МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

МЕХАНІКА ТА МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для студентів за напрямами підготовки:
6.050502, 6.051701, 6.030510, 6.091706, 6.030503

Харків 2008

...но кафедрою енергетики

...отокол № 8 від 10.04.2008 р

...уково-методичною комісією

...обладнання та технічного

...отокол № 9 від 26.05.2008 р.

ВСТУП

Методичні вказівки призначені для студентів, що навчаються за напрямами підготовки: 6.050502, 6.051701, 6.030510, 6.091706, 6.030503. До кожної лабораторної роботи сформульовані завдання, наведені необхідні теоретичні відомості, надано принципові схеми приладів, наведено порядок виконання роботи та форми таблиць для запису отриманих дослідних даних. Крім того, надані контрольні запитання для самоперевірки та контролю з боку викладача.

Метою лабораторних занять з фізики, розділ “Механіка та “Молекулярна фізика” є:

- закріпити теоретичний матеріал лекційного курсу;
- дати змогу детально ознайомитись з пристроями та характеристиками найбільш важливих приладів, які складають лабораторний практикум; ознайомити з методами вимірювання та основними приладами, які застосовують в лабораторії “Механіки та молекулярної фізики”: мікрометром, штангенциркулем, відліковим мікроскопом, рідинним манометром, термометром, термопарою, аналітичними терезами.
- навчити техніці безпеки експериментальних досліджень фізичних моделей та промислових зразків пристроїв;
- навчити вимірювати основні величини: довжину, час, тиск, температуру, масу;
- навчити використовувати різні методи аналізу і оцінювати похибки вимірювань;
- навчити висловлювати свої висновки щодо робочих властивостей та ступеня придатності досліджуваних пристроїв для рішення практичних завдань.

Виконання кожної лабораторної роботи включає п'ять етапів: вивчення теоретичних положень майбутньої роботи, ознайомлення з приладом, проведення експерименту, обробки його результатів та складання звіту.

ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. До роботи в лабораторії допускаються студенти, які прослухали та вивчили розділи теоретичного курсу, де викладено матеріал з теми лабораторних занять, а також опанували вимоги техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт.

2. Кожен студент повинен заздалегідь підготуватись до лабораторного заняття, використавши лекційний матеріал, рекомендовану навчальну літературу та відповісти на питання, які дає викладач щодо теми заняття.

3. Ознайомитися з приладом, який використовується у лабораторній роботі та виконати необхідні вимірювання.

4. Кожна робота виконується з приладами, спеціально для неї призначеними.

5. Під час роботи з електровимірювальними приладами студент повинен слідкувати за тим, щоб вимірювана величина не перевищувала допустимих значень.

6. У випадку виникнення несправності чи аварійного стану установки студент повинен вимкнути її та сповістити викладача.

7. Після закінчення досліду кожен студент повинен до вимикання установки або до припинення роботи з приладом пред'явити викладачу на підпис бланк з результатами спостережень. Якщо результати дослідів будуть визнані незадовільними чи зовсім не будуть пред'явлені викладачу, то у такому випадку робота не зараховується і знову призначається студенту до виконання.

8. Кожен студент до майбутнього лабораторного заняття повинен пред'явити викладачу окремий звіт з виконаної роботи, без якого студент не буде допущений до виконання наступної роботи.

9. У звіті необхідно привести результати спостережень, розрахунків та відповідні графіки, а також скласти висновок за результатами виконаної роботи.

10. Графіки рекомендується креслити на міліметровій сітці з нанесенням масштабу на координатні осі.

Лабораторна робота № 1-01

ДЕЯКІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА ОСНОВНІ ПРИЛАДИ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЛАБОРАТОРІЇ МЕХАНІКИ ТА МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ

Мета роботи:

1. Ознайомитися з методами вимірювання фізичних величин в лабораторії "Механіки та молекулярної фізики".

2. Навчитися користуватися основними приладами, що використовуються під час вимірів в лабораторії "Механіки та молекулярної фізики".

3. Засвоїти графічний метод зображення результатів вимірювань фізичних величин.

Прилади та матеріали:

1. мікрометр, штангенциркуль, відліковий мікроскоп;
2. рідинний манометр, термометр, термопара;
3. аналітичні терези.

1. Вимірювання довжини

Мікрометр

Мікрометр використовують для вимірювання діаметрів дротів, невеликих за товщиною пластинок і т.п. Мікрометр має вигляд лещат (рис. 1.1).

Мікрометричний гвинт 1 з'єднаний з барабаном 2. На барабані нанесена шкала що має 50 або 100 поділок. Хід гвинта може бути 1 або 0,5 мм. Обертаючись, барабан переміщується уздовж лінійної шкали 3. При затиснутому мікрометричному гвинті, нуль барабана збігається з нулем шкали.

Вимірюваний предмет розташовують між упором 4 та гвинтом 1, потім, обертаючи гвинт 1 за голівку 5, доводять його до зіткнення із предметом. За шкалою 3 відраховують цілі міліметри, а за шкалою барабана соті частки міліметра. Головним джерелом похибок вимірювань є нерівномірність натиску барабана на вимірюваний предмет. Для усунення цього недоліку мікрометри мають голівку 5. Голівка з'єднана із гвинтом не наглухо, а, обертаючись, зачіпає своїми зубцями за зубці стрижня гвинта. Обидві системи зубців притиснуті один до другого за допомогою слабкої пружини. Якщо тиск гвинта перевищить деяку величину, голівка звільняється від з'єднання із гвинтом і перестає повертати гвинт. При цьому предмет притискається гвинтом з деякою постійною силою.

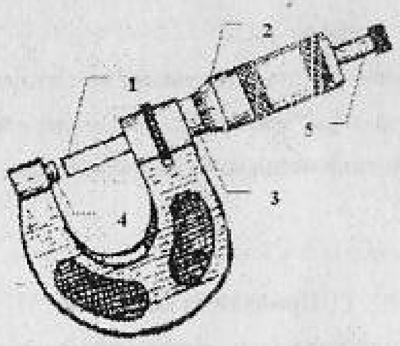


Рис. 1.1 - Мікрометр

ПРИМІТКА: якщо нуль барабана, при затиснутому гвинті не збігається з нулем шкали D, необхідно при вимірюваннях вводити відповідне виправлення.

Метод ноніуса

Для вимірювань лінійних розмірів тіл застосовується масштаб з ноніусом. Масштабом називається лінійка, розділена на сантиметри й міліметри. Ноніус це допоміжна лінійка, яка вільно переміщується уздовж масштабу, що дозволяє підвищити точність вимірювань (рис. 1.2).

На ноніусі нанесені m поділок так, що одна поділка ноніуса дорівнювала $\frac{m \pm 1}{m}$ поділок масштабу. Застосування ноніуса дозволяє відраховувати з точністю до $1/m$ частини найменшої поділки масштабу. Якщо відстань між сусідніми поділками масштабу дорівнює y, а між сусідніми поділками ноніуса x, тоді $x = y \pm \frac{y}{m}$, звідки: $mx = (m \pm 1)y$.

Величину $\Delta x = y - x = \frac{y}{m}$ називають точністю ноніуса, яка визначає найбільшу похибку ноніуса. Частіше застосовується ноніус із поділками рівними $\frac{m-1}{m}$ поділок масштабу.

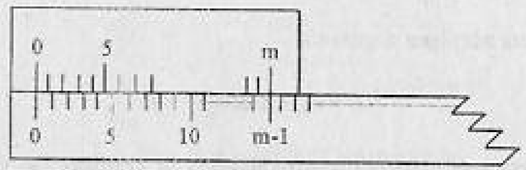


Рис. 1.2 – Масштаб з ноніусом

При дуже дрібних поділках масштабу поділки ноніуса роблять більшими, а саме $x = Ny - \frac{y}{m}$, де N ціле число, наприклад 2 або 5. Точністю ноніуса як і раніше залишається $\Delta x = Ny - x = \frac{y}{m}$.

За будь-якого положення ноніуса одна з його поділок співпадає з якоюнебудь поділкою масштабу. Відлік за допомогою ноніусу заснований на фіксації цього збігу.

Розглянемо процес вимірювання. Нехай L – вимірюваний відрізок (рис. 1.3). Сумістимо з його початком нульову поділку основного масштабу. При цьому кінець відрізка виявиться між k та $k+1$ поділкою масштабу.

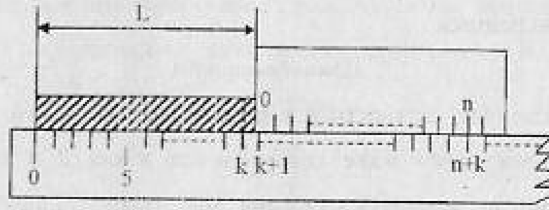


Рис. 1.3 – Вимірювання методом ноніуса

Тоді можна написати, що

$$L = ky + \Delta L, \tag{1.1}$$

де ΔL невідома поки частка поділки масштабу. Прикладемо до кінця відрізка ноніус так, щоб нуль ноніуса збігся з кінцем відрізка. Оскільки поділки ноніуса не дорівнюють поділкам масштабу, то як обов'язково знайдеться поділка ноніуса n, що збігається з $k+n$ поділкою масштабу. Таким чином, як видно з рисунку $\Delta L = ny - nx = n(y - x) = n\Delta x$.

Вся довжина відрізка дорівнює

$$L = ky + n\Delta x = ky + n\frac{y}{m}, \tag{1.2}$$

таким чином, довжина відрізка вимірюваного за допомогою ноніуса, дорівнює числу цілих поділок масштабу плюс точність ноніуса помножена на номер поділки ноніуса, що збігається з деякою поділкою масштабу.

При вимірюваннях похибка виникає через неточність збігів поділок ноніуса з номером n з $k+n$ поділкою масштабу. Величина похибки не перевищує $\frac{1}{2}\Delta x$, тому що при великій розбіжності цих поділок одна із сусідніх поділок (праворуч або ліворуч) має розбіжність менше ніж на $\frac{1}{2}\Delta x$. Отже, похибка ноніуса дорівнює половині його точності. Поділки масштабу й точність ноніуса можуть бути різноманітні.

Кути вимірюють за допомогою кутового масштабу. Точність вимірювання кутів підвищують застосовуючи круговий ноніус, що представляє собою дугову лінійку, яка ковзає уздовж кола (лімба), розділеного на градуси, або більш дрібні поділки.

Штангенциркуль

Штангенциркуль складається з розділеного на міліметри масштабу з ніжкою 1, уздовж якого може переміщатися ніжка 2 з обоймою. Ніжки перпендикулярні до масштабу. Обойма має гвинт 3 для закріплення на масштабі (рис.1.4). В обоймі проти розподілів масштабу зроблений виріз. На прилягаючій до масштабу кромці вирізу нанесені поділки ноніуса. Якщо ніжки 1 та 2 зведені впритул, нуль ноніуса співпадає з нулем масштабу. Вимірюваний

предмет затискають між ніжками 1 та 2 і визначають його розміри, користуючись масштабом і ноніусом.

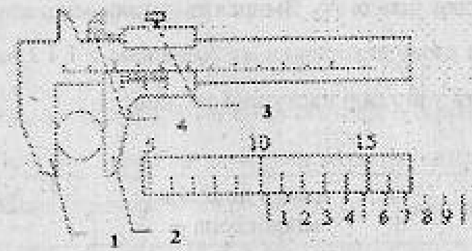


Рис. 1.4 – Штангенциркуль

Вістря 4 необхідні для вимірювання внутрішніх розмірів тіл.

Відліковий мікроскоп

Сучасні відлікові мікроскопи дуже точні й складні прилади. Найпростіший відліковий мікроскоп – це звичайний мікроскоп, в окулярі якого знаходиться шкала. Збільшення деяких мікроскопів можна змінювати шляхом розсування тубуса.

Ціна поділки окулярної шкали мікроскопа визначається шляхом порівняння поділок окулярної шкали з поділками еталонної лінійки, розташованої у поле зору мікроскопа. Для підвищення точності варто використати всі поділки, які попадають у зорове поле.

Для визначення ціни поділки виконують наступні дії:

1. Суміщають початкову поділку шкали и мікроскопа з початком якоїсь, наприклад, N_1 поділки шкали еталона (точка А). Потім знаходять поділку n_i шкали мікроскопа, яка співпадає з початком поділки N_2 (точка В).

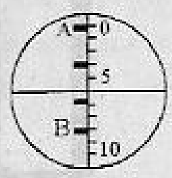


Рис. 1.5 – Шкала відлікового мікроскопу

2. Суміщають кінець N_1 поділки з початковою поділкою шкали мікроскопа й знаходять, таким чином, поділку мікроскопа n_2, що співпадає з кінцем якоїсь поділки шкали N_2. Зміщають шкали мікроскопа й еталона один відносно другого й знову вимірюють як зазначено в 1 і 2 випадках. Результати вимірювань подають у вигляді наступної таблиці:

Число міліметрів	номер поділки мікроскопа n	$\frac{N_2 - N_1}{n}$

Визначивши ціну поділки мікроскопа у кожному досліді, знаходять її середнє значення

2. Вимірювання тиску

Приладами для вимірювання тисків служать манометри та барометри.

U-подібний рідинний манометр складається із двох сполучених скляних трубок однакового діаметра (рис.1.6). Трубки наповнені рідиною до половини своєї висоти. Застосовується ртуть, гас, вода, спирт та інші рідини.

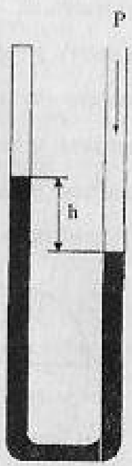


Рис.1.6 – U-подібний рідинний манометр

При вимірюваннях відносно малих тисків користуються манометром із закритим кінцем. Над рідиною, на рис.1.6 в лівому коліні, знаходиться вакуум.

Тиск визначається рівнянням

$$p = k\rho gh, \tag{1.3}$$

де ρ – густина рідини, g – прискорення сили тяжіння, h – різниця висот рідини в трубках, $к$ – коефіцієнт обумовлений вибором одиниць вимірювання.

При вимірюваннях різниці тисків застосовують манометр із відкритим лівим кінцем. На рідину у відкритій трубці давить атмосфера, а другу трубку приєднують до вимірюваного об'єкта. Різниця стовпів рідини визначає різницю тисків.

3. Вимірювання температури

Методи вимірювання температури досить різноманітні. Вони розрізняються за термометричними властивостями та застосовуванням типів речовин. Термометрична властивість повинна бути однозначно пов'язана з температурою й досить просто вимірюватися. Розглянемо термометр, який буде застосовуватися у лабораторії.

Рідинний термометр

Термометрична властивість – зміна об'єму рідини. Найпоширеніша термометрична речовина – ртуть, тому що вона відрізняється досить постійним термічним коефіцієнтом об'ємного розширення. Шкалу калібрують безпосередньо в градусах за точками плавлення або кипіння чистих речовин. Крім ртуті термометри наповнюють спиртом, ефіром, толуолом. Ці термометри менш точні, ніж ртутні, тому що термічні коефіцієнти об'ємного розширення зазначених рідин менш постійні, чим у ртуті. Термометри показують лише власну температуру, тому необхідно досягати щільного контакту термометра з досліджуваним тілом та вичікувати досить тривалий час для вирівнювання температури тіла й термометра.

Термопари

Термометрична властивість термопари – зміна термоелектрорушійної сили. Чутливий елемент – спай двох провідників з різнорідних металів, які перебувають у тепловій рівновазі з середовищем із температурою t_1, інший спай перебуває при відомій постійній температурі t_2.

Залежність термо-ЕРС ε від температури

$$\varepsilon = c(t_1 - t_2) \tag{1.4}$$

знаходять дослідницьким шляхом, градуюючи за точками плавлення або кипіння чистих речовин.

4. Вимірювання маси

У багатьох завданнях фізики й техніки потрібне точне визначення ваги або пропорційної їй маси тіла. Для цього застосовують аналітичні терези. На аналітичних терезах, при дотриманні відповідних правил, можна зважити з точністю до $2 \cdot 10^{-7}$ кг.

Аналітичні терези

Аналітичні терези – це рівноплечі важільні терези. Вони мають у складі підставку, стовпчики, коромисла, дві серги та дві чашки. Підставка терезів опирається на три ніжки, дві з них мають гвинти для установки по рівню. На підставці розташований стовпчик терезів. Вгорі стовпчика знаходиться плоска подушка із твердого матеріалу. Звільнене коромисло коливається на подушці стовпчика біля ребра своєї опорної призми. На кінцях коромисла знаходяться дві призми для підвісу серг. Призми виконані із твердого матеріалу, ребра їх відшліфовані. Уздовж коромисла на кожному його плечі нанесено по десять поділок. В середині коромисла перпендикулярно до його осі закріплена довга стрілка. При коливаннях коромисла кінець стрілки переміщається навколо невеликої горизонтальної шкали, розташованої у нижній частині стовпчика. Кожне плече коромисла має горизонтальні гвинти. Уздовж цих гвинтів можна рухати невеликі вантажі й, таким чином, регулювати рівноважне положення коромисла і його стрілки. Для запобігання ребер призм і подушок від псування служить аретир. При повороті рукоятки важеля аретира в той або інший бік коромисло й чашки закріплюються на особливих підпірках або знімаються з них. Терези знаходяться у футлярі.

Терези мають стандартний набір аналітичних гир (тягарців). До стандартного набору аналітичних гир додають додатково особливу "гирьку", яка має назву рейтер. Рейтер зроблений з легкого дроту, зігнутого у вигляді петлі, і важить 10 мг. Похибка маси рейтера не повинна перевищувати 0,2 мг. За допомогою спеціального важеля, який знаходиться у правій верхній частині футляра терезів, рейтер можна помістити на будь-яку поділку шкали коромисла. Тоді він створюватиме додатковий момент сили, який діє на коромисло. Якщо рейтер помістити на поділку з номером 10, він замінить собою важок в 10 мг, якщо на поділку з номером 5 – 5 мг і так далі. Поміщати рейтер потрібно тільки на цілі поділки шкали, одержуючи в такому випадку цілі міліграми, а десяті частки міліграма обчислювати, як буде зазначено нижче.

Правила використання терезів

Аналітичні терези – це прилад великої точності. Тому поводитися з ними необхідно дуже обережно, дотримуючись зазначених правил.

1. У неробочому стані терези завжди повинні бути аретировані. Коромисло знімають із аретира тільки на нетривалий час – для визначення положення рівноваги.

2. До неаретированих терезів не можна доторкатися – при цьому деформуються ребра призм та подушки (не можна класти й знімати вантажі, не можна вішати й знімати рейтер, не можна відкривати й закривати дверцята неаретированих терезів).

3. Терези повинні бути встановлені строго по рівню.

4. Вантажі на чашки варто класти так, щоб їхній загальний центр тяжіння збігався по можливості, із центром тяжіння чашок.

5. Важки й рейтер варто брати тільки пінцетом. Від дотику рук вони псуються.

6. Важки варто тримати тільки в коробці або на чашці терезів (під час роботи їх не можна класти на стіл).

7. Предмет, який зважують, повинен бути сухим та чистим. Порошкоподібні тіла не можна сипати безпосередньо на чашку терезів.

8. Не можна опиратися на столик, на якому встановлені терези, тому що при цьому змінюється положення рівноваги.

9. Не слід повністю звільняти коромисло ваг від аретира доти, поки чашки терезів не будуть майже врівноважені й коромисло терезів не зможе вільно коливатися біля положення рівноваги. До досягнення такого стану коромисло варто звільняти лише настільки, для того щоб бачити, що варто збільшити або зменшити навантаження чашок.

10. Звільняти й аретирувати терези треба обережно, дуже плавно. Аретир потрібно пускати в хід тоді, коли стрілка проходить приблизно через положення рівноваги.

11. При спостереженні коливань коромисла дверцята терезів повинні бути закриті.

12. Якщо при звільненні коромисла чашки сильно коливаються, їх зупиняють, обережно аретирувавши терези.

13. Кожним терезам відповідає певне граничне навантаження; значення якого зазначене на терезах. Перевантажувати терези не можна, тому що деформуються коромисло, призми й подушки.

14. Не слід надовго залишати вантажі на чашках. Після закінчення зважування вантажі варто знімати й закривати дверцята терезів.

15. Стрілка ненавантажених терезів повинна коливатися поблизу середини шкали. Регулювати положення коромисла зі стрілкою самостійно не треба.

16. При зважуванні важки кладуть, починаючи з великих, і, по черзі їх перебираючи, доходять до самих маленьких. Такий порядок найбільш зручний.

Метод зважування

Завжди можна шляхом послідовного підбору гир, від більших до менших, знайти два числа *a* та *(a+1)* грамів, між якими буде знаходитися вага, з точністю до 0,01 г. Потім, пересуваючи рейтер уздовж шкали коромисла,

знаходять такі дві послідовні поділки, за яких переміщення рейтера на одне з них дасть загальне навантаження менше ваги тіла (з недоліком), а на іншу – більшу (з надлишком).

ПРИМІТКА: За великої різниці у вазі тіла й гир перевага однієї із чашок спостерігається легко: коромисло терезів при звільненні аретира негайно нахиляється в яку-небудь сторону й не коливається. При малій різниці у вазі коромисло продовжує коливатися.

Нехай знайдені два таких положення рейтера *n* та *(n+1)*, які відрізняються одне від одного на цілу поділку коромисла, з відповідними точками рівноваги N_n та N_{n+1}, причому N_n знаходиться ліворуч, а N_{n+1} – праворуч нуля терезів (рис. 1.7).

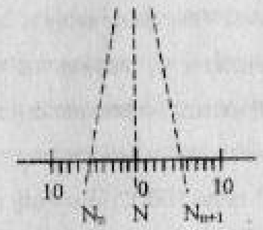


Рис. 1.7 – Шкала аналітичних терезів

Якщо маса гир при положенні рівноваги буде *P* г, то для приведення терезів у нульову точку *N* треба на праву чашку додати ще якісь частки міліграма. Вважають, що при малих кутах, відхилення стрілки від положення рівноваги пропорційно навантаженню, що викликає це відхилення. Інтерполюючи, обчислюють зазначену добавку

$$\Delta P = \frac{N_n - N}{N_n - N_{n+1}} \,. \qquad (1.5)$$

Позначивши через *P* – масу гир, P_n – маса гирьки, що замінив рейтер, можна виразити масу тіла з точністю до $2 \cdot 10^{-7}$ кг:

$$R = P + P_n + \Delta P \,, \qquad (1.6)$$

де R – маса тіла.

5. Графічний метод зображення результатів вимірювань фізичних величин

При обробці експериментального матеріалу для наочності прибігають до складання таблиць і графіків.

У таблицях результати вимірювань записують у стовпчики, які мають назви відповідних величин із вказівкою одиниць вимірювання. Чисельні значення розташовують так, щоб вони убували або зростали. Коми, що відокремлюють десятинні знаки розташовують по одній вертикалі. Числа округляють до першої сумнівної цифри.

Графіки дають наочне уявлення про функціональну залежність величин. З графіка можна швидко знайти значення однієї з величин за заданим значенням іншої, як усередині досліджуваного інтервалу (інтерполяція), так і поза досліджуваним інтервалом (екстраполяція). У випадку екстраполяції варто проявляти розумну обережність, вникаючи в суть описуваного функцією фізичного процесу. Наприклад, визначивши, що на інтервалі температур від +20°C до + 60°C густина води залежить від температури лінійно, не можна екстраполювати її до 0°C та до 100°C, тому що поблизу 4°C вода має найбільшу густину, а після 95°C вода близька до кипіння, лінійності в цих випадках не спостерігається.

При побудові графіків частіше використовують прямокутну систему координат. Виконують графіки на міліметровому папері. Перед побудуванням графіка обирають масштаби для аргументу та функції так, щоб графік проходив приблизно симетрично щодо осей координат. При цьому точність відліку на осях повинна бути одного порядку. На осях наносять "опорні точки" із цілими значеннями, кратними 2, 5, 10, 20 тощо. Якщо інтервали значень аргументу й функції знаходяться далеко від нуля, опорні точки починають наносити від значення трохи меншого, ніж найменше значення на інтервалі вимірювань. В протилежному випадку на графіку вийде багато невикористаного місця, а сам графік буде дуже дрібний. На кінцях осей координат пишуть позначення величин та одиниці їх вимірювання. На підготовлену таким чином сітку наносять експериментальні точки. Для наочності точки обводять кружками,

трикутниками й т.п. Якщо похибка визначення аргументу мала у порівнянні з похибкою функції (буде розглянуто далі), то на графіку значення функції зображують у вигляді вертикального відрізка, залишаючи експериментальну точку в середині відрізка. Довжина відрізка відповідає подвоєній величині похибки.

Лінію графіка проводять не просто з'єднуючи точки, а вибираючи її плавний плин, так, щоб вона пройшла симетрично відносно точок і не виходила б за межі похибки експериментальних точок.

При побудові графіків користуються лекалами або товстим м'яким дротом, зігнувши його відповідним чином. Графік обмежують двома паралельними йому графіками заключивши в смуги похибки.

Іноді на осях відкладають не самі значення величин, а які-небудь їх функції. Це зручно, якщо використання такої функції дає лінійний плин графіка, тому що пряму легше провести, ніж будь-яку криву.

Приклад: залежність тиску насиченої пари від температури описують формулою:

$$p = pe^{-\frac{\mu\lambda}{RT}}.$$

Даний вираз можна представити у вигляді:

$$\ln p = -\frac{\mu\lambda}{R}\cdot\frac{1}{T} + \ln p_0$$

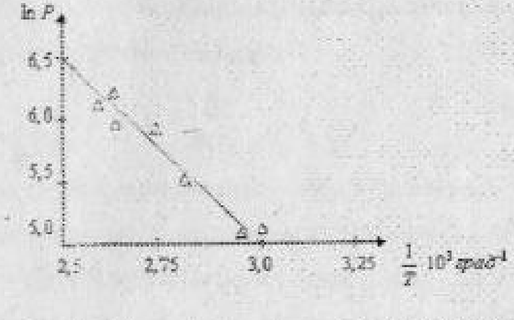


Рис. 1.8 – Залежність тиску насиченої пари від температури

Необхідно зауважити, що дана функція в координатах lnP, $1/T$ має вигляд прямої. $\frac{\mu\lambda}{R}$ – кутовий коефіцієнт цієї прямої розмірна величина (рис. 1.8). Чисельне значення кутового коефіцієнта розраховують із графіка.

Контрольні запитання і завдання

1. Назвіть основні фізичні величини механіки та молекулярної фізики та вкажіть, за допомогою яких приладів їх можна виміряти?
2. Яку фізичну величину можна виміряти мікрометром. Як це зробити?
3. Розкрийте сутність методу ноніуса. Де цей метод використовують?
4. Як працює відліковий мікроскоп і які фізичні величини можна за його допомогою отримати?
5. За допомогою яких приладів можна виміряти тиск і як це зробити?
6. Способи вимірювання температури.
7. Принцип роботи аналітичних терезів та правила їх експлуатації.
8. Яким чином проводити зважування твердих та порошкоподібних речовин?
9. Використання графічного методу зображення результатів вимірювань фізичних величин.

Лабораторна робота № 1-02

РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Мета роботи:

1. Розглянути основні види похибок вимірювань, а також їх розрахунок.
2. Розглянути способи підрахунку похибок вимірювань при прямих та непрямих вимірюваннях. Визначити відносні та абсолютні похибки вимірювань.

Теоретичні відомості

Фізика – наука експериментальна. Метою фізичного практикуму є вивчення за допомогою дослідів основних фізичних явищ, аналіз та самостійне їх відтворення. Фізика є наукою кількісною, тому результат вимірювань зображують у вигляді цифр.

Виконання будь-якої лабораторної роботи завжди супроводжується вимірюваннями. Вимірювання фізичної величини – процес порівняння її з однорідною величиною, яку взято за одиницю вимірювання. Можна виділити дві групи вимірювань: прямі та непрямі.

У випадку прямих вимірювань результат визначається безпосередньо за показниками приладів. Наприклад, час – за годинником, струм – за амперметром. У випадку непрямих вимірювань значення фізичної величини визначається за допомогою обчислення за формулою, яка встановлює функціональну залежність цієї величини від інших величин, що вимірюються безпосередньо. Наприклад, густина циліндра

$$\rho = \frac{m}{\pi r^2 h}, \tag{2.1}$$

де m – маса циліндра, r – радіус циліндра, h – висота циліндра.

Відомо, що за достатньо точних вимірювань однієї і тієї ж величини одержувані значення відрізняються одне від одного, тому що містять помилки (похибки). Це зумовлено недосконалістю вимірювальної апаратури, похибками методу вимірювання, недосконалістю органів почуттів спостерігача та іншими причинами.

Абсолютною похибкою вимірювання називають різницю $x - x_0$ між результатом вимірювання x та дійсним значенням x_0 вимірюваної величини. Похибка вимірювань звичайно є невідомою, тому що невідомим є дійсне значення вимірюваної величини.

Тому до завдання вимірювань входить визначення самої величини та оцінювання допущеної під час вимірювання похибки. Визначається наближене значення вимірюваної величини та інтервал значень, до якого з визначеною ймовірністю належить дійсне значення вимірюваної величини. В залежності від причини виникнення похибки вимірювань розподіляють на промахи, випадкові та систематичні помилки.

Промахи, або грубі помилки, виникають унаслідок порушення основних умов вимірювання або у результаті недогляду експериментатора. У разі виявлення промаху результат вимірювання треба відразу ж відкинути, а вимірювання повторити, якщо це можливо. Зовнішньою ознакою результату, що містить у собі промах, є його різка відміна по величині від результатів інших вимірювань.

Випадкові помилки – це похибки, причини виникнення яких або невідомі, або їх так багато, що неможливо передбачити результат їх спільної дії. Випадкові похибки спричинені великою кількістю таких факторів, ефекти дії яких настільки незначні, що їх неможливо виділити й урахувати поодинці. Випадкові помилки неможливо усунути із результатів вимірювань, але за допомогою методів теорії ймовірності можливо урахувати їх вплив на оцінку дійсного значення вимірюваної величини, що дозволяє дефініювати значення вимірюваної величини зі значно меншою помилкою як помилки окремих вимірювань. Випадкові помилки характеризуються певним законом їх розподілення.

За вимірювання макроскопічних величин, як правило, справедливий закон розподілення Гауса, зображений у вигляді графіка на рис.2.1. (Існують і інші закони розподілення випадкових величин).

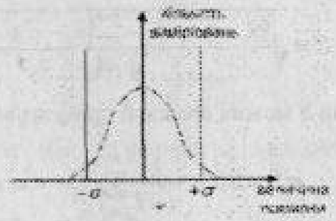


Рис.2.1 – Закон розподілення Гауса

Як видно з графіка, для більшості вимірювань є характерним відхилення від дійсного значення вимірюваної величини.

Проведемо вертикальні лінії ліворуч та праворуч на однаковій відстані від нуля таким чином, щоб площа між ними складала 68% від загальної площі під кривою.

Помилки, відповідні до цих ліній, позначимо через σ. Величину σ назвемо стандартною помилкою, або стандартним відхиленням. Як бачимо з рисунка, у 68 випадках із 100 фактична помилка знаходиться у межах $\pm\sigma$. Помилка досліду в 95% випадків знаходиться в інтервалі $\pm 2\sigma$ та у 99,7% випадків не перевищує $\pm 3\sigma$. Можна прийняти, що випадкові помилки вимірювання обмежені за абсолютною величиною значенням 3σ (правило трьох сигм). Тому при обробці результатів вважаємо, що вимірювання, які відрізняються від середнього більше як на 3σ, є промахами, і такі вимірювання будемо відкидати.

Квадрат величини σ називають дисперсією помилки.

В теорії ймовірності дисперсію можна обчислити за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_0)^2, \qquad (2.2)$$

де x_i – значення вимірюваної величини в і-му досліді;

n – кількість дослідів;

x_0 – дійсне значення вимірюваної величини.

Проте дійсне значення вимірюваної величини x_0, як правило, заздалегідь невідоме. Тому, на основі експериментальних даних, визначається середнє квадратичне відхилення величин $x_1, x_2, x_3 \ldots x_i$ від їх середнього значення $<x>$.

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - <x>)^2 + \ldots (x_n - <x>)^2}{n-1}}. \qquad (2.3)$$

Квадрат величини S можна вважати приблизно рівним дисперсії

$$\sigma^2 \approx S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - <x>)^2. \qquad (2.4)$$

Середнє значення вимірюваної величини x визначається співвідношенням

$$<x> = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{r} x_i. \qquad (2.5)$$

За великої кількості вимірювань шукане значення вимірюваної величини можна визначити з більш великою точністю. Це пов'язано з тим, що позитивні та негативні помилки частково компенсуються при усереднюванні результатів усіх дослідів. За такого усереднення середнє квадратичне відхилення σ зменшується і дорівнюватиме

$$\sigma_C = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \approx \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{(x_1 - <x>)^2 + \ldots + (x_n - <x>)^2}{n(n-1)}}, \qquad (2.6)$$

де σ_C – оцінка середнього квадратичного відхилення результату вимірювань.

Тоді дійсне значення шуканої величини знаходиться в межах:

$$<x> - \sigma_C < x_0 << x> + \sigma_C. \qquad (2.7)$$

Інтервал, у межах якого знаходиться дійсне значення шуканої величини, називають надійним. За великої кількості вимірювань можна одержати вузький надійний інтервал із великою надійністю (тобто ймовірність попадання шуканої величини у надійний інтервал буде великою).

За великої кількості вимірювань середнє значення $<x>$ шуканої величини близьке до дійсного, і величину дисперсії можна визначити зазначеним способом. Однак під час виконання лабораторних робіт кількість вимірювань, як правило, є невеликою – 3...5 разів.

У теорії ймовірності розроблено метод визначення надійного інтервалу в залежності від надійності результату за будь-якої, у тому числі й малої, кількості вимірювань (починаючи з двох) на основі розподілення випадкової величини за допомогою коефіцієнта Стьюдента:

$$t = \frac{<x> - x_0}{\sigma_C} \approx \frac{<x> - x_0}{S/\sqrt{n}}, \qquad (2.8)$$

де t – коефіцієнт Стьюдента. Він є функцією надійності P та кількості вимірювань.

Тоді дійсне значення вимірюваної величини знаходитиметься в надійному інтервалі

$$<x> - t\sigma_C < x_0 << x> + t\sigma_C. \qquad (2.9)$$

Задаючи потрібну надійність P (тобто ймовірність потрапляння шуканої величини у надійний інтервал) визначаємо за таблицею значення t для існуючої кількості вимірювань n та знаходимо величину надійного інтервалу для дійсного значення x_0 вимірюваної величини x (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Значення коефіцієнтів Стьюдента

n \ P	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	2,4	3,2	4,3	5,8	12,9
5	2,1	2,8	3,7	4,6	3,6
6	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
12	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2
13	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
14	1,8	2,1	2,6	2,9	4,1
15	1,8	2,1	2,6	2,9	4,0

Визначивши надійний інтервал, записуємо кінцевий результат у вигляді $x = \langle x \rangle \pm \Delta x$, де $\Delta x = t \cdot \sigma_C$. Відношення

$$\delta = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\% \tag{2.10}$$

називають відносною похибкою. Вона вимірюється у відсотках і показує, яку долю від значення фізичної величини складає похибка Δx. Абсолютна похибка Δx та відносна δ характеризують точність вимірювань. З урахуванням відносної похибки кінцевий результат записується у вигляді

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x,\ \delta = ...\%. \tag{2.11}$$

Крім випадкової похибки є ще систематичні помилки. До систематичних помилок відносять постійні та змінювані за певним законом помилки. Вони можуть бути наслідком зіпсованості приладів, неправильного регулювання приладів, помилковості методу вимірювань або якого-небудь недоліку з боку експериментатора, цей недолік повторюється в кожному досліді. Виявлення систематичних помилок, котрі викликані кожним окремим фактором, потребує спеціальних досліджень, наприклад вимірювання однієї й тієї ж величини різними методами.

На особливому місці стоять систематичні помилки, що вносяться приладом, за допомогою якого виконуються вимірювання. Такі помилки пов'язані з конструктивними недоліками приладу або похибками градуювання. Величина систематичної помилки оцінюється класом точності приладу.

Клас точності електровимірювальних приладів визначається відношенням абсолютної похибки приладу Δx_{np} до максимально можливого значення вимірюваної приладом величини x_{max} та виражається у відсотках :

$$B = \frac{\Delta x_{np}}{x_{max}} \cdot 100\%. \tag{2.12}$$

Клас точності вказано на лицьовому боці приладу. Так, амперметр класу точності 1,0 з повною шкалою в 1 А, вимірює струм, що через нього тече, з помилкою, котра не перевершує:

$$\Delta I = \frac{1,0}{100} \cdot 1A = 0,01A = 10\,mA.$$

Легко побачити, що помилка 10 мА складає невелику частину від вимірюваного струму лише при вимірюванні струмів порядку 1 А, тобто при відхиленні стрілки за всією шкалою. При відхиленні стрілки на 1/4 шкали та менше похибка може складати 5...10% і навіть більше. Тому при вимірюваннях рекомендується обирати такий прилад, на якому вимірюваний струм викличе відхилення стрілки більше ніж на половину шкали. Це положення справедливе і для інших електровимірювальних приладів.

Якщо похибка, що вноситься приладом Δx_{np}, порівняна з похибкою Δx, що визначена шляхом обробки ряду вимірювань, то необхідно поширити надійний інтервал за рахунок обчислення похибки приладу:

$$x = \langle x \rangle \pm \sqrt{\Delta x^2 + \Delta x_{np}^2}, \tag{2.13}$$

де $\Delta x_{np} = \dfrac{B \cdot x_{max}}{100}$.

Електровимірювальні прилади за класом точності підрозділяються на 7 класів, які позначаються цифрами: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Як правило, точність приладу менша точності відліку, який можна зробити за шкалою приладу. Наприклад, необхідно виміряти струм за допомогою амперметра, що має верхню межу за шкалою 10 А та клас точності 1,0. Припустимо, що шкала має 100 поділок, тоді ціна однієї поділки складає 0,1 А, а абсолютна похибка приладу $I_{np} = \dfrac{10 \cdot 1,0}{100} = 0,1A$, тобто дорівнює ціні поділки приладу. В цьому випадку при обробці результатів вимірювань можна не обчислювати Δx, а використати значення

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x_{np}. \tag{2.14}$$

За вимірювань температури та часу також зазвичай враховують лише похибки приладу. Це пояснюється тим, що точність відліку температури за термометром та часу за секундоміром вища точності термометра і секундоміра.

1. Послідовність розрахунків похибок за прямих вимірювань

На підставі вищевикладеного можна рекомендувати такий порядок розрахунку прямих вимірювань:

1. Кожну величину вимірювати декілька разів (не менше 3-х): $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ де x – вимірювана величина, n – кількість вимірювань.

2. Визначити середнє арифметичне значення фізичної величини:

$$<x> = \frac{x_1 + x_2 + \dots x_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i .$$

3. Знайти середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань від середнього арифметичного і прийняти його рівним σ:

$$\sigma \approx S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - <x>)^2}{n-1}} .$$

4. Визначити величину 3σ та порівняти її з відхиленням кожного результату від середнього арифметичного $x_i - <x>$. Якщо величина $x_i - <x>$ більша, за 3σ, то такий результат відкидають як промах і знову визначають <x> та σ для залишків кількості вимірювань.

5. Знайти:

$$\sigma_C = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \approx \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - <x>)^2}{n(n-1)}} .$$

6. Визначити надійний інтервал

$$<x> - \Delta x < x_0 << x> + \Delta x, \text{ де } \Delta x = t \cdot \sigma_C ,$$

t – коефіцієнт Стьюдента при заданій надійності P і кількості вимірювань n (знаходимо з табл. 2.1).

7. Розширити, у випадку необхідності, надійний інтервал з урахуванням похибки приладу

$$<x> - \sqrt{\Delta x^2 + \Delta x_{np}^2} < x_0 << x> + \sqrt{\Delta x^2 + \Delta x_{np}^2} .$$

8. Знайти відносну похибку

$$\delta = \frac{\Delta x}{<x>} \cdot 100\% .$$

9. Записати кінцевий результат у вигляді

$$x = <x> \pm \Delta x,\ \delta = \dots\% .$$

Приклад розрахунку похибок за прямих вимірювань

Виміряти довжину нитки математичного маятника. Вимірювання проводимо 5 разів лінійкою. При цьому отримуємо результати: 50,2; 60,4; 59,9; 60,0; 60,3 см.

1. Заходимо середнє арифметичне значення довжини маятника:

$$<l> = \frac{60{,}2 + 60{,}4 + 59{,}9 + 60{,}0 + 60{,}3}{5} = 60{,}16 \approx 60{,}2 .$$

2. Визначаємо

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{(60{,}2-60{,}2)^2 + (60{,}4-60{,}2)^2 + (59{,}9-60{,}2)^2 + (60{,}0-60{,}2)^2 + (60{,}3-60{,}2)^2}{4}} = \approx 0{,}21$$

3. Знаходимо величину 3σ=0,63 та порівнюємо її з $l_i - <l>$. Всі значення $l_i - <l> < 3\sigma$, тому залишаємо всі результати. Промахів нема.

4. Визначаємо

$$\sigma_C = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}21}{\sqrt{5}} = 0{,}03 .$$

5. Знаходимо $\Delta l = \sigma_C \cdot t$ при надійності 0,99. Коефіцієнт Стьюдента за таблицею при надійності 0,99 і кількості вимірювань 5 дорівнює $t = 4{,}6$, тоді $\Delta l = 0{,}99 \cdot 4{,}6 = 0{,}45 \approx 0{,}5$.

6. Знаходимо відносну похибку

$$\delta = \frac{0{,}5 \cdot 100}{60{,}2} = 0{,}8\% .$$

7. Записуємо кінцевий результат у вигляді

$$l = (60{,}2 \pm 0{,}5)см,\ \delta = 0{,}8\% .$$

2. Послідовність розрахунків похибок за непрямих вимірювань

У випадку прямих вимірювань похибки вимірювань знаходять порівняно просто. Проте в більшості випадків шукана величина є функцією декількох вимірюваних величин $x = f(y,z)$. Помилки вимірювань, як правило, досить малі порівняно з вимірюваними величинами, тому для обчислення похибок непрямих вимірювань можна скористатися диференційним обчисленням.

Порядок визначення похибки у випадку непрямих вимірювань такий:

1. Взяти натуральний логарифм від обох частин формули.

2. Знайти диференціал отриманих виразів за всіма аргументами функції.

3. Замінити диференціали у цьому виразі похибками вимірювань Δy, Δz.

4. Похибки Δy, Δz кожної величини визначити за правилами, які вказані для прямих вимірювань.

5. Змінити "мінуси", що з'явилися при логарифмуванні та диференціюванні, на "плюси", тому що похибки окремих величин необхідно скласти.

6. З відносної похибки обчислити надійний інтервал шуканої величини $x = <x> \pm \Delta x$, де $\Delta x = \delta \cdot <x>$.

7. Записати кінцевий результат у вигляді

$$x = <x> \pm \Delta x,\ \delta = \ldots\%.$$

Приклад розрахунку похибок за непрямих вимірювань

У методі Стокса коефіцієнт внутрішнього тертя визначається за формулою

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{(\rho - \rho_p)gr^2 t}{l},$$

де ρ – густина матеріалу кульки; ρ_p – густина рідини; g – прискорення вільного падіння, g=9,81 м/с^2; r – радіус кульки; t – час падіння кульки між двома мітками, відстань між якими l.

Величини r, t, l, ρ і ρ_p вимірюються безпосередньо, кожна не менше ніж 3 рази.

1. За результатами перших вимірювань визначаємо $<r>$ та Δr, $<t>$ та Δt, $<l>$ та Δl, $<\rho>$ та $\Delta\rho$, $<\rho_p>$ та $\Delta\rho_p$.

2. Підставляємо у формулу для η значення $<r>$, $<t>$, $<l>$, $<\rho>$ та $<\rho_p>$ і підраховуємо

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{(<\rho> - <\rho_p>)g<r>^2<t>}{<l>}.$$

3. Прологарифмуємо формулу для η:

$$\ln\eta = \ln\frac{2}{9} + \ln(\rho - \rho_p) + \ln g + 2\ln r + \ln t - \ln l.$$

4. Знайдемо диференціал отриманих виразів:

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{d\rho}{\rho - \rho_p} - \frac{d\rho_p}{\rho - \rho_p} + \frac{dg}{g} + \frac{2dr}{r} + \frac{dt}{t} - \frac{dl}{l}.$$

5. Замінимо диференціали приростами:

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta\rho}{\rho - \rho_p} - \frac{\Delta\rho_p}{\rho - \rho_p} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta t}{t} - \frac{\Delta l}{l}.$$

6. Підставивши замість приростів аргументів їх абсолютні повні похибки, всі додатки беремо за абсолютною величиною, для чого знак «-» змінюємо на «+», та підставляємо середнє значення фізичних величин:

$$\frac{\Delta\eta}{<\eta>} = \frac{\Delta\rho}{<\rho> - <\rho_p>} - \frac{\Delta\rho_p}{<\rho> - <\rho_p>} + \frac{\Delta g}{<g>} + \frac{2\Delta r}{<r>} + \frac{\Delta t}{<t>} - \frac{\Delta l}{<l>}.$$

7. Ліва частина рівняння $\frac{\Delta\eta}{<\eta>}$ являє собою відносну похибку

$$\delta = \frac{\Delta\eta}{<\eta>}\cdot 100\%.$$

Підрахувавши праву частину, знаходимо числове значення відносної похибки. При розрахунку $\frac{\Delta g}{<g>}$ можна взяти $\Delta g = 0{,}5$ см/с^2, тобто половину розряду після останньої значущої цифри. Таким чином роблять при визначені відносної похибки сталих величин.

8. З відносної похибки обчислюємо абсолютну похибку

$$\Delta\eta = \frac{\delta \cdot <\eta>}{100}.$$

9. Визначимо надійний інтервал

$$<\eta> - \Delta\eta < \eta << \eta > + \Delta\eta .$$

10. Записуємо кінцевий результат у вигляді:

$$\eta = <\eta> \pm \Delta\eta ,\ \delta = \ldots\% .$$

Контрольні запитання і завдання

1. Які вимірювання називають прямими?
2. Які вимірювання називають непрямими?
3. Які помилки вимірювань відносять до систематичних, випадкових та промахів?
4. Що називають абсолютною похибкою вимірювань?
5. Що називають відносною похибкою вимірювань?
6. Що таке надійний інтервал?
7. Наведіть порядок розрахунку похибок у разі прямих вимірювань.
8. Наведіть порядок розрахунку похибок у разі непрямих вимірювань.
9. Визначте відносну та абсолютну похибки вимірювань маси тіла за табл.2.2. (варіант та надійність P вказує викладач).
10. Отримайте розрахункову формулу до визначення відносної похибки у випадку непрямих вимірювань (за вказівкою викладача).

Таблиця 2.2

Вимірювання маси тіла

№	Маса тіла, г					
	Варіант1	Варіант2	Варіант3	Варіант4	Варіант5	Варіант6
1.	10.55	20,54	30.96	40.21	50.42	60,15
2.	10,51	20,65	30,95	40.25	50.43	60,11
3.	10.58	20,83	30,98	40,24	50,40	60,13
4.	10,53	20,86	30,99	40.70	50,46	60,17
5.	10,59	20,57	30,97	40,28	50.44	60,16

Лабораторна робота № 1-03

РУХ ТІЛ ПО ПОХИЛІЙ ПЛОЩИНІ

Мета роботи:

1. Вивчення особливостей поступального рівноприскореного руху з урахуванням тертя ковзання під час ковзання тіла з похилої площини з тертям.

2. Вивчення характеристик прискореного обертального руху; визначення коефіцієнта тертя ковзання.

Теоретичні відомості

Тертя – це механічний опір, що виникає під час відносного переміщення двох стичних тіл у площині дотику (тіла взагалі можуть бути твердими, рідкими і газоподібними). *Тертя* – це складний дисипативний необоротний процес, який супроводжується виділенням тепла, електризацією тіл, їх руйнуванням тощо. Сила опору F, яка напрямлена протилежно відносному переміщенню тіл, називається силою тертя.

Тертя називають *зовнішнім* при виникненні сили тертя між поверхнями двох різних тіл, що стикаються і *внутрішнім*, якщо сили тертя виникають між шарами рідини або газу. Зовнішнє тертя звичайно розділяють на тертя ковзання та тертя кочення. Якщо складова сили, прикладена до тіла паралельна площі стичних поверхонь, недостатня для виникнення ковзання, силу тертя називають *неповною*. Неповна сила тертя змінюється від нуля до деякого максимального значення F_0, що називається *силою тертя спокою*. При подальшому збільшенні сили, прикладеної до тіла, починається ковзання. Кулон експериментально встановив, що сила тертя ковзання не залежить від площі стичних поверхонь і пропорційна силі нормального тиску (реакції опори).

Відношення граничної сили тертя $F_{гр}$ до нормального тиску (притискуючої сили) називається *статичним коефіцієнтом тертя* ($f_0 = F_{гр} / N$). Сила тертя відхиляє повну реакцію $\vec{R}$ від нормалі на кут φ_0 – кут тертя спокою (рис. 3.1а). Тангенс кута тертя спокою дорівнює статичному коефіцієнту тертя

$$tg\varphi_0 = F_{тр} / N = f_0, \qquad (3.1)$$

де $\bar{P}$ – зовнішня рушійна сила.

Відношення сили тертя під час руху до сили нормального тиску називається *динамічним коефіцієнтом тертя ковзання*. Він дещо менший від статичного коефіцієнта тертя ковзання.

При коченні криволінійних поверхонь виникає опір, який називають тертям кочення. Воно залежить від пружних властивостей матеріалів, кривизни поверхонь стичних тіл і сили нормального тиску. При русі циліндра по площині в зоні їхнього контакту (рис. 3.1б) внаслідок деформації площини (деформацією циліндра нехтуємо; це спрощення мало впливає на результат аналізу) створюються пружні деформації, які розподілені нерівномірно (деформація площини кочення несиметрична).

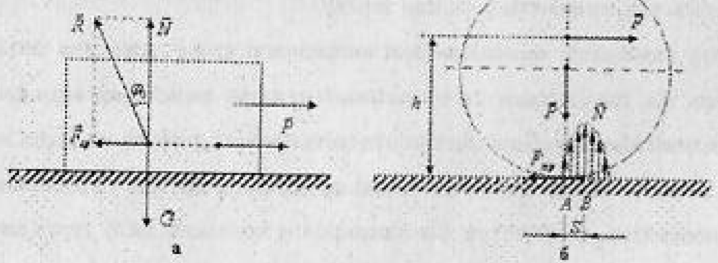


Рис 3.1 – Деформація під час прямолінійного та обертального руху тіла

Позаду циліндра деформація площини не зникає або зникає через деякий час. Це призводить до того, що рівнодійна елементарних сил реакції площини N є похилою до поверхні кочення і не проходить через вісь циліндра. Вона також зміщена відносно вісі циліндра, який котиться, на величину $s=AB$ в бік руху тіла. Відстань s називається *коефіцієнтом тертя кочення*. Для кочення тіла потрібно подолати момент пари сил:

$$M_{тр} = Ps, \qquad (3.2)$$

де P – сила, яка притискує тіло до опорної поверхні.

Якщо до циліндра паралельно опорній площині на відстані h прикладена рушійна сила F, то в зоні контакту виникає сила тертя $F_{тр}$. Під час рівномірного кочення моменти рушійної сили і опору дорівнюють один одному:

$$F \cdot h = P \cdot s, \qquad (3.3)$$

звідки

$$s = \frac{F \cdot h}{P}. \qquad (3.4)$$

На основі даної формули дослідним шляхом визначається коефіцієнт тертя кочення s.

Для визначення коефіцієнта тертя ковзання використовують горизонтальну або похилу площини. У найпростішому випадку установка для визначення f_0 представляє собою стальну площину 1, виставлену установочними гвинтами за рівнем строго горизонтально (рис. 3.2).

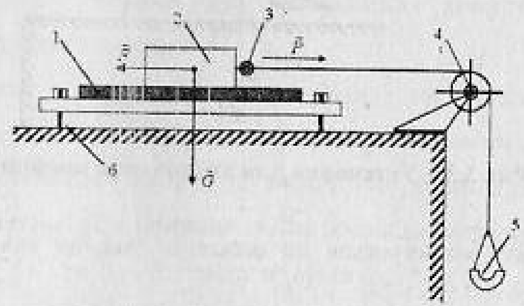


Рис.3.2 – Установка для визначення коефіцієнта тертя

По площині переміщується брусок 2 (один з пари досліджуваних матеріалів); рекомендується визначити коефіцієнти f_0 для сталі по сталі, чавуну по сталі, пластмаси по сталі і т. д. До бруска гачком 3 кріпиться один кінець шнура, перекинутого через спрямовуючий блок 4 (блок встановлюють паралельно площині 1). До другого кінця шнура прикріплено шальку 5.

Шалька поступово навантажується дрібними гирями або дротом доки досліджуваний зразок матеріалу не почне рівномірно рухатись по площині.

Коефіцієнт тертя ковзання f вимірюється також на похилій площині. Похила площина 1 за допомогою гвинтового механізму 4 може бути встановлена під різними кутами α до горизонтальної площини (рис. 3.3). Величина кута нахилу фіксується по шкалі 3. За збільшення кута α зростає складова сили тяжіння G і також сила тертя спокою F. При $\alpha = \varphi_0$ маємо $F = F_{тр}$ і зразок 2 почне рухатись. Очевидно, що

$$f_0 = tg\varphi_0. \tag{3.5}$$

Платформа обертається навколо осі 1 в одну сторону на кут до 45°.

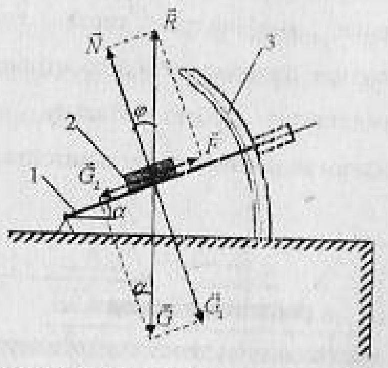


Рис.3.3 – Установка для визначення коефіцієнта тертя

Кут нахилу відлічується по шкалі 3. Час, за який зразок пройде відстань l:

$$t = \sqrt{\frac{l}{2g\sin\alpha}}. \tag{3.6}$$

Це реалізується за умови $F_1 = F_{тр}$. Коефіцієнт тертя ковзання $f_0 = tg\alpha$.

Кінематичний коефіцієнт тертя ковзання за рівноприскореного руху визначається за формулою:

$$f = tg\alpha - \frac{2l}{gt^2\cos\alpha} \tag{3.7}$$

Чисте кочення циліндра (котка) по похилій площині без ковзання реалізується за умови

$$tg\alpha_{max} \le 3f_0, \tag{3.8}$$

де α_{max} – найбільший кут нахилу площини, за якого відбувається чисте кочення циліндра.

Коефіцієнт тертя кочення обчислюється за формулою:

$$s = \frac{d}{2}tg\alpha - \frac{3ld}{gt^2\cos\alpha} \tag{3.9}$$

де d – діаметр котка; α – кут нахилу площини до горизонту; l – відстань, яку проходить коток за час t ($v_0 = 0$).

Порядок виконання роботи

1. Визначення коефіцієнта тертя ковзання.

1. Ознайомитися з установками для вимірювання коефіцієнта тертя ковзання на горизонтальній площині.
2. Підготувати зразки матеріалів і опорну площину для роботи (поверхню контакту протерти спеціальною ганчіркою та просушити гарячим повітрям).
3. Поступово навантажувати шальки установок тягарцями, поки зразок не почне рівномірно рухатись. Для кожного зразка дослід повторити 3...5 разів. Обчислити f_0 $f_0 = F_{тр}/N$, де $N = P$ – вага тягарців.
4. При використанні похилої площини виконати операції, аналогічні п.1 та п.2. Змінювати кут нахилу похилої дошки доки зразок під дією сили тяжіння не почне рухатись. Дослід повторити для кожного зразка 3...5 разів. Обчислити f_0 ($f_0 = tg\varphi_0$).
5. Встановити площину під кутом α, більшим від кута тертя. Зафіксувати час t, протягом якого зразок проходить відстань l рівноприскорено. Дослід для кожного зразка повторити 3...5 разів.

Обчислити значення кінематичного коефіцієнта тертя ковзання f за формулою (3.7).

2. Визначити коефіцієнт тертя кочення.

1. Засвоїти методику визначення коефіцієнта тертя кочення на похилій площині. Виконати операції, аналогічні п.1 та п.2.

2. Виміряти діаметр котків.

3. Розрахувати $\alpha_{ск}$.

4. Встановити похилу площину під кутом $\alpha < \alpha_{ск}$.

5. Покласти коток на похилу площину на початку шляху l; час його проходження виміряти секундоміром. Дослід для кожного зразка повторити 3...5 разів. Обчислити s за формулою (3.9).

Контрольні запитання та завдання

1. Як формулюється двочленний закон тертя?
2. Як впливають жорсткість та змащення поверхні на коефіцієнт тертя ковзання?
3. Чи може виникнути тертя кочення у випадку абсолютно твердих тіл?
4. Чому коефіцієнт кочення має лінійну розмірність?
5. Поясніть, чому тертя ковзання супроводжується нагріванням тіл, а тертя спокою ні.
6. Які основні джерела похибок при вимірюванні коефіцієнтів тертя?

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

Мета роботи:

1. Повторити основні поняття та закони механіки поступального руху.
2. Дослідити виконання законів механіки поступального руху.
3. Вивчити закон збереження механічної енергії.

Прилади та матеріали:

1. прилад ПДЗМ;
2. фото датчик;
3. динамометр;
4. секундомір;
5. нагнітач повітря;
6. джерело живлення.

Теоретичні відомості.

Механіка представляє собою вчення про прості форми руху матерії, які виникають при переміщенні тіл або їх частин одна відносно іншої. Кінематика – розділ механіки, який вивчає закономірності відносного руху в просторі не залежно від факторів, що спричинюють або змінюють цей рух.

Основними поняттями в кінематиці являються шлях (S), швидкість (v) та прискорення (a).

Якщо за будь-які рівні проміжки часу тіло проходить однаковий шлях – такий рух називається рівномірним. Швидкість, у цьому випадку являється постійною величиною та не залежить від часу. А величина шляху визначається за формулою:

$$S = v \cdot t. \qquad (4.1)$$

Якщо вектор швидкості залежить від часу, тобто $\vec{v} = \vec{v}(t)$, тоді за однакові проміжки часу тіло проходить різні проміжки шляху. Такий рух називається нерівномірним.

Нерівномірний рух, за якого зміна швидкості $\Delta\vec{v}$ за рівні проміжки часу Δt являється постійною величиною, називають рівнозмінним. Відношення

$$\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \vec{a} \tag{4.2}$$

являється прискоренням руху.

Нехай тіло пройшло шлях ΔS за час Δt, тоді можна вважати, що на даній ділянці тіло рухається з середньою швидкістю

$$v_{cep} = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \tag{4.3}$$

Якщо вибрати Δt нескінченно малим, то і приріст радіус-вектора, який визначає положення тіла на траєкторії, буде малим, за таких умов величина рівна

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \tag{4.4}$$

називається миттєвою швидкістю. Миттєве прискорення при нерівномірному русі буде визначатися як

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \tag{4.5}$$

Механічну взаємодію тіл в кінцевому результаті можна охарактеризувати єдиним фактором – силою. Поняття сили належить до числа первинних понять фізики та формального визначення не має. Повсякденний дослід показує, що сила здатна змінювати рух тіл.

Механічний рух тіл у зв'язку з утворюючою або змінюючою цей рух взаємодією тіл вивчає динаміка.

Основними законами динаміки є: закони Ньютона; закон збереження імпульсу; закон збереження та перетворення механічної енергії потенціального (консервативного) поля сил.

Закон збереження імпульсу для замкнутої системи є слідством ІІ-го та ІІІ-го законів Ньютона та записується у такому вигляді

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{c} \vec{p}_i = const \tag{4.6}$$

де $\vec{p}_i$ – імпульс і-тої складової замкнутої системи.

Взаємодія тіл може бути короткочасною, наприклад, зіткнення (удар) двох тіл, що рухаються. При цьому абсолютно пружнім ударом називається удар, після якого деформація тіл повністю зникає, а механічна енергія не перетворюється в інші види енергії. У цьому випадку виконується і закон збереження імпульсу (4.6).

Абсолютно непружним називається удар, за якого деформація тіл після удару не зникає, а тіла продовжують взаємний рух. При цьому частина енергії переходить у внутрішню енергію тіла, пов'язану з їх деформацією, а механічна енергія не зберігається.

Швидкість руху тіл масами m_1 та m_2 після такого удару, визначається співвідношенням

$$\vec{v} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}. \tag{4.7}$$

У динаміці поступального руху розрізняють два види механічної енергії – кінетичну та потенціальну. Кінетична енергія $E_к$ пов'язана зі швидкістю руху тіла співвідношенням

$$E_к = \frac{mv^2}{2}. \tag{4.8}$$

Зміна кінетичної енергії тіла відбувається за здійснення роботи A силами, що викликають чи змінюють характер руху тіла

$$A = \Delta E_к. \tag{4.9}$$

Але, не тільки рухоме тіло здатне здійснювати роботу. Можливість тіла здійснювати роботу може бути пов'язана з його положенням в силовому полі, в кожній точці якого на тіло діє цілком визначена сила. Енергія, яку при цьому має тіло, називається потенціальною.

Роботу вважають додатною ($A>0$), якщо вона здійснюється над тілом; якщо ж тіло здійснює роботу, тоді – від`ємною($A<0$).

Закон збереження та перетворення механічної енергії для замкнутої системи в потенціальному полі сил, має вигляд

$$E = E_к + U, \tag{4.10}$$

де U – потенціальна енергія; $E_к$ – кінетична енергія; E – повна механічна енергія.

Зручним для вивчення та демонстрації основних законів кінематики та динаміки поступального руху являється обладнання, в основу якого покладено принцип руху тіл на повітряній подушці. Новітні досягнення техніки дозволили здійснити даний принцип для тіл великої маси. Катера-амфібії можуть також легко рухатися на суходолі, як і на воді. При цьому сили тертя, що виникають під час руху, обумовлюються тільки тертям поверхні тіла об повітря. У випадку тіл малих розмірів сили тертя за такого руху практично відсутні.

Таким чином, при вивчені руху тіла на повітряній подушці силами тертя можна знехтувати. Це важливо при вивчені законів механіки, оскільки сили тертя не являються консервативними.

Опис установки

Установка для демонстрації законів механіки поступально руху складається з наступних частин: направляючої монорейки (1); кареток (3), що рухаються на повітряній подушці; повітронагнітача (2).

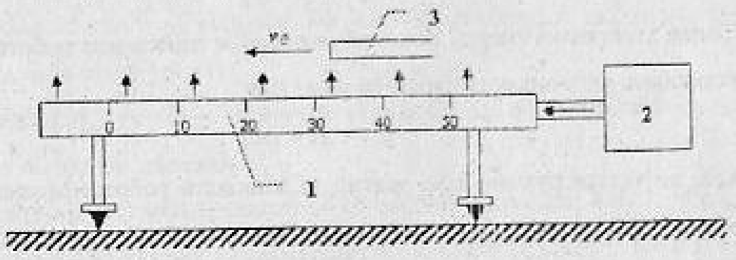


Рис.4.1 – Схема експериментальної установки

В електричну схему прибору входять: пульт керування, електромагніти, фотодатчик, секундомір та випрямляч, що забезпечує функції управління, контролю та реєстрації проміжків часу та шляху під час проведення дослідів.

Схема працює у двох режимах. У першому режимі секундомір працює як датчик проміжків часу. У другому режимі секундомір вимірює час, за який здійснюється рух кареток вздовж монорейки.

Порядок зборки схеми

1. Прикріпити шланг повітронагнітача через спеціальний патрубок до монорейки.
2. Встановити на торець монорейки вузол скидання тиску таким чином, щоб забезпечити легкість виходу штиря із зачеплення з клапаном та достатню густину закривання клапана, та закріпити гвинтами. Регулювання проводити при працюючому нагнітачі.
3. Встановити за допомогою болтів пускові магніти на правому та лівому кінці монорейки.
4. Встановити прилад на демонстраційному столі в горизонтальному положенні з допомогою установочних ніжок по рівню. Кінцеву установку монорейки проводять за встановленим положенням каретки. Для цього слід поставити каретку на монорейку, включити повітронагнітач і за допомогою регулятора напруги настроїти необхідний надлишковий тиск в монорейці, який створює повітряну подушку під кареткою. Регулюючими болтами домогтися нерухомого положення каретки з однаковим зазором між юбками та монорейкою.
5. У вихідному положенні тумблер "Пуск-Викл." пульта повинен знаходитися в положенні "Викл.", стрілки секундоміра повинні бути виставленні в початковому положенні, при цьому лампа на пульті не повинна горіти. Для виключення перегріву сердечників пускових магнітів випрямляч підключають до пульту безпосередньо перед початком демонстрації досліду.

Принцип роботи установки

Рух по монорейці виконує П-подібне тіло – каретка, юбка якої облягає по бокам монорейку. Наявність юбки забезпечує не тільки орієнтацію руху вздовж монорейки, але й центрування каретки в поперечній площині відносно поздовжньої осі монорейки. У дослідах використовують два типи пластмасових кареток: довжиною 100 мм, масою 50 г(мала каретка) та довжиною 200 мм, масою 100 г (велика каретка).

На обох кінцях верхньої площини каретки є пази для установки буферів.

В залежності від дослідів використовують два типи буферів: пружинний та жорсткий. Як у пружних, так і у жорстких буферів в верхній частині держателів знаходяться циліндричні стальні пластини, завдяки яким каретки утримуються в початковому положенні за рахунок притягування їх до сердечників пускових електромагнітів. При вимкненому електричному струмі пускових магнітів та переводі тумблера в положення «Пуск» на пульті управління пристрою відбувається зникнення магнітного поля електромагніта (сили тяжіння), тоді під дією сили стискання пружини буфера (або складової сили тяжіння при нахилі пристрою на 1-3 градуси) відбувається відштовхування та рух кареток.

Відлік пройдених кареткою відрізків шляху проводиться за рухомою шкалою.

Пульт керування являє собою командно-сигнальний пристрій, змонтований в металічному корпусі. Всередині корпуса пульта знаходиться панель, на якій виконано монтаж елементів електричної схеми. Частина елементів електричної схеми знаходиться на лицьовій панелі: тумблер пуску, тумблер переключення режиму роботи схеми, ліхтар з сигнальною лампою, клеми для підключення: фотодатчика, секундоміра, пускових магнітів та електромагніта скидання тиску.

Вузол скидання тиску являє собою пристрій, призначений для скидання надмірного тиску всередині порожнини монорейки.

Фотодатчик призначений для роботи електросхеми під час демонстрації досліду «Визначення миттєвої швидкості». Пристрій складається з кронштейна, на якому установлено: фотодіод, конденсор та лампу накалювання.

При проходженні прапорця каретки між конденсатором та фотодіодом світловий промінь перекривається і фотодіод відповідно приводить схему в стан, за якого проходить відлік часу. При виході прапорця каретки зі світлового променя реле зупиняє запущений секундомір.

Визначення миттєвої швидкості проводять діленням довжини прапорця на час, відрахований секундоміром.

Динамометр призначений для визначення сили в межах 0-0,06 Н. Каретка, на жорсткий буфер якої надівається нитка вимірювального пристрою, рухаючись під дією складової сили тяги по похилій монорейці, переміщає стрілку динамометра на кут, відповідний цій силі.

Пусковий магніт представляє собою прилад, призначений для утримування каретки в початковому положенні. В момент зняття напруги з обмотки електромагніта каретка з пружинним буфером, знаходячись в стягнутому електромагнітом положенні, відштовхується від упора пускового магніту та починає рух.

1.Вивчення законів механіки поступально руху.

Порядок виконання роботи. Демонстрація руху на повітряній подушці.

1. Вихідний стан пристрою.

   а) тумблер «Викл.-Пуск» на пульті ПДЗМ – в положенні «Викл»;

   б) тумблер вибору режиму «1-2» на пульті ПДЗМ – в положенні «1»;

   в) секундомір СЕД-1 – «Викл.».

2. Виключити нагнітач повітря. На монорейку встановити малу каретку з двома пружинами на буферах. Підвести круглу металічну вставку буфера до сердечника електромагніта.

3. Перевести тумблер «Викл.-Пуск» в положення «Пуск». При цьому каретка починає рухатися то в одну, то в іншу сторону. Швидкість руху каретки

зменшується слабо. Це означає, що впливом консервативних сил тертя на швидкість руху каретки можна знехтувати, тобто виконується закон збереження механічної енергії.

4. Повторити експеримент з великою кареткою. Показати, що за однакових швидкостей запас кінетичної енергії у великої каретки більший, ніж у малої

2.Закон збереження механічної енергії

1. Вихідний стан пристрою згідно пунктам 1а); 1б) попереднього розділу.
2. Увімкнути секундомір СЕД-1. Тумблер «Секундомір-Датчик» в положенні «Датчик».
3. Задати на секундомірі СЕД-1 час t=0,5-0,8с.
4. Встановити у вихідне положення малу каретку с одним пружинним буфером.
5. Перевести тумблер на пульті керування в положення «Пуск». Каретка за час t пройде шлях S_1.
6. Помістити на каретку тягарець m_2=100г та забезпечити рух каретки з тягарцем згідно з попередніми вказівками. Каретка пройде шлях S_2.

Оскільки рух каретки можна вважати рівномірним, а енергія деформації пружини переходить в кінетичну енергію руху каретки, тоді

$$\frac{kx^2}{2}=\frac{mv^2}{2},$$

тобто, буде виконуватися співвідношення

$$\frac{S_1}{S_2}=\sqrt{\frac{m_1+m_2}{m_1}},$$

де m_1 – маса каретки; m_2 – маса тягарців.

3.Закон збереження імпульсу при абсолютно пружному та непружному ударі

1. Встановити на двох протилежних кінцях горизонтально встановленої монорейки дві каретки з закріпленими на них пружинними буферами; підібрати однакову масу кареток.
2. Увімкнути прилад і цим самим здійснити рух кареток по монорейці. Імпульс каретки, що рухається в одному напрямку дорівнює «$-m\bar{v}$», а тої, що рухається назустріч – «$+m\bar{v}$». Після пружного удару змінюються знаки початкових імпульсів: імпульс першої буде дорівнювати «$+m\bar{v}$», а другої – «$-m\bar{v}$».
3. На секундомірі СЕД-1 задати проміжок часу, по закінченню якого каретки після пружного удару і проходження після цього рівних проміжків шляху зупиняться.
4. При знятих з обох кареток пружинних буферах і зміні їх на жорсткі, провести дослід із закріпленим на одному з буферів куском пластиліну. При цьому каретки повинні зупинитися, тобто в даному випадку доводиться, що сума імпульсів тіл , що складають замкнуту систему, залишається незмінною за будь-яких взаємодій тіл цієї системи між собою.

4.Визначення миттєвої швидкості

1. Установити тумблер секундоміра СЕД-1 в режим «Секундомір», тумблер «Режим» на пульті приладу в положення «2».
2. Установити та закріпити на рамі пристрою фотодатчик на відстані не менше 100мм від початку відліку руху, закріпивши його на направляючій опорній рамі монорейки гвинтом.
3. Підключити вилку фотодатчика до клем ФД пульта керування прибором.
4. Встановити на штир каретки короткий прапорець, а каретку з пружинним буфером у вихідне положення на монорейці.
5. Включити нагнітальний пристрій, а потім тумблер «Пуск-Викл.» в положення «Пуск», розміщений на пульті керування. Відношення пройденого кареткою шляху ΔS_i за безкінечно малий відрізок часу Δt_i (час

проходження прапорця через світловий потік) буде шуканою миттєвою швидкістю, тобто $v = \frac{\Delta S_1}{\Delta t_1}$.

6. Повторити дослід з більш довгим (ΔS_2) прапорцем. При цьому $v = \frac{\Delta S_2}{\Delta t_2}$.

Контрольні питання та завдання

1. Який рух тіл називають: поступальним, обертальним.
2. Дати визначення швидкості та прискоренню.
3. Сформулювати закон збереження імпульсу.
4. Сформулювати закон збереження механічної енергії.
5. Що таке абсолютно пружний та непружний удари. Які закони збереження виконуються при них.

Лабораторна робота № 1-05

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ТІЛА ДОВІЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

Мета роботи:

Метою роботи є визначення моментів інерції тіл правильної та довільної геометричної форми.

Прилади і матеріали:

1. диск на металевому підвісі;
2. набір досліджуваних тіл;
3. штангенциркуль;
4. електричний секундомір.

Теоретичні відомості

При вивченні законів обертального руху запроваджується поняття про момент інерції твердого тіла. Моментом інерції матеріальної точки (I) відносно даної вісі обертання називають величину, яка дорівнює добутку маси матеріальної точки (m) та квадрату її відстані від осі обертання (r):

$$I = m \cdot r^2. \qquad (5.1)$$

При обертанні навколо даної вісі не матеріальної точки, а цілого твердого тіла, можна розглядати тверде тіло як систему жорстко зв'язаних між собою матеріальних точок з масами $m_1, m_2 \ldots m_n$, які розташовані на відстані $r_1, r_2 \ldots r_n$ від вісі обертання. Моментом інерції тіла називають суму моментів усіх матеріальних точок тіла:

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \ldots + m_n r_n^2 = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2. \qquad (5.2)$$

Моменти інерції тіл правильної геометричної форми та однорідних за складом визначають за допомогою розрахунків. Наприклад, момент інерції суцільного диска або циліндра відносно осі, яка проходить крізь його геометричний центр, дорівнює

$$I_o = \frac{1}{2} mr^2, \qquad (5.3)$$

де m – маса диска (циліндра); r – радіус тіла.

Безпосереднє знаходження моменту інерції тіла неправильної (довільної) геометричної форми досить ускладнене. Гаус запропонував знаходити момент інерції тіла довільної форми шляхом порівняння періодів крутильних коливань цього тіла з періодом коливань тіла правильної геометричної форми, момент інерції якого відомий.

Прилад для даної роботи складаються з однорідного металевого диска, який підвішений на кінці металевого дроту, закріпленого зверху на кронштейні (рис.5.1).

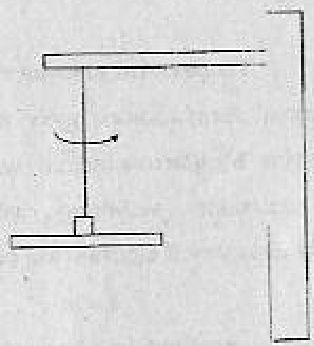


Рис. 5.1 – Схема експериментальної установки

Якщо диск здійснює крутильні коливання, то спостерігаючи їх можна виміряти період таких коливань T.

Нехай період крутильних коливань диска дорівнює T_0. Залежність між періодом крутильних коливань тіла та модулем крутіння дроту, на який підвішене тіло, має вигляд:

$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{I_o}{\sigma}}, \qquad (5.4)$$

де: T_0 – період крутильних коливань диска; I_0 – момент інерції диска відносно осі обертання, який можна визначити за формулою (5.3); σ – модуль крутіння дроту.

На диск кладуть тверде тіло, момент інерції якого (I) треба знайти. Тепер момент інерції всієї системи відрізняється від I_0 та від I і дорівнює сумі моментів інерції обох тіл:

$$I_1 = I_o + I \qquad (5.5)$$

Одержану систему тіл приводять до крутильного коливального руху і визначають період коливання системи T_1:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{\sigma}}. \qquad (5.6)$$

У виразах (5.4) та (5.5) значення модуля крутіння одне й теж саме, оскільки підвіс системи незмінний. Відношення періодів коливань диска та системи буде мати вигляд:

$$\frac{T_o}{T_1} = \frac{2\pi\sqrt{\dfrac{I_o}{\sigma}}}{2\pi\sqrt{\dfrac{I_1}{\sigma}}} = \sqrt{\frac{I_o}{I_1}}. \qquad (5.7)$$

Далі отриманий вираз зведемо до квадрату та з урахуванням формули (5.5) отримаємо:

$$\frac{T_o^2}{T_1^2} = \frac{I_o}{I_1} = \frac{I_o}{I_o + I}. \qquad (5.8)$$

З даного виразу отримуємо кінцеву робочу формулу:

$$I = I_o \frac{T_1^2 - T_o^2}{T_o^2}. \qquad (5.9)$$

За цією формулою можна визначати момент інерції тіл довільної геометричної форми.

Порядок виконання роботи

1. Визначити радіус диска. Для цього проводять вимірювання діаметру диска за допомогою штангенциркуля в декількох напрямах та беруть середнє арифметичне значення.

2. Розрахувати момент інерції диска за формулою (5.3), визначивши заздалегідь масу диска m (шляхом зважування на терезах чи довідавшись у лаборанта).

3. Повернути (передчасно закріпивши його на дроті) диск навколо вертикальної осі (рис. 5.1) на малий кут та відпустити його.

4. Увімкнути секундомір й відрахувати час 10...20 повних коливань t_0. Знайти період одного повного коливання за формулою:

$$T_0 = \frac{t_0}{n},$$

де n – кількість крутильних коливань.

5. Покласти на диск досліджуване тіло (диск з прорізом), центруючи його положення. Привести одержану систему до крутильного коливального руху та визначити період коливань системи:

$$T_1 = \frac{t_1}{n}.$$

6. Обчислити момент інерції досліджуваного тіла I за формулою (5.9).

7. Повторити експеримент 5...7 разів. Обчислити похибку вимірювання моменту інерції та представити результат у вигляді:

$$I = \langle I \rangle \pm \Delta I \ (\text{кг}\cdot\text{м}^2).$$

Контрольні запитання і завдання

1. Визначити поняття обертального та поступального руху.
2. Визначити момент інерції матеріальної точки / тіла відносно даної осі.
3. Фізичний смисл моменту інерції. Від яких параметрів він залежить?
4. Назвати моменти інерції твердих тіл правильної геометричної форми.
5. Сформулювати теорему Штейнера.

6. Як обчислити похибки вимірів моменту інерції?
7. Що називають моментом сили? Як визначають його напрямок і числове значення? Які одиниці вимірювання моменту сили?
8. Що таке кутова швидкість тіла і як вона спрямована?
9. Що таке кутове прискорення тіла і яка причина його виникнення? Як спрямоване кутове прискорення?
10. Сформулювати основний закон динаміки обертального руху.
11. Одиниці кутового прискорення, моменту сили і моменту інерції тіла.

Лабораторна робота № 1-06

ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОЛЬОТУ КУЛІ

Мета роботи:

1. Вивчити закони збереження імпульсу та моменту імпульсу.
2. За допомогою балістичного маятника експериментально визначити швидкість польоту кулі.

Прилади та матеріали:

1. балістичний маятник;
2. аналітичні терези;
3. метрична лінійка.

Теоретичні відомості

Для розгляду закону збереження імпульсу нагадаємо деякі поняття. Сукупність матеріальних точок (тіл), що розглядається як єдине ціле, називають *механічною системою*. Сили взаємодії між матеріальними точками механічної системи називаються *внутрішніми*. Сили, з якими на матеріальні точки системи діють зовнішні тіла, називаються *зовнішніми*. Механічна система тіл, на яку не діють зовнішні сили, називається *замкнутою* (або ізольованою). Якщо ми маємо механічну систему, що складається з багатьох тіл, то відповідно третьому закону Ньютона, сили, що діють між цими тілами, будуть рівні й протилежно спрямовані, тобто геометрична сума внутрішніх сил дорівнює нулю $\bar{F}_{12}=-\bar{F}_{21}$. Тоді з

$$\frac{d\bar{p}}{dt}=\bar{F}_1+\bar{F}_2+...+\bar{F}_n, \qquad (6.1)$$

де $\bar{p}=\sum_{i=1}^{n}m_i\bar{v}_i$ – імпульс системи, отримуємо закон збереження повного імпульсу для замкнутої системи

$$\bar{p}=\sum_{i=1}^{n}m_i\bar{v}_i=const. \qquad (6.2)$$

Імпульс замкнутої системи зберігається, тобто не змінюється із часом. Закон збереження імпульсу системи є наслідком фундаментальної властивості простору – однорідності. Однорідність простору означає, що за будь-якого паралельного переносу замкнутої системи як цілого в просторі, її механічні властивості не змінюються.

Закон збереження повного імпульсу справедливий для незамкнутих систем за умови, що сума всіх зовнішніх сил $\bar{F}$, що діють на систему, дорівнює нулю: $\bar{F}=0$.

Моментом імпульсу (кількості руху) матеріальної точки A щодо нерухомої точки O називається фізична величина, обумовлена векторним добутком:

$$\bar{L}=[\bar{r}\bar{p}]=[\bar{r}\ m\bar{v}], \qquad (6.3)$$

де $\bar{r}$ – радіус-вектор, проведений із точки O в точку A; $\bar{p}=m\bar{v}$ – імпульс матеріальної точки; $\bar{L}$ – псевдовектор, його напрямок збігається з напрямком поступального руху правого гвинта при його обертанні від $\bar{r}$ до $\bar{p}$.

Модуль вектора моменту імпульсу

$$L=rp\sin\alpha=mvr\sin\alpha=pl, \qquad (6.4)$$

де α – кут між векторами $\bar{r}$ та $\bar{p}$, l – плече вектора $\bar{p}$ відносно точки O.

У замкнутій системі момент зовнішніх сил дорівнює нулю $\bar{M}=0$ й $\frac{d\bar{L}}{dt}=0$, звідки

$$\bar{L}=const \qquad (6.5)$$

Вираз (6.5) являє собою *закон збереження моменту імпульсу*: момент імпульсу замкнутої системи зберігається, тобто не змінюється із часом.

Закон збереження моменту імпульсу – фундаментальний закон природи. Він пов'язаний із властивістю симетрії простору – його ізотропністю, тобто з інваріантністю фізичних законів щодо вибору напрямку осей координат системи відліку (щодо повороту замкнутої системи в просторі на будь-який кут).

В даній лабораторній роботі буде використовуватися абсолютно непружний удар. При непружному зіткненні тіла деформуються в місці їхнього зіткнення. Кінетична енергія при цьому не зберігається – частина її переходить у внутрішню енергію тіл. *Абсолютно непружним* ударом називається зіткнення, за якого тіла після зіткнення рухаються з однаковою швидкістю або знаходяться у спокої. При такому ударі виконується тільки закон збереження імпульсу. Для двох тіл з масами m_1, m_2 та швидкостями $\bar{v}_1$, $\bar{v}_2$ швидкість руху системи після зіткнення

$$\bar{v} = \frac{m_1\bar{v}_1 + m_2\bar{v}_2}{m_1 + m_2}. \tag{6.6}$$

При абсолютно непружному ударі втрата кінетичної енергії макроскопічного руху тіл $\Delta E_к$, дорівнює роботі, що витрачена на деформацію, та визначається формулою

$$\Delta E_к = E_{к1} - E_{к2} = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)}(v_1 - v_2)^2, \tag{6.7}$$

де

$$E_{к1} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2},\ E_{к2} = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v^2 \tag{6.8}$$

– кінетична енергія двох тіл до та після зіткнення. Частина кінетичної енергії $\Delta E_к$ (6.7) іде на руйнування тіл при їхньому зіткненні, інша її частина пов'язана з рухом центра мас системи. Ця енергія при зіткненні не змінюється.

Метод вимірювання швидкості кулі методом балістичного маятника

Безпосередньо виміряти швидкість польоту кулі досить важко через велике значення даної величини. Тому прибігають до непрямих методів, одним із яких є метод балістичного маятника.

Балістичний маятник – це тіло масою M (в нашому випадку – циліндр, наповнений пластиліном), підвішене на легких довгих нитках (рис.6.1).

В маятник стріляють за горизонтальним напрямом кулею, що має масу m і швидкість v. Куля входить у пластилін і в результаті непружного удару система масою $(M+m)$ здобуває швидкість v'. При цьому маятник відхиляється.

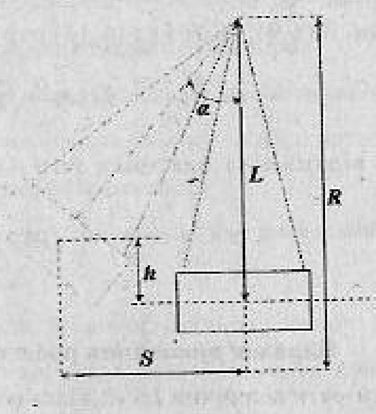


Рис. 6.1 – Балістичний маятник

Якщо час взаємодії кулі з маятником τ малий у порівнянні з періодом коливань маятника T, то систему можна вважати замкнутою, а значить в ній виконується закон збереження моменту імпульсу. Якщо розміри маятника малі у порівнянні з довжиною ниток, то рівняння закону збереження моменту імпульсу еквівалентно рівнянню закону збереження імпульсу. Всі ці умови в нашому випадку виконуються, тому:

$$mv = (M + m) \cdot v' \tag{6.9}$$

Швидкість v' може бути визначена із закону збереження енергії:

$$\frac{1}{2}(M + m) \cdot v'^2 = (M + m) \cdot gh, \tag{6.10}$$

звідси

$$v' = \sqrt{2gh}. \tag{6.11}$$

Якщо L – відстань від точки підвісу до центра тяжіння маятника, то

$$h = L - L \cdot \cos\alpha = 2L \cdot \sin^2\frac{\alpha}{2}, \tag{6.12}$$

де α – кут відхилення маятника від положення рівноваги. Цей кут може бути визначений з умови:

$$tg\alpha \approx \frac{S}{R}. \tag{6.13}$$

де S – горизонтальний зсув маятника, R – відстань від точки підвісу до лінійки з розподілами. З (6.9), (6.10) та (6.12) отримаємо:

$$v = \frac{M+m}{m} \cdot 2 \cdot \sin\frac{\alpha}{2}\sqrt{gL}. \tag{6.14}$$

За малих кутів відхилення маятника $\sin\alpha \approx \alpha$ та $tg\alpha \approx \alpha$, тому:

$$v = \left(1 + \frac{M}{m}\right) \cdot \frac{S}{R}\sqrt{gL} \tag{6.15}$$

Порядок виконання роботи

1. Зважити кулі й виміряти величини L і R. Маса маятника задана.
2. Направити пушку на маятник і стріляти із неї.
3. Величину S виміряти за допомогою зсуву світлової плями на шкалі, прикріпленої до столу. Кожним снарядом стріляти не менш п'яти разів.
4. Результати вимірювань оформити у вигляді таблиці.
5. За отриманими результатами, користуючись формулою (6.15) обчислити швидкість кожної кулі.
6. Знайти похибку вимірювань.

Контрольні завдання та запитання

1. Що називають механічною системою? Які системи є замкнутими?
2. У чому полягає закон збереження імпульсу? В яких системах він виконується? Чому він є фундаментальним законом природи?
3. Якою властивістю простору обумовлюється справедливість закону збереження імпульсу?
4. У чому полягає закон збереження енергії? Для яких систем він виконується?

5. У чому фізична сутність закону збереження та перетворення енергії? Чому його вважають фундаментальним законом природи?
6. Чим відрізняється абсолютно пружний удар від абсолютно непружного удару?
7. Як визначити швидкість тіла після центрального абсолютно пружного удару? Наслідком яких законів є цей вираз?
8. У чому полягає метод балістичного маятника?
9. Як визначити швидкість тіла після абсолютно непружного удару і як це зробити експериментальним шляхом?
10. Що таке момент імпульсу? Як визначити напрямок моменту імпульсу?
11. В чому полягає фізична сутність закону збереження моменту імпульсу? В яких системах він виконується? Наведіть приклади.

Лабораторна робота № 1-07

ПЕРЕВІРКА ОСНОВНОГО РІВНЯННЯ ДИНАМІКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ НА ХРЕСТОПОДІБНОМУ МАЯТНИКУ ОБЕРБЕКА

Мета роботи:

Метою роботи є перевірка основного закону динаміки обертального руху за допомогою хрестоподібного маятника Обербека.

Прилади і матеріали:

1. хрестоподібний маятник;
2. секундомір;
3. штангенциркуль;
4. масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

Для характеристики зовнішньої механічної дії на тіло, яка призводить до зміни обертального руху тіла, вводять поняття моменту сили M.

Моментом сили $\vec{F}$ відносно нерухомої точки O називається векторна величина $\vec{M}$, що дорівнює векторному добутку радіус вектора $\vec{r}$, проведеного з точки O в точку A прикладення сили, та вектора сили $\vec{F}$:

$$\vec{M} = [\vec{F}, \vec{r}]. \tag{7.1}$$

Модуль моменту сили дорівнює

$$M = F \cdot r \cdot \sin\alpha = F \cdot l, \tag{7.2}$$

де α – кут між $\vec{r}$ та $\vec{F}$, а $l = r \cdot \sin\alpha$ – довжина перпендикуляра, який опущений з точки O на лінію дії сили. Тоді величина l називається плечем сили відносно точки O.

Якщо переносити точку прикладення сили $\vec{F}$ вздовж лінії її дії, то момент цієї сили M відносно однієї і тієї ж нерухомої точки O не змінюється. У випадку

проходження лінії дії сили через точку O момент сили відносно цієї точки дорівнює нулю.

Вектор $\vec{M}$ є аксіальним. Його напрям обирають так, щоб обертання навколо точки O у напрямі сили $\vec{F}$ і вектор $\vec{M}$ утворюють правогвинтову систему.

Якщо на тіло діє n сил, то головним (результуючим) моментом системи сил відносно нерухомої точки O буде вектор $\vec{M}$, який дорівнює геометричній сумі моментів всіх сил (n) системи відносно точки O:

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^{n}[\vec{F}_i, \vec{r}_i] \tag{7.3}$$

де $\vec{r}_i$ – радіус-вектор, який проведено з точки O в точку прикладення сили $\vec{F}_i$.

Поняття моменту імпульсу $\vec{L}$ системи відносно нерухомої точки O вводиться як геометрична сума моментів імпульсу відносно тієї ж точки O всіх матеріальних точок системи:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n}\vec{L}_i = \sum_{i=1}^{n}[\vec{r}_i, m_i\vec{v}_i] = \sum_{i=1}^{n}[\vec{r}_i, \vec{p}_i], \tag{7.4}$$

де $\vec{L}_i = [\vec{r}_i, m_i\vec{v}_i]$ – момент імпульсу i-ої матеріальної точки, а m_i, $\vec{r}_i$, $\vec{v}_i$ – маса, радіус-вектор і швидкість i-ої матеріальної точки; $\vec{p}_i$ – імпульс i-ої точки.

Якщо система обертається з кутовою швидкістю $\vec{\omega}$ навколо нерухомої точки O і напрям вектора $\vec{\omega}$ співпадає з напрямом $\vec{L}$, то її момент імпульсу визначається як

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}, \tag{7.5}$$

де I – момент інерції системи, який дорівнює

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2. \tag{7.6}$$

Згідно з сучасними уявленнями, момент імпульсу можуть мати не лише частинки тіла, але і поля, причому елементарні частинки і побудовані з них системи (наприклад, атомні ядра) можуть мати момент імпульсу, який не пов'язаний з рухом цих частинок у просторі і який називається спіном.

З третього закону Ньютона випливає, що моменти відносно певної точки O внутрішніх сил взаємодії матеріальних точок системи попарно компенсуються:

$$[\vec{r}_i,\vec{F}_{ik}]=-[\vec{r}_i,\vec{F}_{ki}]. \qquad (7.7)$$

Отже, при обчисленні результуючого моменту сил потрібно враховувати лише зовнішні сили, які діють на механічну систему.

Якщо до механічної системи прикладений результуючий момент зовнішніх сил $M_{зовн}$ відносно точки O, то, за законами Ньютона, перша похідна за часом від моменту імпульсу відносно тієї ж точки O дорівнює

$$\frac{dL}{dt}=M_{зовн}=const. \qquad (7.8)$$

Для твердого тіла, шарнірно закріпленого у точці O, навколо якої воно обертається, даний закон зміни імпульсу системи буде також справедливий. В даному випадку формула (7.8) виражає основний закон динаміки твердого тіла, яке обертається навколо нерухомої точки. Тоді, враховуючи (7.5), отримуємо:

$$\frac{d(I\vec{\omega})}{dt}=I\frac{d\vec{\omega}}{dt}=I\vec{\varepsilon}=\vec{M}_{зовн}. \qquad (7.9)$$

Метою даної роботи є експериментальна перевірка основного закону динаміки обертального руху:

$$\vec{M}=I\vec{\varepsilon}. \qquad (7.10)$$

За основним рівнянням динаміки обертального руху, якщо момент інерції тіла I відносно осі обертання незмінний, його кутове прискорення $\vec{\varepsilon}$ прямо пропорційне моменту сили $\vec{M}$ відносно тієї ж осі:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}=\frac{M_1}{M_2}=I=const. \qquad (7.11)$$

Співвідношення (7.11), а отже і основний закон динаміки обертального руху, можна перевірити експериментально на хрестоподібному маятнику (маятнику Обербека). Для цього необхідно визначити кутове прискорення $\vec{\varepsilon}$ при $I=const$ і різних значеннях обертального моменту M_1 та M_2.

Опис вимірювальної установки і методики вимірювань

Хрестоподібний маятник являє собою хрестовину з чотирма вкрученими в муфту К стержнями 1, 2, 3, 4 (рис. 7.1а). Муфту К насаджено на горизонтальну вісь OO[1]. На цій вісі знаходиться східчастий шків S, який складається з двох частин різних діаметрів. На стержнях закріплено однакові циліндричні важки L, які можна пересувати вздовж стержнів і закріплювати на різних відстанях від вісі обертання. Вісь OO_1, на яку насаджено муфту і шківи, закріплена з рамкою NN_1, вмонтованою в стінку (рис. 7.1б).

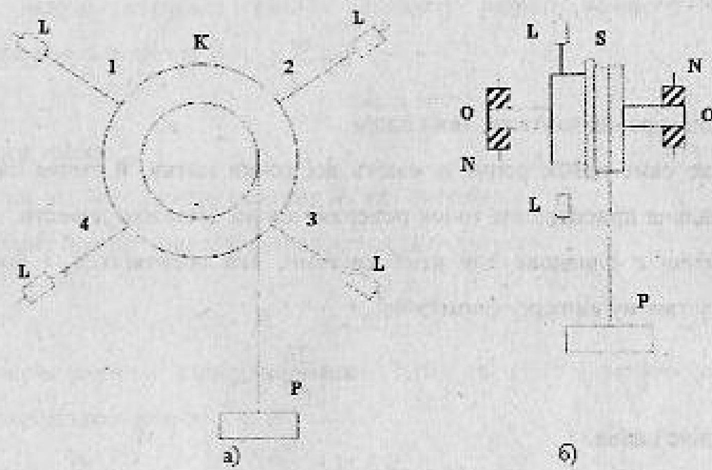


Рис. 7.1 – Хрестоподібний маятник

На один із шківів намотується нитка з вагою P на кінці. Залишений сам по собі після підняття на деяку висоту вантаж буде падати, а сила натягу T нитки, яка розмотується зі шківа, створює момент сили, який надає рухомій частині установки деяке прискорення. Якщо важки L на хрестовині розташовані симетрично, то це буде єдиний діючий на систему зовнішній обертаючий момент.

Конструкція установки дозволяє змінювати як обертальний момент M, що він діє на хрестовину з важками, так і момент інерції I системи, яка обертається.

Обертаючий момент змінюють або шляхом зміни розміру підвішеної до нитки ваги P, або шляхом зміни плеча сили, переносячи нитку з одного шківа на інший. Момент інерції змінюють переміщенням важків L вздовж стержня хрестовини.

1. Визначення кутового прискорення.

Вантаж P, прив'язаний до нитки, яка намотана на шків, залишений сам по собі, падає вниз рівноприскорено. Якщо вантаж протягом часу t проходить шлях h, то

$$h = \frac{at^2}{2}, \tag{7.12}$$

де a – прискорення вантажу, який падає.

Таке саме прискорення a мають всі точки нитки, й таким саим буде тангенціальне прискорення точок поверхні шківа. Неважко довести, що кутове прискорення ε однакове для всієї системи, яка обертається, і його можна описати у такому випадку формулою:

$$\varepsilon = \frac{2h}{rt^2}, \tag{7.13}$$

де r – радіус шківа.

2. Визначення обертального моменту.

Сила натягу нитки T направлена за дотичною до поверхні шківа і тому її момент

$$M = Tr. \tag{7.14}$$

На вантаж, що падає, діють дві сили: сила тяжіння $P = mg$ та натягу нитки T, тому за другим законом Ньютона

$$ma = P - T, \tag{7.15}$$

звідки

$$T = mg - ma, \tag{7.16}$$

де m – маса вантажу.

Підставляючи рівняння (7.16) у співвідношення (7.14) і враховуючи рівняння (7.12), отримуємо

$$M = m \cdot r \cdot \left(g - \frac{2h}{t^2} \right). \tag{7.17}$$

3. Визначення моменту інерції системи, що обертається відносно осі обертання.

Момент інерції системи складається з моменту інерції хрестовини I_0 та моменту інерції чотирьох важків. Момент інерції кожного з важків визначається за формулою

$$I = m_i R_i^2, \tag{7.18}$$

де m_i – маса важка,

R_i – відстань від його центру тяжіння до вісі обертання.

Момент інерції приладу визначається за формулою

$$I = I_0 + \sum_{i=1}^{4} m_i R_i^2, \tag{7.19}$$

Використовуючи співвідношення (7.10) та (7.19), можна визначити момент інерції хрестовини I_0:

$$I_0 = \frac{M}{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{4} m_i R_i^2, \tag{7.20}$$

Даний спосіб може використовуватись на практиці для визначення моменту інерції твердих тіл складної геометричної форми. Наприклад, різних деталей двигунів внутрішнього згоряння, що обертаються, парових турбін, електродвигунів тощо.

Порядок виконання роботи

1. Закріпити важки L на стержнях на однаковій відстані від вісі обертання (біля середини кожного стержня хрестовини).
2. Прикріпити до нитки вантаж m_1 і намотати нитку на один зі шківів.

3. Відпустити хрестовину і в момент початку руху системи увімкнути секундомір. Зупинити його в момент, коли вантаж m_1 пройде повз мітку, розташовану на відстані 1-1,5 м від вісі обертання приладу. Вимірювання повторити 5 разів і знайти середнє значення часу.

4. Виміряти масштабною лінійкою висоту падіння вантажу h.

5. Заміряти діаметр шківа в кількох місцях і знайти його середнє арифметичне значення.

6. Всі значення величин занести в таблицю і обчислити кутове прискорення ε_1 за формулою (7.13).

7. Прикріпити до нитки вантаж m_2 і повторити вимірювання, вказані в пункті 3.

8. Підставити отримані значення h, r і t у формулу (7.17) і визначити M_1 і M_2.

9. Порівняти відношення $\frac{M_1}{\varepsilon_1}$ та $\frac{M_2}{\varepsilon_2}$.

10. Визначити відстань R_i від центру тяжіння важків до вісі обертання. Для цього виміряти масштабною лінійкою відстань між зовнішніми кінцями важків, закріплених на двох стержнях, розташованих на одній прямій, яка проходить через вісь хрестовини, і тоді

$$R_i = \frac{L_i - d}{2}, \tag{7.20}$$

де d – довжина важка.

11. Підставляючи у формулу (7.20) значення $\frac{M}{\varepsilon}$, m_i та виміряне значення R_i визначити момент інерції хрестовини для першого розташування важків.

12. Вимірювання і розрахунки, які проведені в пунктах 2-11, повторити для того випадку, коли важки L закріплені біля кінців стержнів.

13. Знайти відношення $\frac{M_1}{\varepsilon_1}$, $\frac{M_2}{\varepsilon_2}$, перевірити рівняння (7.11) і визначити момент інерції хрестовини I за формулою (7.20). Отримані результати занести в таблицю 7.1.

14. Не змінюючи маси вантажу, прикріпленого до нитки, провести вимірювання при різних значеннях радіусу (r_1, r_2) шківа. Для цього виконати пункти 1-6, 8-11. Отримані результати занести в таблицю 7.2.

Таблиця 7.1

Вага	№	h	t	r	R_i	r_i	ε	M	M/ε	I_0
m_1=										
m_2=										

Таблиця 7.2

Радіус шківа	№	h	t	m	R_i	m_i	ε	M	M/ε	I_0
r_1=										
r_2=										

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається моментом сили?
2. Яка розмірність одиниці його виміру?
3. Як визначити напрям вектора моменту сили?
4. Дайте визначення моменту імпульсу.
5. Що називається моментом інерції тіла?
6. Запишіть основний закон динаміки обертального руху.

Лабораторна робота 1-08

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ТІЛА НА ТРИФІЛЯРНОМУ ПІДВІСІ

Мета роботи:

Навчитися вимірювати моменти інерції тіл за допомогою трифілярного підвісу

Прилади та матеріали:

1. трифілярний підвіс;
2. набір досліджуваних тіл;
3. секундомір;
4. лінійка;
5. штангенциркуль.

Теоретичні відомості.

В даній роботі для вимірювання моменту інерції тіла використовується трифілярний підвіс, що зображений на рис. 8.1. Трифілярний підвіс складається з трьох металічних ниток, розміщених симетрично у вершинах рівностороннього трикутника і рівномірно навантажених вагою диска *Д*. На даний диск розміщують тіло, для якого визначається момент інерції, орієнтуючи його таким чином, щоб рівномірний натяг ниток не порушувався.

Якщо диск повернути на невеликий кут навколо вертикальної вісі, що проходить через його центр, то всі три нитки приймають похиле положення, і центр тяжіння підіймається. Внаслідок чого прибор починає коливання навколо вертикальної вісі, період яких залежить від моменту інерції підвішеної системи.

Верхні кінці ниток прикріплені до невеликої горизонтальної шайби *C*. Відхилення диску *Д* відраховуються візуально. Позначимо довжину ниток через l і відстані їх кріплення до центра тяжіння диска *Д* та шайби *C* відповідно через R і r. При повороті диску на деякий кут α_0 відносно верхньої шайби, точка кріплення нитки B переходить в положення B_1 і диск піднімається на деяку висоту h, яка дорівнює:

$$h = OO_1 = AC - A_1C. \quad (8.1)$$

Даний вираз можна записати у вигляді:

$$h = \frac{AC^2 - A_1C^2}{AC + A_1C} \quad (8.2)$$

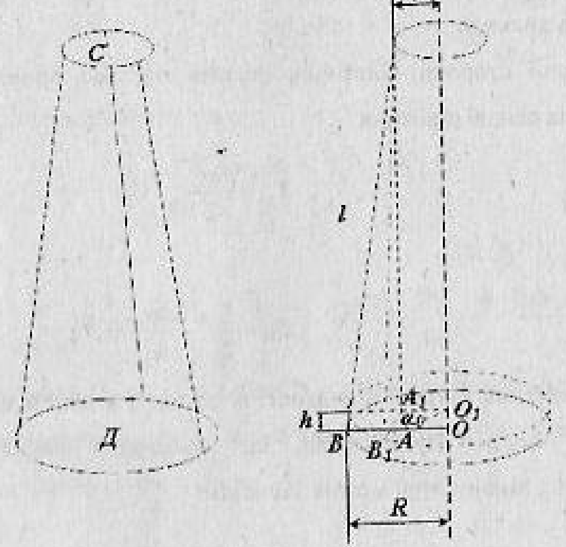


Рис.8.1 – Схема вимірювальної установки

З геометричних даних маємо:

$$AC^2 = BC^2 - AB^2 = l^2 - (R - r)^2 \quad (8.3)$$

$$A_1C^2 = B_1C^2 - A_1B_1^2 = l^2 - \left(R^2 + r^2 - 2rR\cos\alpha_0\right) \quad (8.4)$$

На основі даних рівнянь вираз для h можна привести до такого виду:

$$h = \frac{2rR(1 - \cos\alpha_0)}{AC + A_1C} = \frac{4rR\sin^2\frac{\alpha_0}{2}}{AC + A_1C} \quad (8.5)$$

При великій довжині ниток та малих кутах відхилення диска в даному виразі величини AC та A_1C можна вважати рівними l, а синус кута замінити дугою.

Таким чином, маємо:

$$h = \frac{Rr\alpha_0^2}{2l} \tag{8.6}$$

На основі даного виразу для потенціальної енергії системи при відхиленні на кут α_0 отримуємо:

$$E_p = mg\frac{Rr\alpha_0^2}{2l}, \tag{8.7}$$

де m – маса диска $Д$.

З іншої сторони кінетична енергія під час проходження положення рівноваги на основі рівняння

$$E_к = \frac{I\omega^2}{2} \tag{8.8}$$

дорівнює

$$E_к = \frac{1}{2}I\left(\frac{2\pi\alpha_0}{T}\right)^2, \tag{8.9}$$

причому значення кутової швидкості ω диска $Д$ в даний момент визначається наступним чином. Припустимо, що коливання диска відбуваються по гармонічному закону, тоді можна записати:

$$\alpha = \alpha_0 \sin 2\pi\frac{t}{T} \tag{8.10}$$

де α – кутове зміщення в момент часу t; α_0 – кутова амплітуда.

Кутова швидкість

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi\alpha_0}{T}\cos\frac{2\pi}{T}t \tag{8.11}$$

При проходженні тілом положення рівноваги $\cos\frac{2\pi}{T}t = 1$ та $\omega = \frac{2\pi}{T}\alpha_0$. Нехтуючи силами тертя, з останніх двох рівнянь на основі закону збереження енергії маємо:

$$mg\frac{Rr\alpha_0^2}{2l} = \frac{1}{2}I\left(\frac{2\pi\alpha_0}{T}\right)^2, \tag{8.12}$$

звідки знаходимо

$$I = \frac{T^2}{4\pi^2}\cdot\frac{mgRr}{l} \tag{8.13}$$

Остання формула дозволяє визначити момент інерції диска з тілом, якщо відома геометрія пристрою (величини r, R, l) та маса m. Таким чином можна отримати рівняння для моменту інерції ненагруженого диска:

$$I_0 = \frac{T_0^2}{4\pi^2}\cdot\frac{m_0 gRr}{l}. \tag{8.14}$$

Тоді момент інерції досліджуваного тіла:

$$I_m = I - I_0 = \frac{T^2}{4\pi^2}\cdot\frac{mgRr}{l} - \frac{T_0^2}{4\pi^2}\cdot\frac{m_0 gRr}{l} \tag{8.15}$$

або

$$I_m = \frac{Rr}{4\pi^2 nl}\left((m_0 + m_m)t^2 - m_0 t_0^2\right)\cdot\frac{mgRr}{l} - \frac{T_0^2}{4\pi^2}\cdot\frac{m_0 gRr}{l} \tag{8.16}$$

де m_0 – маса пустого диска Д; $m_т$ – маса тіла; n – кількість коливань; t_0 – час, за який відбулось n коливань пустого диска Д; t – час, за який відбулось n коливань диска Д з досліджуваним тілом.

Порядок виконання роботи.

1. Виміряти відстань від точок кріплення ниток до центрів дисків R та r.
2. Виміряти довжину ниток l за допомогою лінійки.
3. Повернути нижній диск на малий кут α_0 та відрахувати час 50 повних коливань t по секундоміру.
4. Навантажити нижній диск досліджуваним тілом, повернути нижній диск на малий кут α_0 і відрахувати час 50 повних коливань t по секундоміру.
5. Визначити масу досліджуваного тіла правильної геометричної форми за формулою $m = \rho \cdot V$, де ρ – густина матеріалу тіла, V – об'єм тіла. Для сталі $\rho = 7{,}8\cdot 10^3\ кг/м^3$.
6. Масу досліджуваного тіла неправильної геометричної форми визначити шляхом зважування.

7. По формулі (8.16) визначити момент інерції досліджуваного тіла.

8. Визначити момент інерції інших тіл, даних викладачем, у відповідності з пунктами 4-7.

9. Визначити похибку вимірювань ΔI.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається моментом інерції матеріальної точки?
2. Яка розмірність моменту інерції в системі СІ?
3. Що таке момент інерції тіла?
4. Який фізичний зміст моменту інерції тіла?
5. Чому дорівнює кінетична енергія тіла при круговому русі?
6. Як визначити момент інерції тіла відносно осі, що не проходить через центр тяжіння тіла?

Лабораторна робота - № 1-09

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ ОБЕРТАЛЬНИМ МАЯТНИКОМ (МЕТОД БЕСЕЛЯ)

Мета роботи:

1. Визначення прискорення сили тяжіння методом Беселя.

Прилади і обладнання:

1. фізичний маятник;
2. секундомір;
3. масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

Метою даної роботи є визначення прискорення сили тяжіння методом Беселя. Для визначення прискорення сили тяжіння використовують відому формулу, за якою визначається період коливань фізичного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgh}}, \qquad (9.1)$$

де I – момент інерції маятника відносно вісі коливання; m – маса маятника; h – відстань від вісі коливання до центра тяжіння.

Період коливань маятника T можна визначити з великим ступенем точності. Визначення моменту інерції та відстані від осі качання до центру тяжіння пов'язане з деякими труднощами. Тому ці величини виключають з формули.

В даній роботі для визначення прискорення сили тяжіння використовується обертальний маятник, який може здійснювати коливання відносно двох опорних призм. Період коливань маятника можна виміряти за допомогою тягаря (сочевиці), який рухається.

Переміщуючи сочевицю, можна підібрати такі положення, за яких періоди коливань відносно обох опорних призм будуть однакові. Тоді:

$$T = T_1 = T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_1}{mgh_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{I_2}{mgh_2}}, \tag{9.2}$$

де T_1 та T_2 – періоди коливань маятника відносно верхньої та нижньої опорних призм; h_1 та h_2 – відстань від верхньої та нижньої опорних призм до центра тяжіння.

Виразимо значення моментів інерції I_1 та I_2 за теоремою Штейнера:

$$I_1 = I_0 + mh_1^2, \tag{9.3}$$

$$I_2 = I_0 + mh_2^2, \tag{9.4}$$

де I_0 – момент інерції відносно вісі, яка проходить через центр тяжіння і паралельна вісі коливання.

Розв'язавши рівняння (9.2), (9.3), (9.4), знайдемо значення моменту інерції:

$$\sqrt{\frac{I_0 + mh_1^2}{h_1}} = \sqrt{\frac{I_0 + mh_2^2}{h_2}} \Rightarrow \frac{I_0 + mh_1^2}{h_1} = \frac{I_0 + mh_2^2}{h_2},$$

$$I_0h_2 + mh_1^2h_2 = I_0h_1 + mh_2^2h_1 \Rightarrow I_0(h_2 - h_1) = mh_1h_2(h_2 - h_1),$$

$$I_0 = mh_1h_2. \tag{9.5}$$

Підставляємо значення I_0 у формулу (9.2):

$$T = T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + mh_1^2}{mgh_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{mh_1(h_1 + h_2)}{mgh_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{h_1 + h_2}{g}}. \tag{9.6}$$

З формули знаходимо значення прискорення вільного падіння g:

$$g = \frac{4\pi^2(h_1 + h_2)}{T^2}, \tag{9.7}$$

де T – період коливань, який можна отримати, якщо підвісити маятник на будь якій (верхній або нижній) призмі. Відстань між опорними ребрами призм в даному випадку буде дорівнювати приведеній довжині фізичного маятника:

$$L_{np} = h_1 + h_2. \tag{9.8}$$

У формулу (9.7) підставляємо L_{np}:

$$g = \frac{4\pi^2 L_{np}}{T^2}. \tag{9.9}$$

Опис установки.

Обертальний маятник – це окремий випадок фізичного маятника. Він складається з металевого стержня, довжина якого більша 1 м, на поверхні стержня нанесені міліметрові поділки.

У даній роботі застосовується обертальний маятник, який зображено на рис.9.1. На стержні опорні призми $Б_1$, $Б_2$ жорстко закріплені й не можуть переміщуватися.

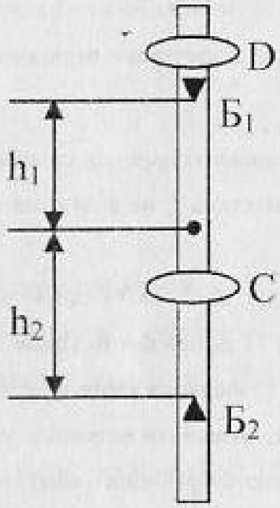


Рис.9.1 – Конструкція обертального маятника

Сочевиця Д знаходиться на кінці стержня, а не між призмами, і може переміщуватись по шкалі та закріплятися у необхідному положенні. Відстань між призмами незмінна. Сочевиця С жорстко закріплена.

Порядок виконання роботи

1. Встановити сочевицю Д у початкове положення, яке буде вказане викладачем.
2. Використовуючи секундомір, визначити час 20 повних коливань маятника, який підвішений на опорних призмах $Б_1$ і $Б_2$ по черзі. Кожне вимірювання провести 3 рази. Відхилення маятника не повинне бути більшим 5°.

3. Підрахувати періоди коливань обертального маятника відносно опорних призм $Б_1$ та $Б_2$ за формулами:

$$T_1=\frac{t_1}{n},\ T_1'=\frac{t_1'}{n} \tag{9.10}$$

де t_1 – час 20-ти повних коливань відносно опорної призми $Б_1$; t_1' – час 20-ти повних коливань відносно опорної призми $Б_2$.

4. Перемістити сочевицю Д у нові положення, які на 2...3 см відрізняються від попереднього.

5. Повторити вимірювання, підрахувати періоди коливань T_2 і T_2'; T_3 і T_3'; T_4 і T_4'; T_5 і T_5'.

6. Накреслити графіки залежності періодів коливань від положення сочевиці Д. На осі абсцис відкласти відстань l, на якій була сочевиця Д, на осі ординат – періоди коливань.

7. На графіку провести дві лінії, які з'єднують періоди коливань маятника відносно призми $Б_1$ (лінія 1) та призми $Б_2$ (лінія 2). Точка перетину ліній 1 і 2 визначає період коливань T, значення якого підставляємо у формулу (9.9).

8. Використовуючи графік, визначити величину періоду коливань T.

9. Виміряти приведену довжину фізичного маятника $L_{пр}$.

10. За формулою (9.9) підрахувати величину прискорення вільного падіння g.

Контрольні запитання і завдання

1. Записати формулу періоду коливань фізичного маятника.
2. Що називається фізичним маятником?
3. Що таке приведена довжина фізичного маятника?
4. Як залежить прискорення вільного падіння від географічної широти і відстані до центру Землі?

Лабораторна робота № 1-10

МАТЕМАТИЧНИЙ ТА ФІЗИЧНИЙ МАЯТНИКИ

Мета роботи:

1. Визначити прискорення сили тяжіння та момент інерції за допомогою математичного та фізичного маятників.

Прилади та обладнання:

1. математичний маятник;
2. фізичний маятник;
3. секундомір;
4. трикутник.

Теоретичні відомості

В фізиці під маятником розуміють тверде тіло, яке здійснює під впливом сили тяжіння коливання навколо нерухомої вісі. Відрізняють фізичні та математичні маятники.

Математичним маятником називається ідеалізована система, яка складається з невагомої та нерозтяжної нитки, на якій підвішено масу, що зосереджена в одній точці.

Період коливання математичного маятника

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \tag{10.1}$$

де l – довжина маятника; g – прискорення сили тяжіння.

Якщо тіло, яке коливається, не можна представити як матеріальну точку, то маятник називається фізичним. *Фізичний маятник* – це будь-яке тіло, що коливається під дією сили тяжіння відносно вісі, яка не проходить крізь її центр тяжіння.

Період коливання фізичного маятника визначається за формулою:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgx}}, \qquad (10.2)$$

де I – момент інерції тіла відносно вісі обертання; m – маса тіла; x – відстань від вісі обертання до центру тяжіння тіла.

Порівнюючи формули (10.1) та (10.2), знаходимо, що математичний маятник довжиною

$$l = \frac{I}{mx} \qquad (10.3)$$

має такий період коливання, як і даний фізичний маятник.

Таким чином, *приведена довжина* фізичного маятника – це довжина такого математичного маятника, період коливання якого дорівнює періоду коливання даного фізичного маятника.

Як видно з визначення, математичний маятник – це ідеалізована система. Проте достатньо добрим наближенням до математичного маятника може бути невелика важка кулька, підвішена на довгій тонкій нитці.

Знаючи довжину нитки l та вимірявши період коливання маятника T, можна з формули (10.1) визначити прискорення сили тяжіння g:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \qquad (10.4)$$

Момент інерції фізичного маятника відносно вісі обертання можна визначити з формули періоду коливання фізичного маятника, визначивши відстань від вісі обертання до центру тяжіння маятника з формули (10.2):

$$I = \frac{T^2 mgx}{4\pi^2}. \qquad (10.5)$$

Опис вимірювальної установки

Установка для визначення прискорення сили тяжіння g за допомогою математичного маятника показана на рис.10.1 На масивній основі 1 закріплено стійку 2 зі шкалою. В верхній частині стійки розміщується кронштейн 3, до кінця якого прив'язана нитка 4 з металевою кулькою 5. Нульова відмітка шкали

знаходиться на одному рівні з кінцем кронштейна 3 (з точкою підвісу нитки). Таким чином, довжину нитки можна визначити безпосередньо по шкалі. Намотуючи нитку на кронштейн, можна зменшувати довжину маятника.

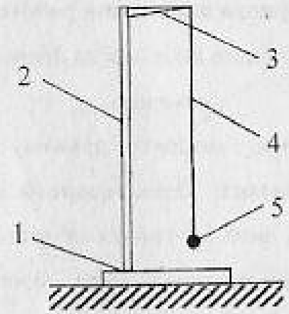


Рис.10.1 – Математичний маятник

Фізичний маятник, момент інерції якого треба визначити в даній лабораторній роботі, являє собою сталевий стержень 1 (рис.10.2) довжиною l і сталим по довжині поперечним перерізом S.

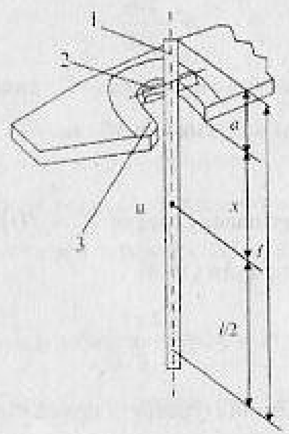


Рис.10.2 – Фізичний маятник

Вісь 2, відносно якої визначається момент інерції маятника, перпендикулярна стержню і розміщена на деякій відстані x від центру тяжіння стержня. Маятник має можливість робити коливні рухи в вертикальній площині під дією сили тяжіння відносно осі 2, яка лежить на призматичній опорі.

Порядок виконання роботи

1. Визначення прискорення сили тяжіння за допомогою математичного маятника

1. Не допускаючи паралакса, виміряти довжину маятника. Вимірювання проводяться в такій послідовності. Один із катетів прямокутного трикутника притискують до шкали так, щоб другий катет став на рівні центру тяжіння кульки. Значення довжини маятника буде відповідне значенню шкали установки в місці знаходження вершини прямого кута трикутника.

2. Вивести маятник із положення рівноваги (амплітуда коливання маятника повинна бути малою в порівнянні з її довжиною.

3. За допомогою секундоміра визначити час t п'ятдесяти коливань маятника. Обчислити період коливання

$$T=\frac{t}{50}.$$

4. Дослід проводять до чотирьох значень T, зменшуючи або збільшуючи кожного разу довжину нитки маятника на 10 см.

5. Обчислюють T^2.

6. Будують на міліметровому папері графік $T^2 = f(l)$. Графік будується в такій послідовності. Як видно з формули (10.4) ,

$$T^2=\left(\frac{4\pi^2}{g}\right)\cdot l,$$

тобто залежність $T^2 = f(l)$ лінійна (графік – пряма лінія).

По п'яти точках, отриманих експериментально, проводиться пряма лінія таким чином, щоб кількість точок з двох сторін від прямої була приблизно однакова (рис.10.3).

7. Визначити $tg\alpha$ – тангенс кута нахилу прямої $T^2 = f(l)$. Слід мати на увазі, що $tg\alpha$ – це не геометричний тангенс кута, а "фізичний".

На прямій беруть дві точки 1 та 2, тоді

$$tg\alpha=\frac{\Delta T^2}{\Delta l}=\frac{T_2^2-T_1^2}{l_2-l_1}.$$

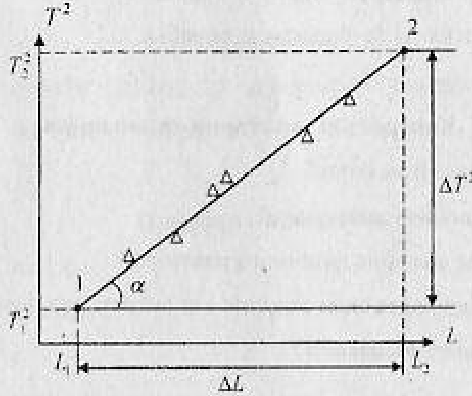


Рис.10.3 – Графік залежності $T^2 = f(l)$

8. Обчислити g, використовуючи формулу (10.4):

$$g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}=\frac{4\pi^2}{\left(T^2/l\right)}=\frac{4\pi^2}{tg\alpha}.$$

2. Визначення моменту інерції фізичного маятника

1. Виміряти за допомогою лінійки довжину l фізичного маятника (стержня) з точністю до 0,5 мм. Значення маси стержня m вказано на лабораторній установці.

2. Визначити x – відстань від вісі обертання до центру тяжіння стержня. З рис.10.2 видно, що $x=\frac{l}{2}-a$, де a – відстань від вісі обертання до кінця стержня.

3. Встановити маятник на опорі. Вивести його з положення рівноваги. Кут відхилення маятника від положення рівноваги не повинен перевищувати 5...7°.

4. Користуючись секундоміром, визначити час t_i п'ятдесяти коливань маятника. Повторити дані вимірювання 3 рази. Обчислити середнє значення

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}.$$

5. Визначити період коливань T.

6. Обчислити момент інерції фізичного маятника I.

7. Визначити абсолютну ΔI та відносну σ похибки.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке математичний маятник?

2. Щоназначається фізичним маятником?

3. Що таке приведена довжина фізичного маятника?

4. Як залежить прискорення сили тяжіння від висоти над поверхнею Землі, від географічних координат місцевості?

Лабораторна робота № 1-11

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Мета роботи:

Експериментальне визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом кульки, яка падає у цій рідині.

Прилади і матеріали:

1. прилад Стокса;
2. свинцеві кульки;
3. мікрометр;
4. масштабна лінійка;
5. секундомір.

Теоретичні відомості

Метод Стокса

Якщо у рідині різні шари рухаються з різною швидкістю, то між ними виникає сила внутрішнього тертя, пропорційна площі поверхні шару та градієнту швидкості:

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} \cdot S, \qquad (11.1)$$

де η – коефіцієнт пропорційності, який характеризує властивості цієї рідини і називається коефіцієнтом внутрішнього тертя; $\frac{dv}{dz}$ – градієнт швидкості; S – площа дотичних шарів.

Коли маленька кулька повільно рухається у рідині, вона зустрічає опір, який обумовлений в'язкістю рідини. Під час руху кульки шар рідини, який дотичний до її поверхні, прилипає до кульки й рухається з її швидкістю. Найближчі суміжні шари рідини також приводяться до руху. Швидкість, яку вони отримують, тим менша, чим далі вони знаходяться від кульки. Стокс теоретично показав, що під час падіння кульки у безмежній рідині, коли не утворюються ніякі завихрення, сила тертя, яка діє на неї, визначається за формулою:

$$F = 6\pi\eta r v \qquad (11.2)$$

де v – швидкість падіння кульки (ця швидкість повинна бути малою); r – радіус кульки ($r << R$); R – радіус сосуду, у якому падає кулька.

На кульку, яка падає у в'язкій рідині, діють три сили:

1. $\bar{P}$ – сила тяжіння

$$\bar{P} = mg \qquad (11.3)$$

де m – маса кульки, g – прискорення вільного падіння.

Маса кульки m визначається за формулою :

$$m = \rho \cdot V \qquad (11.4)$$

де ρ – густина кульки, V – об'єм, який дорівнює:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \qquad (11.5)$$

Підставляючи у формулу (11.3) значення величин, знаходимо силу тяжіння:

$$\bar{P} = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{g}. \qquad (11.6)$$

2. $\bar{F}_c$ – виштовхувальна сила, яка визначається за законом Архімеда:

$$\bar{F}_e = m_1 \cdot \bar{g} = \rho_1 \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{g} \qquad (11.7)$$

де ρ_1 – густина рідини, в'язкість якої визначається.

3. $\bar{F}_{m}$ – сила опору руху, яка обумовлена силами внутрішнього тертя. Ця сила визначається за формулою Стокса.

При падінні кульки сила тяжіння направлена вниз, виштовхувальна сила та сила тертя направлені вгору. Під час руху кульки швидкість її збільшується, а значить, росте і сила внутрішнього тертя. За деякого значення швидкості кульки сили, які діють на неї, урівноважуються. Рух кульки при цьому буде

прямолінійним та рівномірним. Кулька буде рухатись по інерції зі сталою швидкістю v. У даному випадку маємо:

$$\bar{P} - \bar{F}_e - \bar{F}_m = 0 \qquad (11.8)$$

У формулу (11.8) підставляємо значення величин з формул (11.2), (11.6) та (11.7):

$$\rho\frac{4}{3}\pi r^3 g - \rho_1\frac{4}{3}\pi r^3 g - 6\pi r v \eta = 0 \qquad (11.9)$$

Розв'язуючи рівняння (11.9) відносно коефіцієнта внутрішнього тертя, отримуємо:

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_1)}{9v} g r^2, \qquad (11.10)$$

v – швидкість руху кульки, яку за сталого руху знаходимо за формулою

$$v = \frac{l}{t}, \qquad (11.11)$$

де l – шлях у в'язкій рідині, який проходить кулька; t – час руху кульки.

Здійснити падіння кульки у необмеженій рідині практично неможливо, оскільки рідина завжди знаходиться у якомусь сосуді, який має реальні стінки. Врахування стінок під час руху кульки вздовж осі циліндричного посуду призводить до такого виразу для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho - \rho_1)}{v\left(l + 2{,}4\frac{r}{R}\right)}, \qquad (11.12)$$

де R – радіус посуду, у якому рухається кулька.

Одиниця в'язкості – паскаль-секунда ($Па \cdot с$). Чим більша в'язкість, тим рідина більше відрізняється від ідеальної, тим більші сили внутрішнього тертя у ній виникають. В'язкість залежить від температури. При підвищеній температурі коефіцієнт в'язкості зменшується. Особливо залежить від температури в'язкості мастил. Наприклад, в'язкість касторової олії в інтервалі 18...40°С падає у чотири рази. Тому, записуючи значення коефіцієнта внутрішнього тертя, треба вказувати температуру рідини.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою мікрометра виміряти діаметр кульки d у трьох місцях, взяти середнє значення. Записати значення радіуса $r = d/2$. Результати вимірів записати у таблицю за зразком:

Таблиця 11.1

	ρ, кг/м^3	ρ_1, кг/м^3	r, м	R, м	l, м	v, м/с	T, К	η, Па·с	η_1, Па·с
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									

2. Записати температуру рідини, вважаючи, що вона дорівнює кімнатній температурі.

3. Масштабною лінійкою виміряти відстань L між мітками декілька разів і взяти середнє значення.

4. Опустити кульку у рідину ближче до осі циліндричної трубки. Око спостерігача має знаходитися проти верхньої мітки так, щоб вони зливалися в одну лінію. В момент перетину кулькою верхньої мітки слід увімкнути секундомір, при проходженні нижньої – вимкнути його. Відлік за секундоміром дає час t проходження кулькою шляху l.

5. Підрахувати швидкість кульки v за формулою (11.11).

6. Дослід повторити 3…5 разів.

7. Занести до таблиці значення g, ρ, ρ_1, які є сталими.

8. Виміряти радіус трубки R.

9. За формулою (11.10) підрахувати значення коефіцієнта в'язкості для кожного досліду η.

10. Підрахувати значення коефіцієнта в'язкості η_1 за формулою (11.12).

11. Підрахувати абсолютну та відносну похибки.

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке коефіцієнт внутрішнього тертя? Який його фізичний зміст?
2. Від чого залежить коефіцієнт в'язкості?
3. Які сили діють на кульку під час її руху у в'язкій рідині?
4. Виведіть формулу (11.10).
5. Які явища належать до явищ переносу?
6. Внаслідок чого виникає у рідині тертя?
7. Яке співвідношення є між коефіцієнтами внутрішнього тертя та дифузії?
8. Як залежить коефіцієнт внутрішнього тертя від температури?
9. Чому відлік часу починають не від поверхні рідини?
10. Як змінюється швидкість руху кульки при збільшенні її діаметру?

Лабораторна робота № 1-12

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ

Мета роботи:

Навчитися визначити коефіцієнт в'язкості рідини методом Пуазейля.

Прилади та матеріали:

1. установка для вимірювання в'язкості води;
2. штангенциркуль;
3. мікроскоп.

Теоретичні відомості:

Тверде тіло, що рухається в рідині або газі, відчуває опір своєму руху. Рухаючись в рідкому або газовому середовищі, тіло поступово залучає до свого руху шари середовища, які раніше покоїлися. Швидкості шарів спадають по мірі віддалення від тіла.

Якщо рідина або газ течуть по трубі, швидкості в різних точках труби також виявляються різними.

Перелічені явища пояснюються однією і тією ж причиною.

Між рухомими суміжними шарами рідини або газу, що рухаються з різною швидкістю, діють дотичні сили. Їх називають силами внутрішнього тертя або в'язкості.

Сили внутрішнього тертя відіграють істотну роль при протіканні рідин або газів по трубах а також під час руху в них твердих тіл. До рухомого тіла в рідині або газі прилипає тонкий шар даної речовини, який рухається разом з ним. Наявність взаємодії між шарами залучає до руху все більш віддалені шари. Одночасно ці дальні шари гальмують рух тіла (приведене пояснення опору руху твердого тіла справедливе тільки тоді, коли не утворюються вихори, тобто при малих швидкостях руху і обтічній формі тіла.

При перетіканні рідини по трубі її тонкий шар, безпосередньо прилеглий до стінок труби – також нерухомий, начебто прилипає до стінок. Унаслідок наявності знутрішнього тертя, він гальмує рух сусіднього з ним шару, а завдяки взаємодії наступних шарів, це гальмування передається далі. В результаті швидкість течії рідини уздовж осі труби виявляється найбільшою і поступово зменшується до стінок.

Сили взаємодії між двома шарами рідини, тобто сили внутрішнього тертя, характеризують наступним чином.

Нехай A та B (рис.12.1) – два близько розташованих шари рідини або газу, що рухаються в напрямку осі x зі швидкостями u_1 та u_2. Відстань між ними Δy. Взаємодія цих шарів зводиться до того, що шар A, який рухається з більшою швидкістю захоплює більш повільний шар B. Останній гальмує рух шару A.

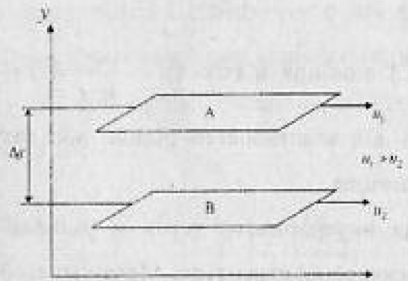


Рис.12.1 – Рух шарів рідини

Сила, що діє з боку одного шару на інший, тим більша, чим ближче розташовані шари і чим більша площа їх зіткнення, а також чим сильніше відрізняються їх швидкості. Тобто сила внутрішнього тертя f прямо пропорційна площі дотичних шарів S, їх відносній швидкості $\Delta u = u_1 - u_2$ і обернено пропорційна відстані між ними Δy:

$$f = \eta \frac{\Delta u}{\Delta y} S \qquad (12.1)$$

Відношення $\frac{\Delta u}{\Delta y}$ при $\Delta y \to 0$ дорівнює похідній: $\lim\limits_{\Delta y\to 0}\frac{\Delta u}{\Delta y}=\frac{du}{dy}$. Воно показує, як швидко змінюється швидкість шарів середовища з відстанню. Дане відношення називають градієнтом швидкості.

Коефіцієнт пропорційності η називають коефіцієнтом в'язкості або коефіцієнтом внутрішнього тертя. Чисельно він рівний силі внутрішнього тертя, що виникає між двома шарами рідини або газу з одиничною площею, якщо градієнт швидкості також рівний одиниці. У різних речовинах при цьому виникають різні по величині сили, отже, різні речовини мають різні коефіцієнти в'язкості, тобто різну в'язкість.

Розмірність коефіцієнта в'язкості може бути отримана з формули 12.1):

$$[\eta]=\frac{[f]}{\left[\frac{\Delta u}{\Delta y}\right][S]}=\frac{MLT^{-2}}{LT^{-1}L^{-1}L^{2}}=\frac{M}{LT} \qquad (12.2)$$

У системі СІ одиниця в'язкості – $\frac{кг}{м\cdot с}=Па\cdot с$. Величина коефіцієнта в'язкості залежить від властивостей рідини або газу і змінюється зі зміною температури середовища.

Природа сил внутрішнього тертя в рідинах і газах різна внаслідок відмінності їх молекулярної структури. Механізм виникнення сил внутрішнього тертя в газах можна пояснити таким чином .

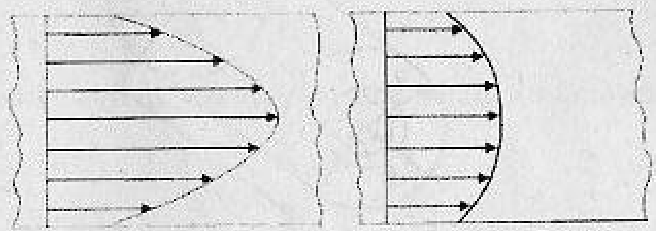
Звернемося знову до рис.12.1 . Нехай А і В два шари газу, які рухаються з різними швидкостями u_1 і u_2, кожна молекула в обох шарах бере участь одночасно в двох рухах – направленому і хаотичному тепловому. Завдяки безладності теплового руху, між шарами газу здійснюється обмін молекулами. Переходячи зі швидшого в повільніший шар, молекули газу переносять з собою більшу кількість направленого руху $p_1 = mu_1$, яка, завдяки зіткненням, перерозподіляється між молекулами повільнішого шару, внаслідок чого останній прискорюється. Потрапляючи з повільнішого шару в швидший, молекули приносять меншу кількість руху $p_2 = mu_2$, що уповільнює його.

Чим вище температура газу, тим більша швидкість теплового руху його молекул, тим інтенсивніше йде вирівнювання швидкостей рухомих шарів газу, тим більше буде його коефіцієнт в'язкості.

Внутрішнє тертя в рідинах обумовлене взаємодією між молекулами дотичних шарів і лише в деякій мірі описаним вище процесом. З підвищенням температури рідини збільшується рухливість її молекул, сили взаємодії менше позначаються на русі шарів. З підвищенням температури в'язкість рідин зменшується.

Коефіцієнт в'язкості для даної рідини або газу, що характеризує величину сил внутрішнього тертя в них, може бути визначений різними способами. У даній роботі коефіцієнт в'язкості вимірюється методом, заснованим на законах плину рідини по трубі.

Характер плину рідини або газу по трубі залежить від швидкості потоку. При невеликих швидкостях шар, безпосередньо прилеглий до стінки труби, – нерухомий, решта шарів рідини рухається один відносно іншого і швидкості їх збільшуються у напрямку до осі труби. Розподіл швидкостей в деякому перетині труби зображений на рис.12.2.



а) б)

Рис.12.2 – Розподіл швидкостей в перетині труби при малих (а) та великих (б) швидкостях плину.

Стрілками позначені величини та напрямки швидкостей в потоці на різних відстанях від стінки. Протікання рідини із сталим розподілом швидкостей уздовж труби називається *ламінарним*. Із збільшенням швидкості потоку шарувата течія порушується, частинки рідини переходять з одного шару в іншій, розподіл швидкостей в потоці перестає бути стаціонарним, виникають завихрення. Такий рух називається *турбулентним*, вихровим. Швидкість, при якій відбувається перехід ламінарної течії в турбулентну залежить від розмірів труби, форми її перетину і стану стінок, а також від властивостей рідини – густини, коефіцієнта в'язкості.

Пуазейлем було показано, що об'єм рідини (або газу) V, що протікає через трубу за ламінарної течії за деякий час τ, дорівнює:

$$V = \frac{\pi R^4 (p_2 - p_1)\tau}{8\eta l} \qquad (12.3)$$

де R – радіус труби, l – її довжина, η – коефіцієнт в'язкості рідини, p_2-p_1 – різниця тиску на кінцях труби.

Формула Пуазейля може бути отримана наступним чином.

Розглянемо сталий плин рідини по трубі радіусом R і довжиною l. Якщо швидкість потоку в кожній його точці не змінюється з часом, то це означає, що сума сил, що діють на будь-який об'єм рідини дорівнює нулю.

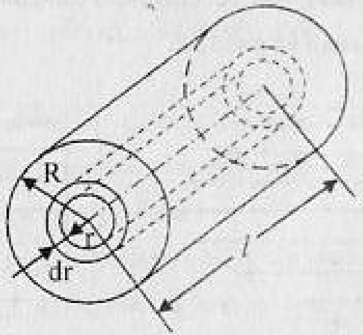


Рис.12.3 – Елемент об'єму рідини

Знайдемо розподіл швидкостей в потоці в залежності від відстані до осі труби. Для цього виділимо із загального об'єму рідини циліндр радіусом r (рис.12.3). На одиницю площі його бокової поверхні діє сила в'язкості:

$$f_2 = \eta \frac{dv}{dr}, \qquad (12.4)$$

а на всю поверхню сила:

$$f_{mp} = 2\pi r l \eta \frac{dv}{dr} \qquad (12.5)$$

Оскільки рух відбувається з постійною швидкістю, сила тертя повинна врівноважувати різницю сил тиску p_2-p_1 на торцях циліндра, отже:

$$-2\pi r l \eta \frac{dv}{dr} = (p_2 - p_1)\pi r^2 \qquad (12.6)$$

Знак мінус пояснюється тим, що сила тертя направлена у бік, протилежний силі тиску. З (12.6) виражаємо dv:

$$dv = -\frac{(p_2 - p_1) r dr}{2\eta l}. \qquad (12.7)$$

Проінтегрувавши даний вираз отримаємо:

$$v_2 = -\frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \cdot r^2 + c \qquad (12.8)$$

Постійну інтегрування c визначимо з граничних умов: біля стінок труби, де $r=R$, $v=0$ тобто:

$$0 = -\frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \cdot R^2 + c. \qquad (12.9)$$

Звідси:

$$c = \frac{p_2 - p_1}{4\eta c} \cdot R^2 \qquad (12.10)$$

Підставивши c в (12.8), знайдемо швидкість потоку v в будь-якій точці перетину труби:

$$v_2 = \frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \cdot (R^2 - r^2). \qquad (12.11)$$

Підрахуємо об'єм рідини, що протікає через усі перетини труби за час τ. Для цього розіб'ємо його на кільця малої товщини dr, так, що швидкості уздовж всього кільця можна вважати однаковими. Виділимо одне з цих кілець радіусу r і товщиною dr. Площа такого кільця дорівнює:

$$dS = 2\pi r dr. \qquad (12.12)$$

За час τ секунд через нього протече об'єм рідини, що дорівнює:

$$dv = dS \cdot v_2 \cdot \tau \qquad (12.13)$$

де v_2 – швидкість потоку на відстані r від осі.

Через весь перетин труби радіусу R протече об'єм рідини V рівний:

$$V = \int dV = \int_0^R 2\pi r v_2 \tau dr \tag{12.14}$$

Підставивши значення швидкості (12.11) і проінтегрувавши, отримаємо:

$$V = \int_0^R 2\pi r \frac{p_2 - p_1}{4\eta l}(R^2 - r^2)\tau dr = \frac{p_2 - p_1}{l} \cdot \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \tau \tag{12.15}$$

Вимірявши об'єм V рідини, що протекла, і знаючи різницю тиску на кінцях труби та її розміри – довжину l і радіус R, можна обчислити коефіцієнт в'язкості η з (12.15):

$$\eta = \frac{(p_2 - p_1)\pi R^4}{8Vl} \cdot \tau \tag{12.16}$$

Описаний метод визначення коефіцієнта в'язкості по кількості рідини або газу, що протекли крізь трубу, є одним з найбільш поширених методів.

Порядок виконання роботи

Вимірювання коефіцієнту в'язкості води

В даній роботі необхідно виміряти коефіцієнт в'язкості води за кімнатної температури. Для цього використовують установку, зображену на рис.12.4.

Т-U-подібна трубка з нерівними колінами закріплена на штативі D. Один її кінець має кран П, інший – закритий пробкою, крізь яку пропущений капіляр К. Капіляр занурений в ємність А з водою. Ємність В служить термостатом. Вістря О дозволяє фіксувати рівень води в ємності А.

Дослід здійснюється наступним чином.

Знімають трубку Т з штатива Д, заповнюють її водою так, щоб в ній не залишалися бульбашки повітря. Після цього її знову закріплюють на штативі. Кінець капіляра К повинен бути занурений у воду, що заповнює ємність А, а вістря О торкатися поверхні води.

Відкривають кран П, дають можливість деякому об'єму води витекти в стакан С. Об'єм води, що витекла, визначають зважуванням: знаходять вагу

порожнього стакана і стакана з водою. Об'єм V буде дорівнювати різниці результатів зважування m_1-m_2 поділених на густину води.

Для правильного визначення об'єму, слід, відкривши кран, почекати, поки не витече декілька крапель, а потім, підставивши стакан С, одночасно включити секундомір для вимірювання часу τ.

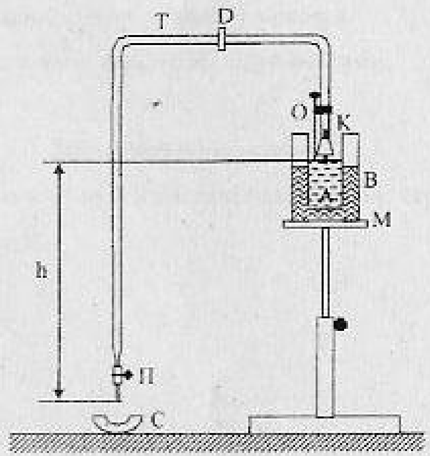


Рис.12.4 – Установка для вимірювання коефіцієнта в'язкості води

Тиск, під яким тече вода, дорівнює гідростатичному тиску стовпа води h між кінцем трубки Т і поверхнею води в ємності А:

$$p_2 - p_1 = \rho g h, \tag{12.17}$$

де ρ – густина води, g – прискорення сили тяжіння.

Довжину капіляра вимірюють штангенциркулем, радіус його – за допомогою окулярної шкали мікроскопа. Отримані результати вимірювань підставляють у формулу (12.16) і обчислюють η. Знайдене значення коефіцієнта в'язкості відповідає температурі води в ємності А. Її вимірюють, зануривши термометр в стакан В.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке коефіцієнт внутрішнього тертя? Який його фізичний зміст?
2. Від чого залежить коефіцієнт в'язкості?
3. Поясніть залежність коефіцієнту в'язкості в рідині та в газі від температури?
4. Що таке ламінарна та турбулентна течії? Поясніть причини їх виникнення.
5. Виведіть формулу Пуазейля.

Лабораторна робота № 1-13

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ ТА ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ

Мета роботи:

1. Повторити основні поняття МКТ.
2. Визначити довжину вільного пробігу молекул.
3. Визначити ефективний діаметр молекул поверхні.

Прилади і обладнання:

1. посудина з краном в нижній частині та капіляром, який проходить крізь пробку у верхньому отворі;
2. мензурка;
3. секундомір;
4. термометр.

Теоретичні відомості

Молекулярно-кінетична теорія встановлює зв'язок між коефіцієнтом внутрішнього тертя ідеального газу η, середньою довжиною вільного пробігу молекули λ і середньою арифметичною швидкістю v їх переміщення у вигляді

$$\eta = \frac{1}{3}\rho\lambda v, \qquad (13.1)$$

де ρ – густина газу.

Більш детальний розгляд даного зв'язку з урахуванням розподілу молекул за швидкостями дає таку ж формулу, але вже з іншим числовим коефіцієнтом:

$$\eta = \frac{1}{2}\rho\lambda v. \qquad (13.2)$$

Замінимо v та ρ на їх значення з кінетичної теорії та отримаємо:

$$\lambda = \frac{\eta}{\rho}\sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}, \qquad (13.3)$$

де T – абсолютна температура; R – стала газів; M – молекулярна маса газів.

Всі фізичні величини, зокрема η, постійні або легко вимірюються, тому експериментально вимірюючи η, легко підрахувати потім і λ за формулою (13.3).

Для вимірювання коефіцієнту внутрішнього тертя можна скористатися формулою Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8l\eta} \cdot t, \tag{13.4}$$

де V – об'єм газу, який витікає через капіляр за час t; r – радіус капіляра; ΔP – різниця в тиску на кінцях капіляра; l – довжина капіляра.

Із (13.4) маємо

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8lV} \cdot t. \tag{13.5}$$

Всі фізичні величини в правій частині можуть бути виміряні безпосередньо.

Методика вимірювань та опис вимірювальної установки:

Вимірювальна установка зображена на рис.13.1.

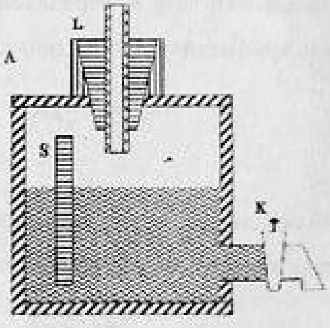


Рис. 13.1 – Вимірювальна установка

Посудину А з краном К в нижній частині наповнюють водою так, щоб рівень води не перевищував шкалу S, що приклеєна до скляної посудини. Через пробку в посудині А проходить капіляр L, радіус і довжина якого зказані в

таблиці на установці. Капіляр не повинен торкатися поверхні води. Кран К має отвір значно більшого перерізу, ніж капіляр (рис.13.1).

При відкриванні крану починається витікання рідини під дією гідростатичного тиску рідини, яка знаходиться вище рівня отвору крану.

$$\Delta P = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho g, \tag{13.6}$$

де h_1 і h_2 – початкова і кінцева висота рідини в посудині, відповідно; ρ – густина рідини; g – прискорення вільного руху.

Об'єм повітря V, яке пройшло крізь капіляр, буде дорівнювати об'єму рідини, яка витекла через кран К в мензурку.

Порядок виконання роботи

1. Відкрити кран К повністю, і коли вода почне витікати, підставити вимірювальну мензурку. Одночасно потрібно ввімкнути секундомір і записати (відмітити) в зошиті висоту рівня води в посудині h_1. Якщо кран відкрити не повністю, то результат буде хибний.
2. Зупинити секундомір, коли в мензурці буде 50...100 см^3 рідини (необхідно дивитися на поділки на мензурці), і записати в зошиті новий рівень води в посудині. Записати також в зошит час за секундоміром.
3. За формулою (13.6) підрахувати ΔP.
4. За формулою (13.5) підрахувати коефіцієнт внутрішнього тертя η.
5. Поміряти кімнатну температуру T і атмосферний тиск p. За формулою (13.3) підрахувати λ.
6. Підрахувати ефективний переріз за формулою

$$d_{ef} = \sqrt{\frac{P_0 T}{\sqrt{2}\pi n_0 P T_0 \lambda}}, \tag{13.7}$$

де P_0 і T_0 – тиск і температура за нормальних умов; n_0 – число Лошмідта; P і T - тиск і температура за умов вимірювання.

При підрахунках брати наступні значення фізичних величин:

$n_0 = 2{,}65 \cdot 10^{25}\ м^{-3}$ – число Лошмідта;

$R = 8{,}31 \frac{Дж}{моль \cdot K}$ – газова стала;

$T_0 = 273 K$ та $P_0 = 101 \cdot 10^3\ Па$ – температура та тиск за нормальних умов;

$M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}$ – молекулярна маса повітря.

Всі сталі записані в системі СІ. Оскільки λ і d_{ef} підраховувались за експериментально виміряним η, то для підрахування похибки необхідно оцінити похибку при визначенні η непрямим методом.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається коефіцієнтом внутрішнього тертя, який у нього фізичний зміст?
2. Що називається середньою довжиною вільного пробігу молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?
3. Виведіть формулу (13.7).
4. Які явища називаються явищами переносу?

Лабораторна робота № 1-14

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ МЕТОДОМ ВІДРИВУ КІЛЬЦЯ

Мета роботи:

Ознайомитися з методами визначення коефіцієнту поверхневого натягу рідин.

Прилади та матеріали:

1. лабораторний прилад;
2. набір досліджуваних рідин;
3. комплект ваг.

Теоретичні відомості

У рідинах середні відстані між молекулами значно менші, ніж у газах, тому сили взаємодії між молекулами грають у рідинах суттєву роль. Молекула, що знаходиться всередині рідини, взаємодіє з оточуючими її молекулами. Оскільки сили взаємодії симетричні, то рівнодіюча всіх сил, що діють на цю молекулу, в середньому дорівнює нулю. Молекули ж, що знаходяться на поверхні рідини, зазнають більшої дії з боку молекул рідини, ніж з боку молекул пару та газу, над поверхнею рідини. Тому у поверхневому шарі рідини виникає надмірний молекулярний тиск, що спрямований по нормалі в середину рідини.

Перехід молекул з глибини рідини у поверхневий шар супроводжується роботою проти сил молекулярного притягання. Робота, яка затрачена на утворення поверхні рідини, призводить до збільшення потенційної енергії молекул поверхневого шару. Отже поверхневий шар рідини має зайву вільну енергію.

Як відомо, рівноважний стан – це стан із мінімумом вільної енергії, тому поверхня рідини прагне зменшитися. Це прагнення зменшити поверхню здійснюється силами притягання між молекулами, які діють на поверхні рідини (ці сили називаються силами поверхневого натягу). Рідина поводиться так, як наче вона містилася б в пружній розтягнутій плівці, що прагне до стиснення. Наприклад, за відсутності зовнішніх сил рідина приймає форму кулі – форму тіла, яке за деякого об'єму має мінімальну поверхню. Поверхневий шар складається з тих самих молекул, що й ця рідина. Взаємодія між молекулами має в поверхневому шарі такий самий характер, що і всередині рідини.

Припустимо, що є прямокутна рамка з рухомою перекладиною, яка затягнута плівкою рідини (рис.14.1).

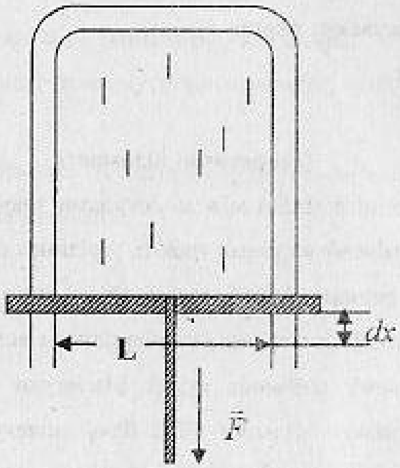


Рис. 14.1 – Прямокутна рамка з рухомою перекладиною

Плівка являє собою плаский об'єкт рідини, обмежений із двох сторін поверхневим шаром. Внаслідок прагнення поверхневого шару до скорочення з боку плівки буде діяти на перекладину сила

$$F_{п.н.} = 2\alpha l, \qquad (14.1)$$

де l – довжина перекладини; α – сила поверхневого натягу, що приходиться на одиницю довжини контуру (цю величину називають коефіцієнтом поверхневого натягу).

Щоб перекладина знаходилася в рівновазі, до неї треба прикласти зовнішню силу F, яка дорівнює силі натягу плівки, тобто

$$F = 2\alpha l. \qquad (14.2)$$

Припустимо, що перекладина переміститься у напрямку дії сили F на величину dx. Цей процес супроводжується здійсненням рідиною над перекладиною роботи

$$dA = -F \cdot dx = -2\alpha l \cdot dx = -\alpha \cdot dS, \qquad (14.3)$$

де dS – приріст поверхні поверхневого шару. Припустимо, що дослід здійснюється за ізотермічних умов, тобто T=const. При цьому процесі робота дорівнює зменшенню вільної енергії, тому

$$dA = -\alpha \cdot dS = -dW_{вільн.}. \qquad (14.4)$$

Отриманий результат означає, що при ізотермічному збільшенні площі поверхневого шару на dS, вільна енергія рідини зростає на $dW_{вільн.} = \alpha \cdot dS$. Таким чином, коефіцієнт поверхневого натягу являє собою вільну енергію, що належить до одиниці площі поверхневого шару. Відповідно до цього α можна виразити у "СІ" не лише у $Н/м$, а також у $Дж/м^2$.

Коефіцієнт поверхневого натягу рідини залежить від навколишнього середовища, з яким вона стикається. Зі збільшенням температури поверхневий натяг зменшується, а поблизу критичної температури зменшується до нуля. Це випливає з того, що густина рідини та насиченого пару у критичному стані однакові, і поверхня розділу між ними зникає.

Домішки сильно впливають на значення поверхневого натягу. Наприклад, розчинення у воді мила зменшує її коефіцієнт поверхневого натягу в півтора рази, а розчинення у воді $NaCl$ приводить до збільшення α.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка призначена для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини (рис. 14.2).

У верхній частині штатива 1 є кронштейн 2, до кінця якого прикріплена пружина 3. До кінця пружини на нитках підвішене кільце 4. У нижній частині штативу закріплено кронштейн 5, який фіксується на штативі гвинтом 6. Підставка 7 може рухатися вгору-вниз уздовж циліндричного отвору кронштейна. Переміщення підставки вгору здійснюється за допомогою гвинта 8. При обертанні гвинта 8 у протилежний бік підставка під дією власної ваги переміщується вниз.

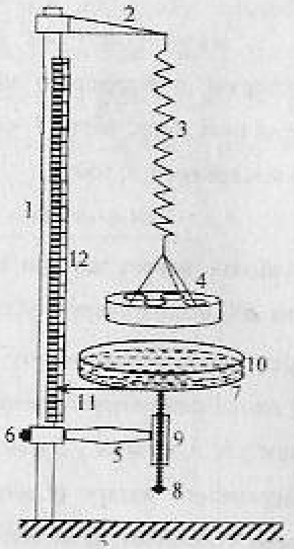


Рис. 14.2 – Схема вимірювальної установки

На підставці розміщується чашка Петрі 10 із досліджуваною рідиною. До підставки жорстко прикріплений покажчик 11. Лінійка 12 призначена для визначення подовження пружини.

Порядок виконання роботи:

1. Проградуювати пружину. Для цього ослабити гвинт 6 та кронштейн із підставкою і гайкою відхилити вбік на 90° та зафіксувати в цьому положенні гвинтом 6. Визначити положення кільця відносно шкали (рис.14.3). За допомогою пінцета опустити гирьку 0,5 г на середину кільця, при цьому пружина подовжиться. Записати данні (n_1) положення кільця відносно шкали. Збільшуючи поступово масу на 0,5 г, довести її до 4,0 г, записуючи положення кільця ($n_1 ... n_8$). За цими даними побудувати на міліметровому папері графік $\Delta x = f(P)$, де $\Delta x = n_i - n_0$ – подовження пружини.

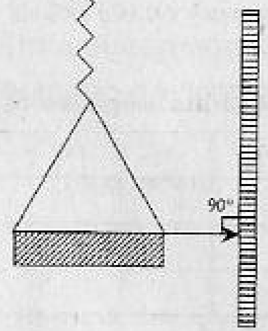


Рис. 14.3 – Вимірювання подовження пружини

2. Привести установку у вихідне положення. При цьому треба звернути увагу на те, шоб кільце відносно шкали установки залишилося в початковому положенні n_0, оскільки при занурюванні кільця в рідину на кільце діятиме сила виштовхування, а дія цієї сили негативно впливає на точність вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу α.

3. Записати початкове положення покажчика 11. Починайте повільно відкручувати гвинт 8. При цьому підставка разом з чашкою Петрі й досліджуваною рідиною опускатиметься вниз. Під дією сил поверхневого натягу кільце також рухатиметься за рідиною вниз, розтягуючи при цьому пружину. В момент, коли сили поверхневого натягу стануть дорівнювати силі розтягнення пружини, кільце відірветься від поверхні рідини. Записати положення покажчика N_1. Обчислити подовження пружини $\Delta x = N_1 - N_0$, яке визвано дією на кільце сил поверхневого натягу. Дослід повторити не менше 3...5 разів. Обчислити $\Delta x_{сер}$.

4. За графіком залежності $\Delta x = f(P)$ визначити $F_{п.н.}$.

5. Коефіцієнт поверхневого натягу обчислити за формулою

$$\alpha = \frac{F_{п.н.}}{2\pi(d-h)}, \qquad (14.5)$$

де d – зовнішній діаметр кільця, h – товщина кільця.

6. Обчислити абсолютну $\Delta\alpha$ та відносну δ похибки.

Результати дослідження оформити у вигляді таблиці

Таблиця 14.1

Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини

№ з/п	n_0	n_i	Δx	N_0	N_i	Δx_{cep}	$F_{п.н}$	α	$\Delta\alpha$

Примітка. Зовнішній діаметр кільця d=80 мм. Товщина кільця h=1 мм.

Контрольні запитання та завдання

1. Яка причина виникнення сил поверхневого натягу з молекулярної точки зору?
2. Який фізичний зміст коефіцієнту поверхневого натягу?
3. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу рідини?
4. Одиниці вимірювання коефіцієнту поверхневого натягу в "СІ".
5. Як одержано формулу (14.5) для визначення α методом відриву кільця?
6. Наведіть приклади речовин із різними значеннями коефіцієнту поверхневого натягу.
7. Яка причина залежності коефіцієнта поверхневого натягу від температури?
8. В чому полягає метод відриву кільця для визначення коефіцієнта поверхневого натягу?
9. Від чого залежить похибка вимірювань коефіцієнта поверхневого натягу?

Лабораторна робота № 1-15

ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛ

Мета роботи:

Освоїти методику вимірювання повітропроникності капілярно-пористих тіл.

Прилади і матеріали:

1. посудина з краном у нижній частині і отвором у верхній частині для наповнення водою;
2. чарунка для кріплення зразка;
3. секундомір;
4. мензурка.

Теоретичні відомості

Повітропроникність капілярно-пористих тіл у загальному вигляді визначається законом Дарсі:

$$B = \frac{V}{t \cdot S} = K\frac{\Delta P}{\eta d} \tag{15.1}$$

де V – об`єм повітря, що пройшов крізь зразок за час t; S – площа зразка; ΔP – перепад тиску; η – в'язкість газу (повітря); d – товщина зразка; K – коефіцієнт, який залежить від природи пористого зразка.

Теоретичне значення K може бути визначено, якщо обрати конкретну модель капілярно-пористого тіла. Для "капілярної" моделі, що має наскрізні капіляри різного радіуса, для K маємо

$$K = \frac{\Pi \overline{r}^2}{8}, \tag{15.2}$$

де Π – загальна пористість зразка; $\overline{r}^2$ – середньоквадратичний радіус пор, який залежить від функції розподілу пор за радіусами в тілі.

Диференційна функція розподілу пор за радіусами має вигляд:

$$f(r) = \frac{dV}{V_0 dr}, \qquad (15.3)$$

де dV – об'єм пор в інтервалі $[r, r + dr]$; V_0 – загальний об'єм пор.

Визначення $f(r)$ являє собою важке завдання і потребує спеціальних методів, а тому важко теоретично визначити і повітропроникність.

В наведеній роботі будемо визначати повітропроникність експериментально за формулою

$$B = \frac{V}{t \cdot S}, \qquad (15.4)$$

де V – об'єм повітря, яке пройшло через зразок за час t, S – площа зразка. Після цього, визначивши B за формулою (15.4), можна знайти коефіцієнта K, який є структурною характеристикою тіла.

Методика вимірювання повітропроникності капілярно-пористих тіл

Установку для вимірювання повітропроникності зображено на рис.15.1.

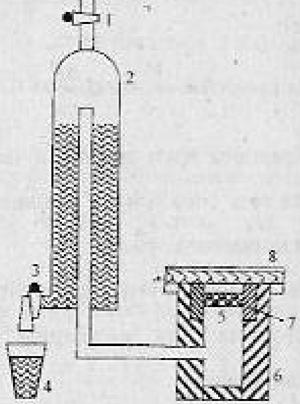


Рис.15.1 – Схема вимірювальної установки

Вона складається з вимірювального скляного циліндра 2, в який наливається вода через кран 1. Зразок капілярно-пористого тіла (дається викладачем) 5 стискується у вимірювальній чарунці між гумовими

прокладками 7 накидною гайкою 8. Тримач зразка (чарунка) з'єднується з циліндром 2 вакуумною гумовою трубкою 9.

Установка працює наступним чином. Закриваємо кран 1 і відкриваємо кран 3. При цьому вода з вимірювального циліндру виливається в мензурку 4 і дає об'єм V повітря, яке пройшло крізь зразок за час t. Перепад тиску ΔP дорівнює висоті водяного стовпа у вимірювальному циліндрі.

Повітропроникність капілярно-пористого тіла знаходимо за формулою (15.4), а потім визначаємо структурний коефіцієнт K.

$$K = \frac{B \eta d}{\Delta P}. \qquad (15.5)$$

Порядок виконання роботи

1. Помістимо зразок капілярно-пористого тіла у вимірювальну чарунку і зафіксуємо її накидною гайкою.

2. Наливаємо воду у вимірювальний циліндр до висоти 40...45 см.

3. Відкриваємо кран 3 (попередньо закривши кран 1) і вмикаємо секундомір. Далі записуємо в зошит висоту відмітки води в скляному циліндрі через рівні проміжки часу.

4. Після того, як мензурку 4 заповнено на 75% водою, секундомір вимикаємо і записуємо в таблицю значення часу t і об'єму води в мензурці V в системі СІ.

5. З розміру отвору в чарунці визначаємо робочу площу зразка S.

6. За формулою (15.4) визначаємо повітропроникність капілярно-пористого тіла.

7. За формулою (15.5) визначаємо структурний коефіцієнт K. При цьому для коефіцієнта внутрішнього тертя повітря взяти значення $\eta = 1{,}84 \cdot 10^{-5}\ \frac{кг}{м \cdot с}$.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається повітропроникністю і чому важко виконувати теоретичні розрахунки проникності капілярно-пористих тіл?

2. У чому полягає відмінність у визначенні повітропроникності в одиночному капілярі і капілярно-пористому тілі?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зачек І.Р. та інші. Курс фізики: Навчальний підручник, Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2002 р. – 375с.

2. І.П. Богацька, Д.Б. Головко, Ю.Л. Ментковський та ін. Загальні основи фізики. Механіка: Навч. посіб./К.: Либідь, 1992. – 104 с.

3. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навч. посіб. / В.М. Барановський, П.В. Бережний, І.І. Горбачук та ін.: За заг. ред. І.І. Горбачука. – К.: Вища шк., 1992. – 509 с.

4. Ю.С. Крот. Курс фізики. – К.: НМК БО, 1992.-192 с.

5. И.В. Савельев. Курс общей физики: в 3-х т. 2-е изд., перераб.: М.: Наука, 1982-1984.

6. Т.И. Трофимова. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990. – 432 с.

ЗМІСТ

Навчальне видання

Склали: **ПАК** АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ

ВОРОНЦОВА ЖАННА ВАДИМІВНА

ТОЛСТОВА ЯНА ВОЛОДИМИРІВНА

МЕХАНІКА ТА МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

для студентів за напрямами підготовки:

6.050502, 6.051701, 6.030510, 6.091706, 6.030503

Підп. до др. 17.06.2008 Формат 60х84 1/16

Папір газет. Друк офс. Ум. друк арк. 6,9 Обл.-вид. арк. 6,1

Ум. фабр. – відб. 6,9 Тираж 150 прим. Зам. 170

Харківський державний університет харчування та торгівлі

61051 Харків – 51, вул. Клочківська 333

ДОД ХДУХТ: 61051 Харків – 51, вул. Клочківська 333