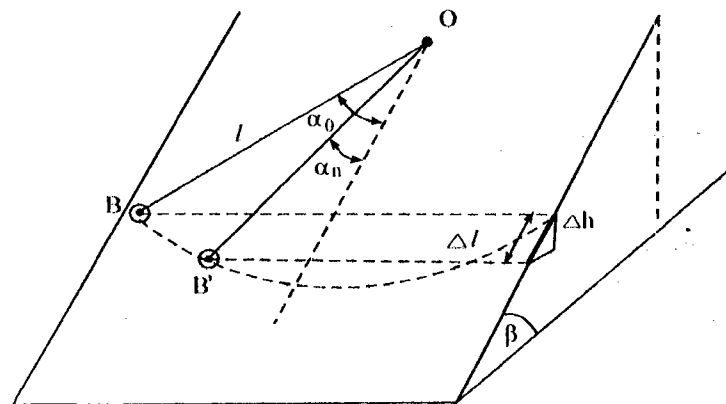


Рис. 18.3

Враховуючи, що $\Delta A = F_{mp} \cdot S$, отримаємо
 $mg \Delta h = F_{mp} S$.

З рисунка 18.3 видно, що $\Delta h = \Delta l \sin \beta$. Тоді з урахуванням рівності (4) і того, що $N = mg \cos \beta$, отримаємо:

$$mg \Delta l \sin \beta = k_2 mg \frac{S}{R} \cos \beta, \quad (5)$$

де R – радіус кульки, β – кут нахилу маятника.

Відстань

$$\Delta l = l (\cos \alpha_n - \cos \alpha_0), \quad (6)$$

де α_0 – амплітудне значення кута відхилення маятника в початковий момент часу, α_n – амплітудне значення кута через n коливань, l – довжина маятника.

Відстань, яку пройде кулька за n коливань, знаходять за формулою:

$$S = 4l n \alpha_{cp}, \quad (7)$$

$$\text{де } \alpha_{cp} = \frac{\alpha_0 + \alpha_n}{2} \quad (8)$$

При малих значеннях α_0 і α_n

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2}. \quad (9)$$

З формули (5) коефіцієнт тертя k_2 відповідно рівний:

$$k_2 = \frac{R \operatorname{tg} \beta \Delta l}{S} = \frac{R \operatorname{tg} \beta (\cos \alpha_n - \cos \alpha_0)}{2n(\alpha_0 + \alpha_n)}.$$

Ураховавши формулу (9), отримаємо вираз для знаходження коефіцієнта тертя кочення.

$$k_2 = R \operatorname{tg} \beta \frac{(\alpha_0 - \alpha_n)}{4n}. \quad (10)$$

З (10) видно, що для визначення коефіцієнта тертя кочення необхідно виміряти діаметр кульки, кути відхилення нитки (відповідно, початковий та кінцевий), число повних коливань кульки та величину кута нахилу нитки до горизонту.

Порядок виконання роботи

Дослід 1. Визначення коефіцієнта тертя кочення.

1. Виміряти радіус кульки.
2. Нахилити площину маятника на кут $\beta \approx 3^\circ$.
3. Відхилити кульку від положення рівноваги на кут $\alpha_0 = 5^\circ$ і відпустити.
4. Визначити величину кута α_n після п'яти повних коливань. Дослід повторити три рази при одному й тому ж значенні α_0 , обчисливши при цьому середнє значення α_{cp} .
5. Виміряні величини занести в таблицю і за формулою (10) обчислити середнє значення коефіцієнта тертя кочення.
6. Пункти 3° – 5° повторити для $\beta = 6^\circ$ і $\beta = 10^\circ$.
7. Оцінити похибку вимірювання коефіцієнта тертя кочення.

Таблиця 1

№ п/п	R , м	ΔR , м	β , рад	$\Delta \beta$, рад	α_0 , рад	$\Delta \alpha_0$, рад	α_n , рад	$\Delta \alpha_n$, рад	n	k_2 , м
1.										
2.										
3.										
сер.										

Дослід 2. Визначення коефіцієнта тертя ковзання.

1. Скласти установку “Маятник похилий” (див. рис. 16.2).
2. Встановити кут нахилу платформи рівний 0° .
3. Використовуючи маятник кочення як вертикальний орієнтир, за допомогою регульованих опор основи виставити стійку приладу в строго вертикальному положенні.
4. Протерти досліджувані поверхні змінних пластин, зрізаної кулі та кулі маятника кочення етиловим спиртом і витерти насухо.
5. Встановити сталеву пластину на платформу 4.
6. Вставити зрізану сталеву кулю в обійму 9 маятника ковзання сферичною поверхнею назовні.
7. Підвісити маятник ковзання за допомогою призматичної опори на верхній кронштейн 3 так, щоб зрізана куля доторкнулася до встановленої на платформу пластиною і вісь маятника була паралельна лицьовій поверхні платформи.

Контрольні запитання

8. У разі необхідності підрегулювати положення підставки так, щоб покажчик маятника опинився напроти нульової поділки шкали відліку кута відхилення маятника, але без порушення вертикального положення стійки.

9. Встановити кут нахилу платформи рівний 2° .

10. Відвести рукою маятник в одне з крайніх положень і записати початковий кут відхилення α_0 за шкалою відліку кута відхилення маятника.

11. Відпустити маятник і записати кут відхилення α_n при здійсненні маятником n повних коливань. Перевести значення кутів у радіанну міру.

12. Виміряти величини занести в таблицю 2.

13. Визначити середнє значення коефіцієнта тертя ковзання за формулою: $k_1 = \operatorname{tg} \beta \frac{(\alpha_0 - \alpha_n)}{4n}$, де $\beta = 90^\circ - \gamma = 88^\circ$. Формула справедлива за умови, що кут $\gamma \leq 2^\circ$.

14. Повторити пункти 5–13 для пластини із фторпласту.

15. Обчислити похибки вимірювання та зробити висновки.

Таблиця 2

№ п/п	Пластина	β , рад	$\Delta\beta$, рад	α_0 , рад	$\Delta\alpha_0$, рад	α_n , рад	$\Delta\alpha_n$, рад	n	k_1
1.	Стальна								
2.									
3.									
сер.									
1.	Фторпластова								
2.									
3.									
сер.									

1. Тертя. Тертя спокою. Тертя ковзання. Сила тертя.
2. Закон Амонтона – Кулона.
3. Тертя кочення. Методика визначення коефіцієнта тертя кочення та ковзання.

Література

1. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1986. – 320 с.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероной – М. : Наука, 1983. – 352 с.
3. Гольдин Л. Л. Лабораторные занятия по физике / Л. Л. Гольдин [и др.]. – М. : Наука, 1983. – 704 с.
4. Савельев И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – 432 с. – Т. 1.
5. Лабораторный практикум по физике / под ред. А. С. Ахматова. – М., 1980. – 360 с.
6. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероной. – М. : Наука, 1967. – 352 с.
7. Гольдин Л. Л. Лабораторные занятия по физике / Л. Л. Гольдин [и др.]. – М. : Наука, 1983. – 704 с.

Лабораторна робота № 19

Дослідження співудару куль

Мета роботи: експериментальне підтвердження закону збереження імпульсу при пружному співударі куль.

Прилади та матеріали: прилад “Співудар куль” ФМ-17, змінні кульки (сталь, алюміній, латунь).

Короткі теоретичні відомості

У замкнутій системі при центральному абсолютно пружному ударі двох куль виконується закон збереження механічної енергії і закон збереження імпульсу:

$$\frac{m_1 \vec{v}_1^2}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_2^2}{2} = \frac{m_1 \vec{u}_1^2}{2} + \frac{m_2 \vec{u}_2^2}{2} \quad (1)$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2, \quad (2)$$

де m_1, m_2 – маси кульок;

\vec{v}_1, \vec{v}_2 – швидкості кульок до удару;

\vec{u}_1, \vec{u}_2 – швидкості кульок після удару.

У даній роботі дві кулі висять на нитках рівної довжини l (відстань від точки підвісу до центра тяжіння кульок) (рис. 19.1). Якщо кулю з масою m_1 відхилити на кут α_1 і відпустити, то в момент удару вона матиме швидкість \vec{v}_1 . Цю швидкість можна визначити, виходячи із закону збереження механічної енергії. Кулька, піднята на висоту h над положенням рівноваги, володіє потенційною енергією m_1gh , яка в процесі руху переходить у кінетичну енергію, причому

$$m_1gh = \frac{m_1 \vec{v}_1^2}{2}, \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння.

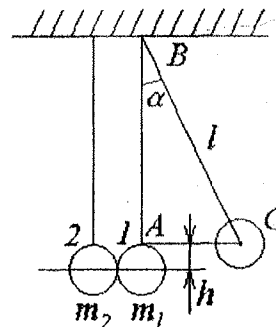


Рис. 19.1.

У даному досліді простіше й точніше виміряти не висоту підйому h , а кутову відстань α_1 (кут α_1 , з якого відпускається куля). З рис. 19.1 випливає, що

$$h = l - l \cos \alpha_1 = l(1 - \cos \alpha_1) = 2l \sin^2(\alpha_1/2). \quad (4)$$

З рівності (3) з урахуванням формули (4) отримасмо формулу для швидкості кулі:

$$v_1 = \sqrt{2gh} = 2\sqrt{gl} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right). \quad (5)$$

Імпульс куль до зіткнення (друга куля нерухома) дорівнює:

$$\vec{P} = m_1 \vec{v}_1, \quad (6)$$

де m_1 – маса ударяючої кулі разом із підвіскою;

\vec{v}_1 – швидкість ударяючої кулі.

Сумарний імпульс куль після пружного удару визначається за формулою:

$$\vec{P}' = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2, \quad (7)$$

де m_2 – маса кулі, що ударяється з підвіскою;

\vec{u}_1 – швидкість ударяючої кулі після зіткнення;

\vec{u}_2 – швидкість кулі, що ударяється, після зіткнення.

Величини швидкостей u_1 і u_2 розраховуються за формулами:

$$u_1 = 2\sqrt{gl} \sin\left(\frac{\alpha_1'}{2}\right); \quad (8)$$

$$u_2 = 2\sqrt{gl} \sin\left(\frac{\alpha'_2}{2}\right), \quad (9)$$

де α'_1 – кутова відстань, на яку після зіткнення відскочила ударяюча куля;

α'_2 – кутова відстань, на яку після зіткнення відскочила куля, що ударялася.

Опис лабораторної установки

Загальний вигляд установки для дослідження зіткнення куль представлений на рис. 19.2.

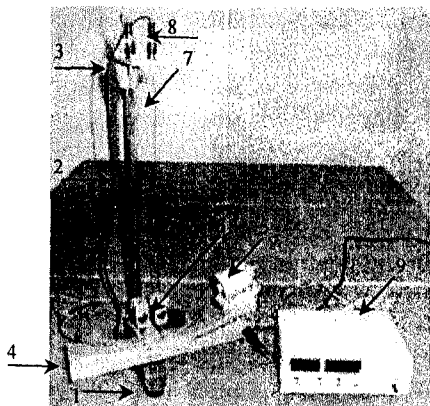


Рис. 19.2

Прилад ФМ-17 розміщується на підставці 1, яка вирівнюється за допомогою регулюючих ніжок; стійка 2, у верхній частині якої встановлюється кронштейн верхній 3, призначений для підвіски куль; корпус, призначений для кріплення шкали 4 кутових переміщень; електромагніт 5, призначений для фіксації початкового положення однієї з куль 6; вузли регулювання, що забезпечують прямий

центральний удар куль; нитки 7 для підвіски металевих куль; провідники для забезпечення електричного контакту куль із клемми 8. Для пуску кулі й підрахунку часу до зіткнення служить блок управління 9. Металеві кулі 6 виготовлені з алюмінію, латуні і сталі.

Порядок виконання роботи

1. Вставити сталеві кулі 6 у скоби підвісу.
2. За допомогою регулювальних опор виставити підставку установки так, щоб нижні візири скоб підвісу вказували на нулі шкали.

3. Відрегулювати положення куль у вертикальній і горизонтальній площинах до зіставлення верхніх візирів скоб підвісу. Регулювання проводити за допомогою зміни довжини підвісу куль, а також змінюючи положення вузлів кріплення ниток на верхньому кронштейні.

4. Натиснути кнопку “СЕТЬ” блоку. При цьому повинно включитися табло індикації. Натиснути кнопку “СТОП”. При цьому повинен включитися електромагніт.

5. Відвести праву кулю на кут α_1 (приблизно чотирнадцять градусів) і зафіксувати його за допомогою електромагніта.

6. Натиснути кнопку “ПУСК”. При цьому відбудеться удар куль. За допомогою таймера блоку визначити час зіткнення куль t . Натиснути кнопку “СТОП”.

7. Визначити час зіткнення для різних пар куль, повторивши пункти 5–6. Отримані дані занести в таблицю.

8. Зробити висновок про залежність часу зіткнення від механічних властивостей матеріалів співударяючих куль.

9. Відвести праву кулю на кут α_1 (приблизно чотирнадцять градусів) і зафіксувати його за допомогою електромагніта.

10. Натиснути кнопку “ПУСК”. При цьому відбудеться удар куль. За допомогою кутової шкали визначити кути α'_1 , α'_2 і записати в таблицю.

11. Повторити вимірювання кутів α'_1 , α'_2 згідно з пунктами 9–10 для різних пар куль.

12. Після вимірювань вимкнути мікросекундомір за допомогою кнопки “МЕРЕЖА”.

13. Виміряти довжину підвісу куль l як відстань між центром кулі та стержнем верхнього кронштейна.

14. Обчислити середні значення кутів α'_1 , α'_2 .

15. Провести розрахунок швидкостей куль до і після удару за формулами (5), (8), (9).

16. Обчислити за формулою $F_{cp} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$ середню силу удару.

17. Обчислити імпульси куль до і після удару за формулами (6), (7). Маса куль указані на лабораторній установці.

17. Розрахунки провести для куль трьох типів, і дані внести в таблицю.

18. Перевірити рівність (6) і зробити висновок.

19. Визначити відносне відхилення від закону збереження імпульсу

$$E = \frac{(P - P')}{P}$$

де P – імпульс системи куль до удару;

P' – імпульс системи куль після удару.

Таблиця 1

№ п/п	Тип кулі	t, с	α_1 , °	α_1' , °	α_2' , °	v_1 , м/с	u_1 , м/с	u_2 , м/с	P, кг·м/с	P', кг·м/с
1.	сталь									
2.										
3.										
Сер. зн.										
1.	алюміній									
2.										
3.										
Сер. зн.										
1.	латунь									
2.										
3.										
Сер. зн.										

Контрольні запитання

1. Що таке удар? Який удар називають центральним?
2. Як зміниться кінетична енергія кульок та їх відносна швидкість при різних видах удару: абсолютно пружному, непружному і абсолютно непружному?
3. Сформулювати закон збереження імпульсу.
4. Експериментальна установка та методика вимірювання.

Література

1. Загальна фізика. Лабораторний практикум / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. проф. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967.
3. Архангельский М. М. Курс физики. Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1975. – 424 с.
4. Кучерук І. М. Загальна фізика. Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка / І. М. Кучерук. – К. : Вища школа, 1993.

Лабораторна робота № 20

Визначення моменту інерції твердого тіла за допомогою крутильного маятника

Мета роботи: експериментальне визначення моменту інерції твердого тіла відносно довільної осі методом коливань.

Прилади та матеріали: крутильний маятник FPM-05 і набір досліджуваних тіл (куб і два паралелепіпеди).

Короткі теоретичні відомості

При обертальному русі твердого тіла відносно нерухомої осі момент імпульсу пов'язаний із вектором кутової швидкості співвідношенням:

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

де \vec{L} – момент імпульсу твердого тіла;
 J – момент інерції відносно осі обертання;
 $\vec{\omega}$ – вектор кутової швидкості тіла.

Основний закон динаміки обертального руху в цьому випадку набуває вигляду:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(J\vec{\omega})}{dt} = \vec{M}, \quad (2)$$

де \vec{M} – сумарний момент зовнішніх сил відносно нерухомої осі.

Диференціюючи вираз у круглих дужках, отримуємо:

$$J \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{M}. \quad (3)$$

Оскільки обертальний рух відбувається відносно нерухомої осі, то вектори $\vec{\omega}$, $\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$ і \vec{M} колінеарні й рівняння (3) може бути записано в скалярному вигляді:

$$J \cdot \frac{d\omega'}{dt} = M. \quad (4)$$

При розгляді вільних крутильних коливань єдиним моментом сил є момент сил кручення, величина якого визначається співвідношенням:

$$M = -Dj, \quad (5)$$

де D – модуль кручення;

j – кут кручення.

Знак (-) в (5) указує на те, що момент сил кручення направлений проти зміни кута кручення. Підставляючи (5) в (4) і враховуючи зв'язок між кутовою швидкістю і кутом повороту, отримуємо:

$$J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -D\varphi \quad (6)$$

або

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{D\varphi}{J} = 0. \quad (7)$$

Рівняння (7) є рівнянням гармонічних коливань. Його розв'язок має вигляд:

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega_0 t + \theta), \quad (8)$$

де φ_0 – амплітуда коливань;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{J}} \quad \text{– власна частота коливань;}$$

θ – початкова фаза.

Період коливань крутильного маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}} \quad (9)$$

залежить від моменту інерції тіла, що обертається.

Співвідношення (9) можна використовувати для експериментального знаходження моменту інерції твердого тіла, що бере участь у крутильних коливаннях, за виміряним періодом коливань T крутильного маятника:

$$J = \frac{T^2 \cdot D}{(2\pi)^2}. \quad (10)$$

Крутильний маятник можна використовувати для вимірювання моментів інерції тільки симетричних тіл, в яких центр мас лежить на осі обертання.

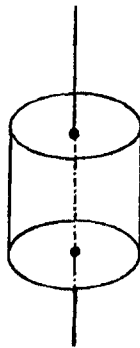
Обчислення моменту інерції є загалом складним завданням. Проте, якщо густина тіла у всьому об'ємі тіла постійна (однорідні тіла) і якщо тіло має правильну геометричну форму, то обчислення моменту інерції тіл відносно головних осей можна здійснити за допомогою інтегрування. Нижче приведені результати таких обчислень для деяких тіл.

1. Момент інерції суцільного циліндра (диска) відносно осі, яка збігається з віссю симетрії:

$$J = \frac{1}{2} m R^2, \quad (11)$$

де m – маса циліндра;

R – радіус основи циліндра.

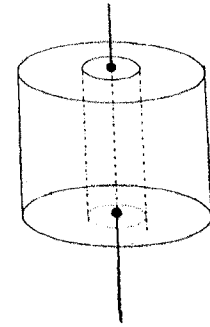


2. Момент інерції товстостінного циліндра (кільця) відносно осі, яка збігається з віссю симетрії:

$$J = \frac{1}{2} m (R_1^2 - R_2^2), \quad (11)$$

де R_1 – зовнішній радіус циліндра;

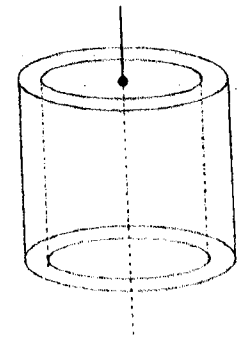
R_2 – внутрішній радіус циліндра.



3. Момент інерції полого тонкостінного циліндра (обруча) відносно осі, яка збігається з віссю симетрії:

$$J = m R^2, \quad (12)$$

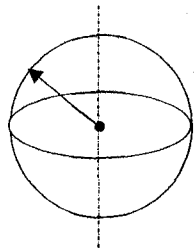
де R – радіус циліндра.



4. Момент інерції кулі відносно осі, яка збігається з віссю симетрії:

$$J = \frac{2}{5} m R^2, \quad (13)$$

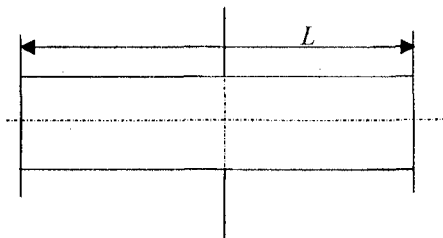
де R – радіус кулі.



5. Момент інерції довгого тонкого стержня відносно осі, що проходить через середину стержня і перпендикулярна до нього:

$$J = \frac{1}{12} mL^2, \quad (14)$$

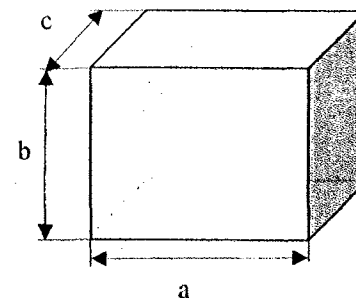
де L – довжина стержня.



6. Моменти інерції суцільного прямокутного паралелепіпеда відносно головних осей інерції, що проходять через центри протилежних граней:

$$\begin{aligned} J_{O_1O_1} &= \frac{1}{12} m(a^2 + b^2); \\ J_{O_2O_2} &= \frac{1}{12} m(b^2 + c^2); \\ J_{O_3O_3} &= \frac{1}{12} m(a^2 + c^2), \end{aligned} \quad (15)$$

де a, b, c – довжини ребер паралелепіпеда.



У випадку, коли тіла, які мають складну геометричну форму або довільну вісь обертання, простішим є експериментальне визначення моменту інерції методом крутильних коливань.

У даній роботі досліджуваним тілом є куб або паралелепіпед. Спочатку потрібно визначити період T_O крутильних коливань досліджуваного тіла відносно однієї з головних осей інерції (момент інерції щодо головної осі може бути обчислений за відомими формулами). Для визначення моменту інерції досліджуваного тіла відносно деякої осі необхідно виміряти період T_X крутильних коливань тіла відносно цієї осі.

Відношення цих періодів дасть таку пропорцію:

$$\frac{T_X}{T_O} = \sqrt{\frac{J_X}{J_O}}. \quad (16)$$

З неї отримаємо вираз для моменту інерції тіла J_X відносно деякої довільної осі:

$$J_X = J_O \left(\frac{T_X}{T_O} \right)^2. \quad (17)$$

Опис експериментальної установки

У комплект лабораторної установки входять крутильний маятник FPM-05 і набір досліджуваних тіл (куб і два паралелепіпеди). Крутильний маятник (рис. 20.1) призначений для визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою крутильних коливань.

На основі установки (2), яка оснащена чотирма ніжками з регульованою висотою, прикріплений мілісекундомір (1), а також ко-

лонка (3), на якій за допомогою притискних гвинтів закріплені кронштейни (4) і (6). Кронштейни (4) і (6) мають затиски, які служать для закріплення сталевго дроту, на якому підвішена рамка (7). На кронштейні (5) кріпиться сталева планка (8), яка служить основою для фотоелектричного датчика (9), електромагніта (10) і кутової шкали (11). Електромагніт (10) може змінювати положення на планці, а його положення відносно фотоелектричного датчика показує на кутовій шкалі стрілка, прикріплена до електромагніта.

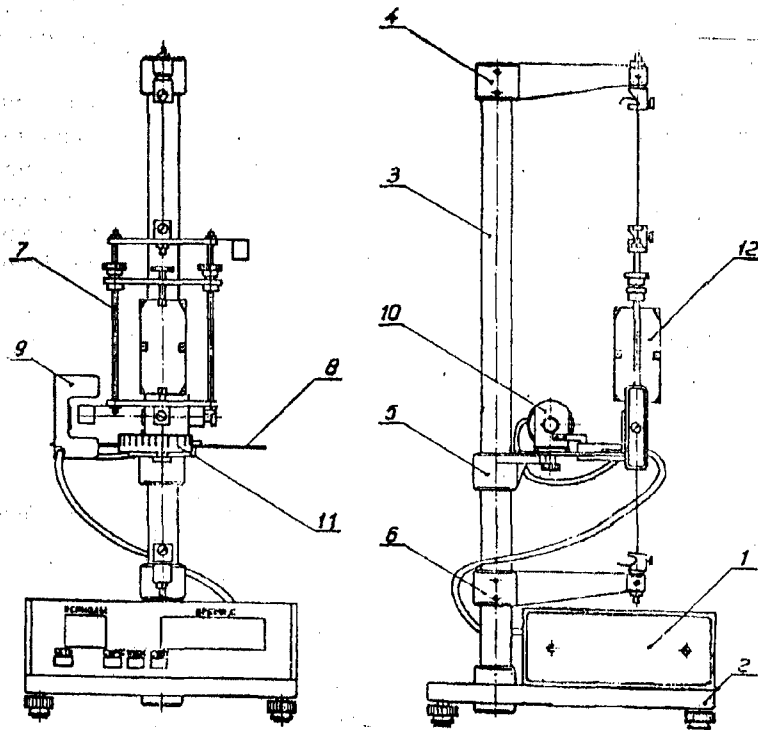


Рис. 20.1

Конструкція рамки дозволяє закріплювати досліджувані тіла (12), що значно відрізняються один від одного за зовнішніми розмі-

рами. Досліджувані тіла кріпляться за допомогою рухомої балки, яка переміщається по направляючих між нерухомими балками.

Фотоелектричний датчик та електромагніт сполучені з мілісекундоміром за допомогою роз'єму.

Світловий потік від лампочки потрапляє на фоторезистор. Під час коливань крутильного маятника стрілка рамки перериває світловий потік, внаслідок чого у схемі формуються електричні імпульси, які після посилення підводяться до входу мілісекундоміра.

Порядок виконання роботи

1. Закріпити в рамці приладу досліджуване тіло так, щоб вісь підвісу проходила через середини протилежних граней, для цього перемістити рухому балку по тих, що направляють, між нерухомими балками на необхідну відстань і затягнути гайки.

2. Натиснути кнопку "СЕТЬ".

3. Повертаючи рамку приладу, наблизити її стрілку до електромагніта так, щоб електромагніт зафіксував положення рамки.

4. Обнулити лічильник часу натисненням кнопки "СБРОС". Індикатори мілісекундоміра повинні висвічувати нулі.

5. Натиснути кнопку "ПУСК". Після звільнення рамки від електромагніта вона здійснюватиме крутильні коливання.

6. Виміряти час десяти коливань крутильного маятника (кнопка "СТОП" натискається після появи цифри 9 у віконці "ПЕРІОДИ" і записати час t_0 у таблиці 1.

7. Відпустити кнопку "ПУСК" і повернути рамку з досліджуваним тілом, наблизивши її стрілку до електромагніта. Рамка утримуватиметься електромагнітом.

8. Повторити вимірювання часу t_0 5–6 разів (t_0 – час крутильних коливань тіла навколо головної вертикальної осі) згідно з пунктами 4–7.

9. Вимірювання виконати відносно різних головних осей досліджуваного тіла.

10. Закріпити в рамці приладу досліджуване тіло так, щоб вісь підвісу проходила через протилежні вершини вантажу (збігалася з однією з діагоналей паралелепіпеда). Виміряти час десяти крутильних коливань t_x і занести в таблицю 1.

11. Після закінчення вимірювань вимкнути мілісекундомір і вийняти вантаж із рамки приладу.

Таблиця 1

№ п/п	t_0, c	T_0, c	t_x, c	T_x, c	$\Delta T_x, c$	$\Delta T_0, c$
1.						
2.						
6.						
Сер. зн.						

Обчислення й обробка результатів

1. Обчислити періоди крутильних коливань T_0 і T_x за формулою:

$$T = t / 10.$$

2. Провести розрахунок похибки результатів прямих вимірювань T_0 і T_x .

3. Обчислити моменти інерції J_0 досліджуваного тіла відносно головних осей за відомими теоретичними формулами, а також використовуючи експериментальні дані, отримані методом крутильних коливань. Порівняти отримані результати.

4. Вивести формулу для похибки ΔJ_0 й обчислити ці похибки.

5. Обчислити момент інерції тіла J_x відносно вертикальної осі, яка збігається з однією з діагоналей паралелепіпеда.

6. Вивести формулу для розрахунку похибки ΔJ_x й обчислити її.

7. Порівняти експериментальні і теоретичні результати, зробити висновок.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте основний закон динаміки обертального руху твердого тіла. Дайте визначення всіх величин, що входять до нього.
2. Що називається моментом інерції матеріальної точки і твердого тіла відносно осі обертання? Який його фізичний зміст?
3. Що називається головними осями тензора інерції тіла?
4. Теорема Штейнера.
5. Які способи для визначення моментів інерції симетричних тіл ви можете запропонувати?

6. Напишіть основне рівняння динаміки для тіла, що здійснює крутильні коливання.
7. За яким законом змінюється кут повороту тіла при крутильних коливаннях?
8. Дайте визначення амплітуди, частоти, періоду і фази гармонійних коливань.
9. Від чого залежить період вільних крутильних коливань?
10. Що таке деформація кручення? Що таке модуль кручення і від чого він залежить?
11. Порівняйте між собою метод крутильних коливань і метод інтегрування, що використовуються для визначення осьових моментів інерції, за точністю та інформативністю.

Література

1. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1986. – 320 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – 432 с. – Т. 1.

3. Таблиці фізичних величин

Деякі основні фізичні сталі

Таблиця 1

Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Гравітаційна стала	$\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Маса електрона	$m_e = 9,1083 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Заряд електрона	$e = 1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса протона	$m_p = 1836,10 m_e$

Густина газів

(за температури 0°C і нормального атмосферного тиску)

Таблиця 2

Речовина	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Речовина	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Азот	1,2505	Кисень	1,42896
Водень	0,08988	Метан	0,7168
Водяна пара	0,768	Неон	0,8999
Повітря сухе	1,2928	Вуглекислий газ	1,2500
Гелій	0,1785	Хлор	3,22

* Склад повітря: 78,03% N₂, 20,99% O₂, 0,933% Ar, 0,03% CO₂ та ін.

Густина рідин при t = 20°C

Таблиця 3

Речовина	$\rho, 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Речовина	$\rho, 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Ацетон	0,787	Ефір	0,72
Бензол	0,8790	Ртуть	13,5
Вода	0,9982	Спирт етиловий	0,7893
Гліцерин	1,264	Толуол	0,8670

Густина твердих тіл

Таблиця 4

Речовина	$\rho, 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Речовина	$\rho, 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Бронза (фосфориста)	8,7 – 8,9	Свинець	11,34
Дюралюміній	2,79	Скло	2,5
Константан	8,88	Срібло	10,5
Латунь	8,4 – 8,7	Сталь	7,7 – 7,9
Мідь	8,9	Титан	4,5
Платина	21,5	Чавун	7,0

Пружні сталі деяких речовин

Таблиця 5

Речовина	Модуль Юнга E, 10 ¹⁰ Па	Модуль зсуву Gт, 10 ¹⁰ Па	Коефіцієнт Пуассона, μ
Алюміній	7,05	2,63	0,345
Бронза	8,08	2,97	0,358
Залізо	21,2	2,7	0,29
Латунь	9,7 – 10,2	3,5	0,34 – 0,40
Мідь	12,98	4,83	0,34
Сталь	20,9	8,12	0,293
Цинк	9,0	3,6	0,25

Динамічна в'язкість рідин і газів

(за температури 20°C і нормального атмосферного тиску)

Таблиця 6

Рідина	$\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$	Газ	$\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$
Ацетон	0,322	Азот	0,0175
Бензол	0,647	Аміак	0,00995
Вода	1,0019	Водень	0,0088
Гліцерин	1495,0	Гелій	0,0196
Спирт етиловий	1,20	Кисень	0,0202
Масло касторове	986	Повітря	0,0182

Швидкість поширення звуку в різних середовищах

Таблиця 7

Речовина	v , м/с	Речовина	v , м/с
Алюміній	6400	Повітря (0°C)	331
Вода (дистил.)	1407	Скло	5000
Гліцерин	1930	Сталь	4720
Граніт	5400	Мідь	5900 – 6100

Одиниці механічних фізичних величин

Назва величини	Позначення	Одиниці виміру в СІ
Довжина	l	м, метр
Час	t	с, секунда
Густина	ρ	кг · м ⁻³ , кілограм на метр у кубі
Швидкість	\vec{v}	м · с ⁻¹ , метр за секунду
Прискорення	\vec{a}	м · с ⁻² , метр за секунду у квадраті
Кутова швидкість	$\vec{\omega}$	рад · с ⁻¹ , радіан за секунду
Кутове прискорення	$\vec{\varepsilon}$	рад · с ⁻² , радіан за секунду у квадраті
Частота	ν	Гц, герц
Маса	m	кг, кілограм
Сила	\vec{F}	Н, ньютон
Тиск	p	Па, паскаль
Механічна напруга	τ	Па, паскаль
Імпульс	\vec{p}	кг · м · с ⁻¹ , кілограм метр у квадраті за секунду
Момент сили	\vec{M}	Н · м, ньютон метр
Момент імпульсу	\vec{L}	кг · м ² · с ⁻¹ , кілограм метр у квадраті за секунду
Момент інерції	I	кг · м ² , кілограм метр у квадраті
Енергія	E, U	Дж, джоуль
Питома енергія	j	Дж · м ⁻³ джоуль на метр у кубі
Робота	A	Дж, джоуль
Потужність	N	Вт, ват

Десяткові твірники назв одиниць

Множник	Префікс	Українське позначення	Міжнародне позначення
10 ¹⁸	екса-	Е	E
10 ¹⁵	пента-	П	P
10 ¹²	тера-	Т	T
10 ⁹	гіга-	Г	G
10 ⁶	мега-	М	M
10 ³	кіло-	к	k
10 ²	гекто-	г	h
10	дека-	да	da
10 ⁻¹	деци-	д	d
10 ⁻²	санти-	с	c
10 ⁻³	мілі-	м	m
10 ⁻⁶	мікро-	мк	μ
10 ⁻⁹	нано-	н	n
10 ⁻¹²	піко-	п	p
10 ⁻¹⁵	фемто-	ф	f
10 ⁻¹⁸	атто-	а	a

4. Література

1. Загальна фізика : Лабораторний практикум / за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.
3. Физический практикум / под ред. Г. С. Комбровского. – Минск : Изд-во университетское, 1986. – 352 с.
4. Практикум по курсу общей физики / Н. Н. Майсова. – М. : Высшая школа, 1970. – 448 с.
5. Фізичний практикум / за заг. ред. проф. В. П. Дуценка. – К. : Вища школа, 1984. – 256 с.
6. Лабораторный практикум по физике / под ред. К. А. Барсукова, Ю. И. Уханова. – М. : Высшая школа, 1988. – 351 с.
7. Общий физический практикум. Механика / под ред. А. Н. Матвеева, Д. Ф. Киселева. – М. : Изд-во МГУ, 1991. – 252 с.
8. Практикум по общей физике / под ред. В. Д. Ноздрева. – М. : Просвещение, 1977. – 311 с.
9. Каленков С. Г. Практикум по физике. Механика / С. Г. Каленков, Г. И. Соломаха. – М. : Высшая школа, 1990. – 357 с.
10. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
1. ВСТУП	4
1.1. Навчальна програма з курсу загальної фізики для студентів фізичних спеціальностей університету. Механіка. .	4
1.2. Основні правила безпеки роботи в лабораторії.	8
1.3. Елементарна теорія похибок.	9
1.4. Загальні вимоги до виконання лабораторних робіт	16
2. ПРАКТИКУМ ІЗ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	17
<i>Лабораторна робота № 1. Вимірювання об'ємів тіл правильної форми.</i>	17
<i>Лабораторна робота № 2. Зважування тіл на аналітичних терезах.</i>	22
<i>Лабораторна робота № 3. Вивчення законів кінематики і динаміки поступального руху на машині Атвуда.</i>	30
<i>Лабораторна робота № 4. Визначення модуля Юнга за допомогою деформації розтягу.</i>	35
<i>Лабораторна робота № 5. Визначення модуля зсуву методом коливань.</i>	38
<i>Лабораторна робота № 6. Визначення швидкості польоту тіла за допомогою балістичного крутильного маятника.</i>	42
<i>Лабораторна робота № 7. Вивчення обертового руху твердого тіла.</i>	47
<i>Лабораторна робота № 8. Визначення прискорення сили тяжіння за допомогою оборотного маятника.</i>	51
<i>Лабораторна робота № 9. Визначення моменту інерції маятника Максвелла.</i>	57
<i>Лабораторна робота № 10. Визначення моменту інерції гіроскопа.</i>	63
<i>Лабораторна робота № 11. Визначення швидкості звуку в повітрі методом додавання взаємно перпендикулярних коливань.</i>	69
<i>Лабораторна робота № 12. Визначення швидкості звуку в повітрі методом інтерференції хвиль.</i>	74

<i>Лабораторна робота № 13. Вивчення стоячих хвиль у струні</i>	79
<i>Лабораторна робота № 14. Визначення швидкості поширення звуку у твердому тілі й модуля Юнга</i>	87
<i>Лабораторна робота № 15. Визначення декременту згасаючих коливань</i>	94
<i>Лабораторна робота № 16. Дослідження сил лобового опору в повітрі</i>	101
<i>Лабораторна робота № 17. Дослідна перевірка рівняння Бернуллі</i>	107
<i>Лабораторна робота № 18. Визначення коефіцієнта тертя кочення й ковзання за допомогою похилого маятника</i>	111
<i>Лабораторна робота № 19. Дослідження співудару куль</i>	118
<i>Лабораторна робота № 20. Визначення моменту інерції твердого тіла за допомогою крутильного маятника</i>	124
3. ТАБЛИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН	134
4. ЛІТЕРАТУРА	138

Навчальне видання

ОСТАФІЙЧУК Богдан Костянтинівич
 ФЕДОРІВ Василь Дмитрович
 ГАСЮК Іван Михайлович
 УГОРЧУК Володимир Васильович

ФІЗИЧНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
Механіка

*За редакцією д-ра фіз.-мат. наук,
 проф. Б. К. Остафійчука*

Літературне редагування *О. Ленів*
 Комп'ютерна правка *Л. Курівчак*
 Коректура *Н. Грцив*

Підп. до друку 11.06.2009 р.
 Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура "Times New Roman".
 Друк на різнографі. Вид. арк. 5,6 Зам. 63.
 Наклад 150 прим.

НБ ПНУС



744724

Видавець
 Прикарпатський національний університет
 імені Василя Стефаника
 76025, м. Івано-Франківськ,
 вул. С.Бандери, 1, тел.: 71-56-22
 E-mail: vdvcsit@pu.if.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2718 від 12.12.2006.