

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ФІЗИКИ, МАТЕМАТИКИ ТА ІНФОРМАТИКИ
КАФЕДРА ФІЗИКИ ТА МЕТОДИКИ ЇЇ НАВЧАННЯ**

БАБЕНКО М. О., КОРОБОВА І. В.

**ЛАБОРАТОРНІ
РОБОТИ
3
МЕХАНІКИ**

Практичний посібник
для студентів напрямів підготовки «Фізика*», «Математика*»
денної, заочної та екстернатної форм навчання

Херсон - 2013

УДК 531.0
ББК 22.3я73
Б12

Лабораторні роботи з механіки: Практичний посібник для студентів напрямів підготовки «Фізика*», «Математика*» денної, заочної та екстернатної форм навчання.

Укладачі: *Бабенко М. О.*, завідувач обсерваторії, асистент кафедри фізики Херсонського державного університету;
Коробова І. В., кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання Херсонського державного університету.

Рецензенти: *Кравцов Г. М.*, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформатики, провідний фахівець відділу забезпечення академічно-інформаційно-комунікаційної інфраструктури Херсонського державного університету;
Шолохова Н. С., кандидат педагогічних наук, доцент кафедри теорії та методики викладання природничо-математичних та технологічних дисциплін Херсонської академії неперервної освіти.

Обговорено на засіданні кафедри фізики Херсонського державного університету
Протокол № 1 від 03.09.2012 р.

Розглянуто на засіданні науково-методичної ради факультету фізики, математики та інформатики Херсонського державного університету
Протокол № 1 від 13.09.2012 р.

Схвалено науково-методичною радою Херсонського державного університету
Протокол № 2 від 08.11.2012 р.

Рекомендовано до друку Вченою радою Херсонського державного університету
Протокол № 4 від 26.11.2012 р.

Представлені завдання до робіт лабораторного практикуму з механіки. Кожне завдання містить короткі теоретичні відомості, порядок виконання роботи, контрольні запитання та завдання. Значна увага присвячена питанням математичної обробки результатів експерименту та теорії похибок вимірювання. Наведено інструкції з техніки безпеки у лабораторії механіки, правила оформлення звіту з роботи, опис експериментальних установок. У додатках можна знайти таблиці фізичних величин, необхідних для виконання робіт.

Для студентів вищих навчальних закладів напрямів підготовки «Фізика*», «Математика*» денної, заочної та екстернатної форм навчання. Може бути корисним для викладачів загальноосвітніх навчальних закладів.

© Бабенко М. О., 2013

© Коробова І. В., 2013

РОЗДІЛ 1

ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

1.1. Вимоги безпеки у фізичній лабораторії

Загальні вимоги безпеки:

- до роботи допускаються лише посадові особи, ознайомлені з інструкцією з охорони праці, техніки безпеки, пожежної безпеки та виробничої санітарії на робочих місцях;
- особи, які порушили вимоги техніки безпеки, несуть відповідальність згідно з чинним законодавством України;
- студенти допускаються до виконання лабораторних робіт лише після отримання інструктажу щодо безпечного виконання лабораторних робіт;
- забороняється працювати у лабораторії одному, знаходитись у лабораторії у верхньому одязі, заносити до лабораторії їжу та напої.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- упевнитися у відсутності пожеже-небезпечних факторів у приміщенні, у тому числі на робочому місці;
- залишити на робочому місці лише те обладнання, що передбачено поточною роботою;
- переконатися у справному стані необхідного для роботи обладнання, електричних проводів, заземлення;
- перевірити стан первинних засобів пожежегасіння, впевнитися у вільному стані аварійно-евакуаційних проходів, дверей, сходових маршів;
- перевірити справність електричних вимикачів, розеток; всі електророзподільні щитки повинні бути надійно закритими;
- при виявленні пошкоджень та порушень терміново повідомити викладача або лаборанта; при пошкодженому обладнанні роботу починати не можна!

Вимоги безпеки під час роботи:

- у лабораторії можуть бути джерела, особливо небезпечні для здоров'я та життя людини: джерела високої напруги (більше 36 В), джерела високої температури (електричні нагрівачі), радіоактивні матеріали, різноманітні випромінювання, скляні прилади, обертові та рухомі деталі механізмів;
- під час роботи оберігати очі від прямого влучення лазерного або ультрафіолетового випромінювання;
- оберігатися порізів при роботі з скляними приладами (пробірками, мензурками, термометрами);
- не торкатися руками до об'єктів лінз, скляних і кварцових деталей оптичних приладів;

- при роботі з обертовими механізмами переконатися в надійності їх кріплення і остерігатися удару;
- при роботі з нагрівальними приладами остерігатися опіків, не допускати дотику до нагрітих матеріалів;
- при роботі з кип'ятильниками перевірити наявність достатньої кількості води (не менше третини висоти кип'ятильника) та справності запобіжного клапану;
- під час роботи категорично забороняється: доторкатися до частин приладів, які знаходяться під напругою, збирати і здійснювати різні перемикання приладів у досліджуваних електричних схемах під напругою, вмикати в джерела струму електричні кола без попередньої перевірки викладачем або лаборантом, працювати з радіоактивними матеріалами без використання засобів біологічного захисту;
- не палити, не користуватися відкритим вогнем самим і не дозволяти зазначеного іншим на робочому місці; паління дозволяється тільки в спеціально відведених і позначених написами місцях, за межами будівель і споруд;
- постійно спостерігати за технічним станом обладнання, систем їх живлення, паливних і опалювальних систем тощо; при виявленні ознак пожежної небезпеки, при завданні шкоди вам, оточуючим або обладнанню – припинити роботу, сповістити про ситуацію викладача або лаборанта і здійснити заходи щодо захисту оточуючих вас людей.

Вимоги безпеки по закінченню роботи:

- вимкнути джерело живлення приладів та установок, вийняти вилки шнурів живлення з мережі змінного струму;
- загасити усі газові і твердопаливні опалювальні прилади: плити, водогрійні колонки, опалювальні котли, печі, труби тощо; упевнитися у відсутності процесу горіння (або тління) в них;
- розібрати схеми і привести у порядок робоче місце, здати прилади і обладнання лаборанту;
- уважно оглянути приміщення, упевнитися у відсутності небезпеки для людей або обладнання.

Правила поведінки під час небезпечних ситуацій:

- при враженні електричним струмом негайно відключити електроприлад від мережі; якщо потерпілий втратив свідомість і не подає ознак життя, негайно приступити до непрямого масажу серцевої м'язи та штучного дихання;
- при термічному опіку обпечене місце якомога довше охолоджувати водою, снігом, льодом; якщо є ознаки опіку II або III ступеня, відправити потерпілого в медпункт;
- при механічному ушкодженні частин тіла зупинити кровотечу тугою пов'язкою та викликати швидку медичну допомогу;
- при виникненні небезпечної ситуації сповістити викладача, лаборанта, керівництво кафедри та деканату.

1.2. Вимірювання фізичних величин та оцінка похибок вимірювання

Поняття про вимірювання та похибки вимірювань. Одним з основних етапів фізичного експерименту є вимірювання фізичних величин. *Вимірювання* – це процес знаходження значення фізичної величини за допомогою засобів вимірювання.

Будь-яке вимірювання неможливо виконати абсолютно точно; під час вимірювань завжди отримують наближені значення фізичних величин. Відхилення виміряного значення фізичної величини від істинного, яке виникає під час вимірювань, називають *похибкою вимірювань*. Виділяють наступні *види похибок вимірювання*: абсолютна та відносна.

Абсолютна похибка вимірювання Δ_a визначається як половина інтервалу, центром якого є виміряне значення фізичної величини a , в який з деякою ймовірністю потрапляє істинне значення. Абсолютна похибка вимірюється у тих же одиницях, що й фізична величина і округлюється з надлишком: $\Delta_{a1} = 0,117 \approx 0,12$; $\Delta_{a2} = 0,221 \approx 0,23$. Чисельне значення результату вимірювання округлюють так, щоб його остання цифра була у тому ж розряді, що і цифра абсолютної похибки вимірювання (якщо $a = 9,532$ і $\Delta_a = 0,31$, то треба записувати $a = 9,53$). Результат вимірювання записують у вигляді $a = a_{\text{вим}} \pm \Delta_a$, наприклад, $a = (9,53 \pm 0,31)\text{м}$.

Відносною похибкою вимірювання ε_a називають відношення абсолютної похибки вимірювання до виміряного значення фізичної величини:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta_a}{a} . \quad (1.2.1)$$

Відносна похибка – безрозмірна фізична величина, може бути виражена у відсотках, наприклад, $\varepsilon_a = 0,0325$ або $\varepsilon_a = 3,25\%$.

Виділяють наступні *види вимірювань*: пряме, посереднє, сукупне та сумісне.

Пряме вимірювання – це процес знаходження значення фізичної величини безпосередньо за допомогою засобу вимірювання (наприклад, вимірювання довжини лінійкою, температури – термометром, напруги – вольтметром).

Похибки прямих вимірювань обумовлені наступними чинниками.

По-перше, у кожному засобі вимірювання вже при його виготовленні виникають похибки вимірювання. Окрім цього, у вибраному методі вимірювання можуть бути не враховані деякі фактори, що впливають на результат вимірювання. Ці похибки вимірювання є незмінними на протязі всього вимірювання для даного методу вимірювання та для даної вимірювальної установки і називаються *систематичними*. У більшості випадків систематичною вважають *інструментальну похибку*, яку встановлює Державний стандарт. Інструментальні похибки вимірювання визначається за паспортом (інструкцією) приладу чи установки. У паспорті або на шкалі приладу часто вказують *зведену похибку вимірювання* (клас точності), яка дорівнює відношенню систематичної похибки

вимірювання приладу до значення діапазону вимірювань цим приладом у відсотках:

$$\gamma_a = \frac{\Delta_{a_{\text{сис}}} \cdot 100\%}{a_{\text{max}}} . \quad (1.2.2)$$

Якщо паспорт відсутній можна знайти систематичну похибку у спеціальних довідниках або (за їх відсутністю) систематичну похибку можна прийняти рівною половині ціни поділки приладу.

Зменшити систематичні похибки можливо лише при використанні більш точних методів та вимірювальних установок.

По-друге, похибки можуть виникати і без будь-якої закономірності при повторному вимірюванні однієї фізичної величини. Причиною цього є непередбачений вплив навколишнього середовища, недосконалість наших органів чуття тощо. Такі похибки називають *випадковими*.

Для малого числа вимірювань ($2 \leq n \leq 20$) випадкову похибку вимірювання деякої величини a можна оцінити за формулою:

$$\Delta_{a_{\text{вип}}} = t_S \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{a} - a_i)^2} , \quad (1.2.3)$$

де t_S – нормований коефіцієнт Стюдента, який визначається в залежності від числа вимірювань та довірчої ймовірності (див. Додатки); \bar{a} – середнє арифметичне значення величини a . Якщо виконувати вимірювання тричі ($n = 3$), а довірчу ймовірність прийняти рівною $P = 0,95$. Тоді $t_S = 4,30$. Підставивши ці значення у (1.2.3), отримаємо:

$$\Delta_{a_{\text{вип}}} = 1,76 \sqrt{(\bar{a} - a_1)^2 + (\bar{a} - a_2)^2 + (\bar{a} - a_3)^2} . \quad (1.2.4)$$

Зменшити випадкову похибку вимірювання можливо при збільшенні кількості одних і тих же вимірювань.

По-третє, можуть виникати *промахи* – істотні відхилення від очікуваного результату. Промахи, як правило, не враховують.

У загальному випадку абсолютна похибка вимірювання $\Delta_a = \Delta_{a_{\text{сис}}} + \Delta_{a_{\text{вип}}}$. Але на практиці можуть бути наступні випадки визначення Δ_a .

1) Якщо під час повторення одних і тих же вимірювань покази приладу не змінюються, то це свідчить про те, що систематична похибка набагато перевищує випадкову. Тоді абсолютна похибка $\Delta_a \approx \Delta_{a_{\text{сис}}}$.

2) Якщо ж покази приладу змінюються при повторенні одних і тих же вимірювань, то більш суттєвою є випадкова похибка. Тоді абсолютна похибка $\Delta_a \approx \Delta_{a_{\text{вип}}}$.

Посереднє вимірювання – це процес знаходження значення фізичної величини за допомогою відомої функціональної залежності її з іншими фізичними величинами, які знаходяться експериментально (наприклад, вимірювання електричного опору за допомогою амперметра і вольтметра).

У випадку посереднього вимірювання абсолютна похибка Δ_a величини a може бути визначена двома методами.

Метод 1. Якщо дослід виконують кілька разів (при цьому умови дослідів і методи вимірювання можуть бути різними) і кожного разу в результаті посереднього вимірювання отримали різні значення фізичної величини, то абсолютна похибка $\Delta_a = \Delta_{a_{\text{вип}}}$.

Метод 1. Якщо дослід виконується лише один раз, або під час декількох посередніх вимірювань отримали одне і теж значення фізичної величини, то спочатку визначають відносну похибку за спеціальними формулами, які виводяться безпосередньо для кожного вимірювання наступним чином. Нехай вимірювана фізична величина a визначається за формулою

$$a = f(b_1, b_2, \dots, b_m), \quad (1.2.5)$$

де b_1, b_2, \dots, b_m – фізичні величини, від яких залежить величина a . Для знаходження відносної похибки вимірювання необхідно прологарифмувати вираз (1.2.5), а потім знайти повний диференціал цього логарифма:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta_a}{a} \approx \left| \frac{\partial(\ln f)}{\partial b_1} \right| \Delta_{b_1} + \left| \frac{\partial(\ln f)}{\partial b_2} \right| \Delta_{b_2} + \dots + \left| \frac{\partial(\ln f)}{\partial b_m} \right| \Delta_{b_m}. \quad (1.2.6)$$

Формули для розрахунку відносних похибок в деяких випадках наведені в таблиці 1.2.1.

Таблиця 1.2.1. Формули для розрахунку відносних похибок в найбільш простих випадках

Формула для посереднього вимірювання	Формула для розрахунку відносної похибки
$a = bc; a = \frac{b}{c}$	$\varepsilon_a = \frac{\Delta_b}{b} + \frac{\Delta_c}{c}$
$a = b \pm c$	$\varepsilon_a = \frac{\Delta_b + \Delta_c}{b \pm c}$
$a = b^n$, де n – ціле число	$\varepsilon_a = \frac{n\Delta_b}{b}$
$a = nb$, де n – ціле число	$\varepsilon_a = \frac{\Delta_b}{b}$

Якщо відома відносна похибка ε_a , то абсолютна похибка визначається за формулою:

$$\Delta_a = a\varepsilon_a. \quad (1.2.7)$$

Сукупне вимірювання – це процес знаходження значень однієї фізичної величини, але одразу для декількох тіл в результаті проведення експерименту з певною їх сукупністю (наприклад, масу трьох тіл можна визначити під час зважування їх окремо, потім першого і другого, другого і третього, першого і третього і всіх трьох тіл одночасно; потім складають систему рівнянь і з неї визначають маси усіх тіл). Сукупне вимірювання можна проводити різними методами чи засобами. Важливо, щоб вимірювалась одна і та ж фізична величина для

одних і тих же тіл. Похибку при таких вимірюваннях можна оцінити так, як і для прямих вимірювань.

Сумісне вимірювання – це процес знаходження значення фізичної величини за допомогою функціональної залежності її з іншими фізичними величинами, яка не відома і також встановлюється експериментально (наприклад, визначення функціональної залежності між температурою стержня та його довжиною, та вимірювання на основі цієї залежності коефіцієнта лінійного розширення).

При сумісних вимірюваннях декількох фізичних величин виконують *апроксимацію* експериментальних точок деякою функцією залежності однієї фізичної величини від інших. Це дає можливість знаходити значення функції для таких значень аргументів, які не вимірювались або не можуть бути виміряні: проміжного значення аргументу між двома вимірюваними (*інтерполяція*) або менших (більших), ніж найменше (найбільше) з вимірюваних (*екстраполяція*). Звичайно, при цьому має бути тверда впевненість у тому, що характер функціональної залежності для областей, де вимірювання не виконувались, такий самий, як і в областях, де вимірювання виконувались.

Апроксимацію виконують при використанні методів математичної статистики, наприклад *методу найменших квадратів*. Проте, наближено визначити функціональну залежність можна наступним чином. Якщо передбачається апроксимувати прямою лінією, то її проводять так, щоб усі експериментальні точки були на мінімальній відстані від прямої. Рівняння прямої має вигляд: $y = ax + b$. Тобто в ході сумісного вимірювання необхідно визначити коефіцієнти a та b . Перший з них рівний тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис, а другий – рівний відстані від початку координат до точки перетину прямої з віссю ординат. Похибки сумісних вимірювань Δ_a , Δ_b можна оцінити так, як для посередніх вимірювань.

Отриману функцію записують у вигляді $y = \underset{\pm\Delta_a}{a} x + \underset{\pm\Delta_b}{b}$. Якщо передбачається не лінійна (ступінна, показникова, логарифмічна тощо) залежність між вимірюваними фізичними величинами, то її слід звести до лінійної методами логарифмування та розкладання в ряд Тейлора.

1.3. Порядок виконання робіт лабораторного практикуму з фізики

Загальні вказівки. Для виконання робіт лабораторного практикуму з фізики групу студентів бажано розподілити на бригади по двоє-троє у кожній. Бригада має свій номер, який закріплений за нею на протязі всього практикуму. На кожному занятті кожна бригада виконує свою роботу. Список всіх робіт, які бригада має виконати протягом семестру, та порядок їх виконання визначається згідно графіка виконання робіт.

До занять *студенти допускаються лише після інструктажу з техніки безпеки*, під час якого вказують на вимоги безпеки перед початком, під час та по закінченню роботи. Виконання роботи лабораторного практикуму може складатися з наступних *етапів*:

- 1) допуск до виконання роботи;
- 2) проведення експерименту та виконання вимірювань;
- 3) математична обробка результатів вимірювання;
- 4) графічна обробка результатів вимірювання (якщо потрібно);
- 5) запис кінцевого результату та висновки;
- б) захист роботи.

Робота виконується у відповідності до інструкції, по завершенню роботи студент надає викладачу звіт.

Допуск до виконання роботи. На початку заняття бригада отримує у викладача допуск до виконання наступної роботи. *Без дозволу викладача чи лаборанта торкатися експериментальної установки та вимірювальних приладів заборонено!* Для отримання допуску студент повинен:

- знати завдання до роботи та перелік обладнання, необхідного для його виконання;
- знати принцип роботи експериментальної установки та порядок виконання роботи;
- розуміти фізичні явища, які спостерігаються та вивчаються;
- знати, які фізичні величини необхідно виміряти;
- мати необхідні записи у робочих зошитах.

Звіт про виконання лабораторної роботи подається викладачу під час захисту роботи, але починає оформлюватися до її виконання. На момент допуску у звіті студента мають бути наступні записи:

1. *Номер та тема роботи.*
2. *Мета роботи.*
3. *Обладнання.*

4. *Схема та опис установки.* Опис установки повинен бути коротким. Не треба переписувати теоретичні відомості та перемальовувати зовнішній вигляд приладів! Достатньо обмежитись функціональною чи електричною схемою установки, короткими підписами біля неї та технічними характеристиками вимірювальних приладів. Якщо у ході роботи необхідні додаткові графіки, схеми чи таблиці, їх теж необхідно привести.

5. *Розрахункові формули.* Під розрахунковими формулами розуміють ті формули, по яким безпосередньо відбуваються розрахунки у даній роботі. Це формули для розрахунку фізичних величин та розрахунку похибок. Вивід формул та проміжні вирази наводити не потрібно! Під кожною формулою слід вказати назву та одиниці вимірювання всіх фізичних величин, що до неї входять.

6. *Таблиця результатів вимірювань та розрахунків*, які наведені в інструкції до роботи.

7. *Відповіді на контрольні запитання*, які наведені в інструкції до роботи.

У короткій бесіді викладач з'ясовує розуміння студентом мети роботи, знання фізичних явищ, які будуть спостерігатися та фізичних законів, які будуть перевірятися в ході роботи, освоєння принципу роботи установки та порядку виконання роботи. Тільки після цього студент отримує допуск до роботи, про що засвідчує підпис викладача.

Проведення експерименту та виконання вимірювань. Бригада проводить експеримент, обов'язково дотримуючись техніки безпеки та інструкції. Працювати з експериментальною установкою слід обережно, аби уникнути травмування, пошкодження обладнання та отримання хибного результату. Використовувати слід лише те обладнання, яке вказано в інструкції. У разі відсутності чи несправності приладу треба обов'язково повідомити викладача або лаборанта.

Під час спостережень фізичних явищ слід бути уважними та обов'язково робити записи у робочих зошитах, в яких слід вказати: назву явища, умови виникнення, його опис.

Результати прямих вимірювань фізичних величин заносять до заздалегідь підготовлених таблиць результатів вимірювань. У заголовках таблиць необхідно вказати одиниці вимірювання фізичних величин в системі СІ. У таблиці всі числа в межах одного стовпця повинні мати однаковий розряд (наприклад, все округлити до десятих, або до сотих). Якщо під час вимірювань ви отримали промах або некоректний результат, варто повідомити про нього викладача або лаборанта, а враховувати та записувати до таблиці його не слід.

Після вимірювання фізичної величини слід визначити систематичну похибку вимірювання приладу (якщо це потрібно) та занести її до таблиці.

Після виконання всіх вимірювань необхідно привести робоче місце в порядок та показати результати вимірювань викладачу, який засвідчує їх підписом.

Математична обробка результатів вимірювань. Усі розрахунки фізичних величин та похибок обов'язково повинні бути присутні у зошиті (результати розрахунків заносять потім до відповідних таблиць). Виконувати обчислення з точністю більшою, ніж це дозволяють експериментальні дані, нераціонально. Надмірна точність обчислень призводить до зайвих витрат часу і, крім того, створює хибне враження про велику точність вимірювань. Перед розрахунком фізичної величини необхідно перевірити, щоб усі виміряні фізичні величини були переведені до системи СІ, а також перевірити їх розмірність.

Для запису чисел слід використовувати *нормалізовану форму запису числа* – запис числа у вигляді добутку правильного десяткового дроби (з першою цифрою від 1 до 9) і степеня десяти. Округлювати рекомендується до сотих. Наприклад: $-596,32 \approx -5,96 \cdot 10^2$.

Графічна обробка результатів вимірювання (якщо потрібно). В багатьох випадках при обробці результатів фізичного експерименту слід вдаватися до графічного методу, який дає можливість більш наочно подавати результати експерименту – залежність функції (величина, закономірність якої вивчається) від аргументу (величина, від зміни якої залежить значення функції).

При побудові графіків найчастіше використовують прямокутну систему координат. Координатні осі використовують як функціональні шкали.

Для побудови графіків слід, насамперед, раціонально обрати масштаб, тобто: щоб на графіку розмістився весь діапазон експериментальних значень фізичних величин, що їх відкладають на координатних осях, і щоб ціна однієї поділки виражалася, по можливості, цілим числом. Одночасно при виборі масштабу слід підпорядковувати точність вимірювання точності відліку за графіком. Потрібно, по можливості, використати всю площу графіка (якщо дослідні дані набагато відрізняються від нуля, відлік поділок потрібно починати на осях з деяких значень, які трохи менші від одержаних під час досліду).

Звернемо увагу на те, що числа, знайдені внаслідок вимірювання фізичних величин, є *наближеними*. Звідси випливає, що замість точок на графіках експериментальні дані необхідно зображати у вигляді перетину двох ліній (+), кожна з яких відповідає виміряному інтервалу значень. Лінія повинна перетинати більшість плюсів (рис. 1.3.1).

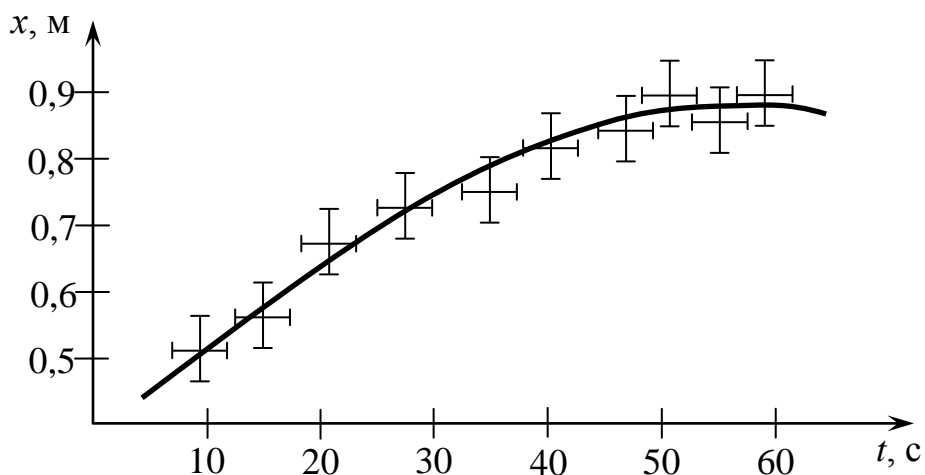


Рис. 1.3.1. Приклад графіку функції $x(t)$

Точки перегину, максимуму, мінімуму на експериментальних кривих відповідають якісним змінам у системах, наприклад появі нової фази і т. д. У таких точках порушується рівномірність зміни всіх властивостей системи. В областях, близьких до цих точок, слід проводити вимірювання значно частіше. Будуючи графіки плавних залежностей, не слід брати багато точок.

Якщо окремі точки значно відхиляються від кривої, то це може свідчити про промахи.

Запис кінцевого результату та висновки. Завданням до роботи-практикуму може бути або *визначення певної фізичної величини та її порівняння з відомим значенням*, або *перевірка певного фізичного закону чи теоретичної формули*.

У першому випадку виміряну фізичну величину записують разом з похибкою. Якщо отриману величину можна порівняти з відомим табличним значен-

ням $a_{\text{табл}}$, то треба перевірити, чи потрапляє це табличне значення в отриманий інтервал значень, тобто чи справджується нерівність:

$$a - \Delta_a \leq a_{\text{табл}} \leq a + \Delta_a. \quad (1.3.1)$$

Насправді, правильніше порівнювати два інтервали значень: отриманого нами $(a - \Delta_a, a + \Delta_a)$ та табличного $(a_{\text{табл}} - \Delta_{a_{\text{табл}}}, a_{\text{табл}} + \Delta_{a_{\text{табл}}})$, оскільки табличні значення теж виміряні з певними похибками. Та оскільки методи вимірювання фізичних величин, що використовуються у лабораторному практикумі, набагато менш точні, ніж методи, що використовувались для вимірювання табличних величин, і відповідно отриманий нами інтервал набагато більший табличного, то перевірка за допомогою нерівності (1.3.1) є достатньо точною. Якщо нерівність (1.3.1) виконується, то робота виконана вірно, якщо ні – під час її виконання були допущені певні помилки, що призвели до спотворення результату (у цьому разі відшуковують помилки, аналізують їх та виконують роботу повторно, якщо це можливо).

У другому випадку, якщо метою роботи була перевірка закону чи теоретичної формули, визначається певна фізична величина a_1 , що входить до цієї формули та абсолютна похибка Δ_{a_1} . Потім визначають цю ж фізичну величину a_2 та Δ_{a_2} , але з іншої формули чи закону, які вважаються більш надійними (або визначають a_1 та a_2 з одного закону змінюючи початкові умови та перевіряють, чи змінюється ця величина при зміні початкових умов). Далі перевіряють на виконання нерівність:

$$|a_1 - a_2| \leq (\Delta_{a_1} + \Delta_{a_2}). \quad (1.3.2)$$

Якщо нерівність (1.3.2) виконується, то закон, що перевіряється, справджується і робота виконана вірно (вважається, що закон справджується завжди, оскільки мета лабораторного практикуму не відкрити нові закони, а навчити методам експериментальної фізики), якщо не справджується – були допущені певні помилки при виконанні експерименту.

Захист лабораторної роботи. Для захисту лабораторна робота має бути виконана повністю, усі розрахунки, графіки, таблиці, висновок мають бути у звіті. Захист відбувається у формі *бесіди* викладача та студента, по закінченні якої у зошиті (та у журналі групи) виставляється сумарна оцінка за виконання лабораторної роботи, яка має три складові: оцінка за підготовку до роботи (допуск), оцінка за процес її виконання та оцінка письмового звіту.

1.4. Приклад оформлення звіту з лабораторної роботи

Лабораторна робота №29

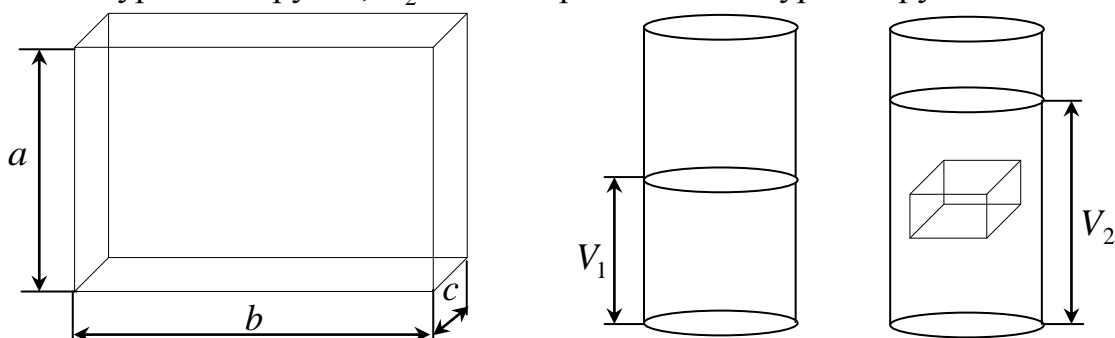
Вимірювання об'єму твердого тіла правильної геометричної форми

Мета роботи: а) виміряти об'єм твердого бруска, що має форму прямокутного паралелепіпеда експериментально за допомогою мензурки; б) розрахувати

об'єм теоретично, визначивши геометричні розміри бруска за допомогою штангенциркуля; в) порівняти експериментальне та теоретичне значення об'єму.

Обладнання: брусок, штангенциркуль, мензурка, посудина з водою.

Схема та опис установки. a, b, c – лінійні розміри бруска, V_1 – об'єм рідини в мензурці без бруска, V_2 – об'єм рідини в мензурці з бруском.



Розрахункові формули.

Формули для розрахунку об'єму тіла:

$$V_T = abc, \quad V_{ек} = V_2 - V_1.$$

Формули для розрахунку відносних похибок вимірювання об'єму тіла:

$$\varepsilon_{V_T} = \frac{\Delta_a}{a} + \frac{\Delta_b}{b} + \frac{\Delta_c}{c}, \quad \varepsilon_{V_{ек}} = \frac{\Delta_{V_2} + \Delta_{V_1}}{V_2 - V_1}.$$

Результати вимірювань та розрахунків.

№	$a, 10^{-3} \text{ м}$	$b, 10^{-3} \text{ м}$	$c, 10^{-3} \text{ м}$	$V_1, 10^{-6} \text{ м}^3$	$V_2, 10^{-6} \text{ м}^3$		
1	21,20	30,30	39,70	20,0	44,0		
2	19,80	30,30	40,10	20,0	46,0		
3	20,50	30,30	40,10	20,0	44,0		
сер	20,50	30,30	40,00	20,0	44,6		
Δ	1,74	0,05	0,58	0,5	2,9		
$V_T, 10^{-5} \text{ м}^3$	$\varepsilon_{V_T}, \%$	$\Delta_{V_T}, 10^{-5} \text{ м}^3$	$V_{ек}, 10^{-5} \text{ м}^3$	$\varepsilon_{V_{ек}}, \%$	$\Delta_{V_{ек}}, 10^{-5} \text{ м}^3$	$ V_T - V_{ек} , 10^{-5} \text{ м}^3$	$(\Delta_{V_T} + \Delta_{V_{ек}}), 10^{-5} \text{ м}^3$
2,48	10,1	0,25	2,46	13,8	0,34	0,02	0,59

Розрахунок середніх арифметичних значень вимірюваних величин:

$$a_{сер} = \frac{21,20 + 19,80 + 20,50}{3} \cdot 10^{-3} = 20,50 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$c_{сер} = \frac{39,70 + 40,10 + 40,10}{3} \cdot 10^{-3} = 40,00 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$V_{2сер} = \frac{44,0 + 46,0 + 44,0}{3} \cdot 10^{-6} = 44,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Розрахунок абсолютних похибок вимірюваних величин:

$$\Delta_a = \Delta_{a_{вип}} = 1,76 \sqrt{(20,50 - 21,20)^2 + (20,50 - 19,80)^2 + (20,50 - 20,50)} \cdot 10^{-3} = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\Delta_b = \Delta_{b_{сис}} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\Delta_c = \Delta_{c_{\text{вип}}} = 1,76 \sqrt{(40,00 - 39,70)^2 + (40,00 - 40,10)^2 + (40,00 - 40,10)} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\Delta_{V1} = \Delta_{V1_{\text{сис}}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\Delta_{V2} = \Delta_{V2_{\text{вип}}} = 1,76 \sqrt{(44,6 - 44,0)^2 + (44,6 - 46,0)^2 + (44,6 - 44,0)} \cdot 10^{-6} =$$

$$= 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

Перевірка розмірності:

$$[V_T] = \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м} = \text{м}^3;$$

$$[V_{\text{ек}}] = \text{м}^3 - \text{м}^3 = \text{м}^3.$$

Розрахунок теоретичного значення об'єму:

$$V_T = 20,50 \cdot 10^{-3} \cdot 30,30 \cdot 10^{-3} \cdot 40,00 \cdot 10^{-3} = 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^3\text{)}.$$

Розрахунок експериментального значення об'єму:

$$V_{\text{ек}} = 44,6 \cdot 10^{-6} - 20,0 \cdot 10^{-6} = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^3\text{)}.$$

Розрахунок відносних похибок розрахованих величин:

$$\varepsilon_{V_T} = \frac{1,74}{20,50} + \frac{0,05}{30,30} + \frac{0,58}{40,00} = 0,101 = 10,1\%;$$

$$\varepsilon_{V_{\text{ек}}} = \frac{2,9 + 0,5}{44,6 - 20,0} = 0,138 = 13,8\%.$$

Розрахунок абсолютних похибок:

$$\Delta_{V_T} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot 0,101 = 0,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$\Delta_{V_{\text{ек}}} = 2,46 \cdot 10^{-4} \cdot 0,138 = 0,34 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Порівняння результатів, отриманих теоретично та експериментально:

$$|V_T - V_{\text{ек}}| < (\Delta V_T + \Delta V_{\text{ек}});$$

$$2,48 - 2,46 = 0,02;$$

$$0,25 + 0,34 = 0,59;$$

$$0,02 < 0,59.$$

Висновки. У результаті експерименту отримали значення об'єму запропонованого бруска $V_{\text{ек}} = (2,46 \pm 0,34) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, яке узгоджується з теоретичним $V_T = (2,48 \pm 0,25) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ в межах похибки: $|V_T - V_{\text{ек}}| < (\Delta V_T + \Delta V_{\text{ек}})$. Трохи за велике значення відносних похибок можна пояснити:

а) нерівною поверхнею бруска (велика випадкова похибка під час вимірювання лінійних розмірів);

б) впливом капілярних явищ на точне визначення об'єму за допомогою мензурки (поверхня рідини в мензурці нерівна внаслідок змочування стінок).

Розділ 2 Обладнання з механіки

2.1. Прилади для вимірювання геометричних розмірів та маси

Штангенциркуль (рис. 2.1.1) – прилад для вимірювання лінійних розмірів з точністю до 0,1 мм.

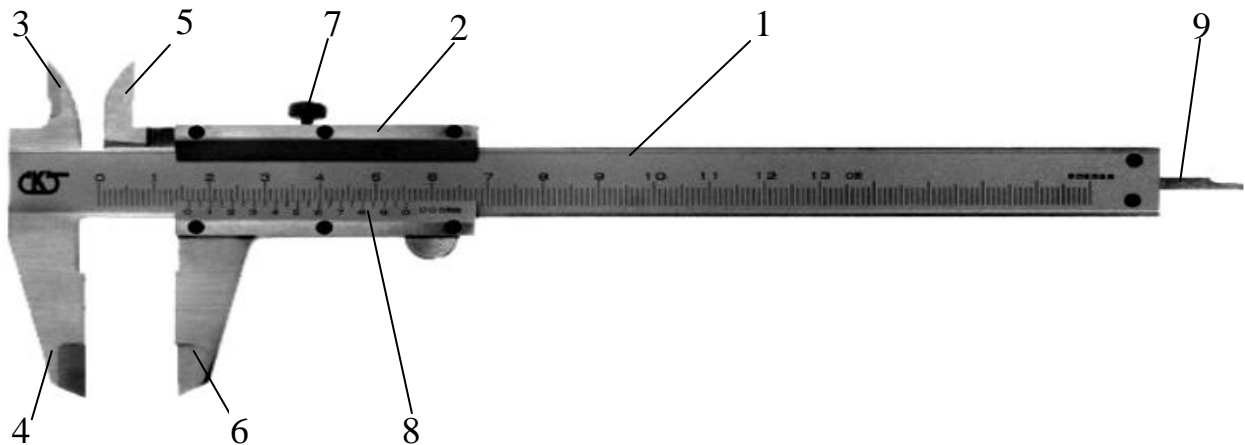


Рис. 2.1.1. Штангенциркуль

Штангенциркуль складається із сталеві лінійки (штанга) 1 з міліметровими поділками (основна шкала), відносно якої переміщується рамка 2 з ноніусом (додатковою шкалою) 8, і двох пар губок (ніжок) – нерухомих 3, 4 і рухомих 5, 6. При зімкнутих губках відлік за шкалою дорівнює нулю. Для вимірювання зовнішніх розмірів, між губками 4, 6 затискають деталь. Закріплюють рухома губку на штанзі стопорним гвинтом 7 і роблять відлік за ноніусом. *Ноніус* – це додаткова шкала до звичайного масштабу, яка дає змогу підвищити точність вимірювання в 10 разів. Зазвичай ноніус має 10 поділок, які пронумеровано від 0 до 9 мм. Довжина ноніуса дорівнює максимальному значенню поділки ноніуса (якщо в ноніусі найбільше значення – 9 мм, тобто всього 10 поділок, то довжина ноніуса 9 мм). На цьому ґрунтується метод ноніуса: показання ноніуса і основної шкали зсунуті одна відносно одної на 1 мм. Для вимірювання внутрішніх розмірів деталі є калібровані губки 3, 5. Загальна ширина їх при зведених губках найчастіше дорівнює 10 мм; цей розмір треба додавати до відліку за шкалою. Деякі штангенциркулі мають також висувні лінійки 9 для вимірювання глибини не наскрізних отворів.

Вимірювання проводять наступним чином. Ну-

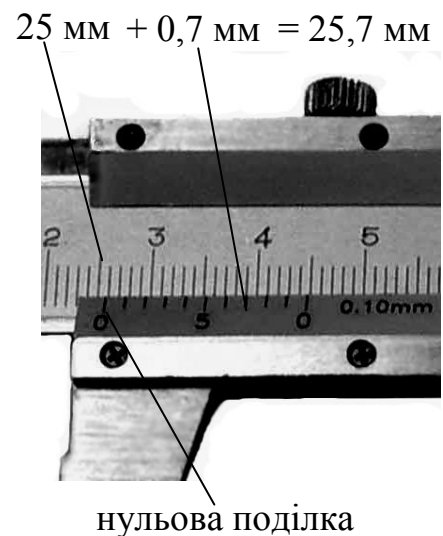


Рис. 2.1.2. Відлік на штангенциркулі

льова поділка ноніуса вказує на основній шкалі ціле число міліметрів (наприклад, 25 мм – див. рис. 2.1.2). Ноніус дозволяє виміряти десяті частки міліметрів. Для цього шукають першу поділку ноніуса, яка збігається з будь-якою поділкою основної шкали (наприклад, на рис. 2 це буде 7-а поділка ноніуса). Вона показує скільки десятих міліметра треба додати до показань основної шкали (на рис. 2 вимірний лінійний розмір буде рівний 25,7 мм).

Мікрометр (рис. 2.1.3) – це інструмент для вимірювання лінійних розмірів з точністю до 0,01 мм.

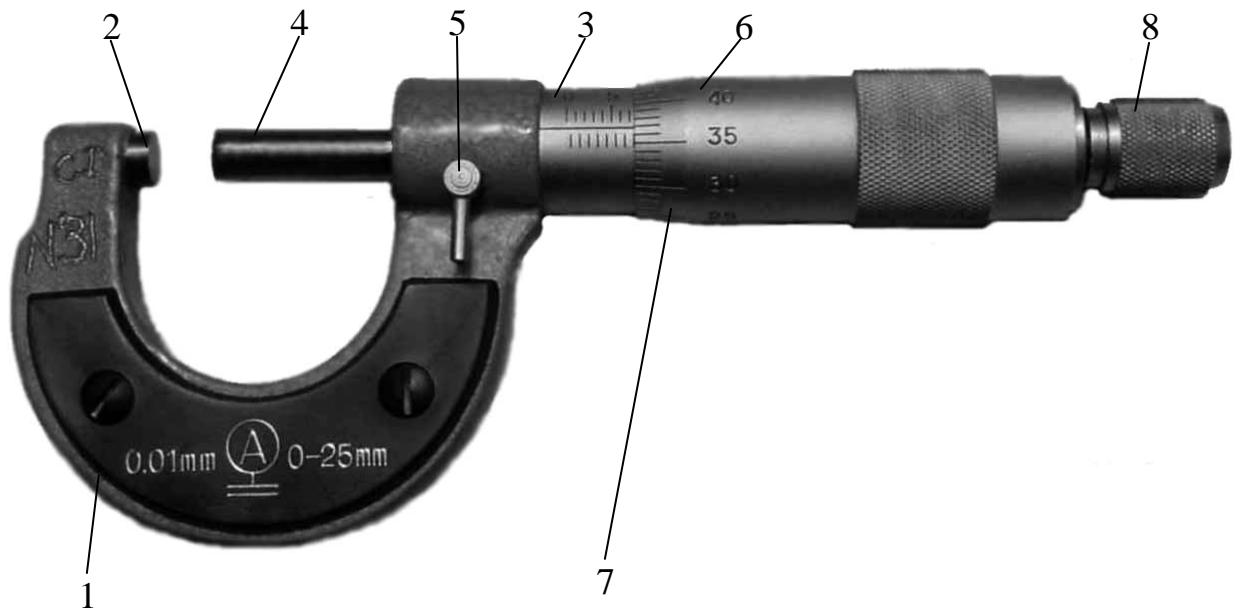


Рис. 2.1.3. Мікрометр

Мікрометр складається із сталюї скоби 2, що має нерухому опорну п'яту 2, стебла 3, мікрометричного гвинта 4 і стопорного гвинта 5. Мікрометричний гвинт переміщується всередині спеціальної гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі 3. На зовнішній поверхні стебла нанесено дві поздовжні шкали, зсунуті одна відносно одної на 0,5 мм. Зовні стебло охоплює барабан 6, з'єднаний з мікрометричним гвинтом. Таким чином, при обертанні барабана обертається і гвинт. Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступальне переміщення, пропорційне куту повороту. Скошений обід 7 барабана поділено на 50 однакових поділок. На правому кінці барабана є особливий фрикційний пристрій – тріскачка 8. При вимірюванні слід обертати барабан тільки за голівку тріскачки! Деталь при вимірюванні затискається між п'ятою 2 і мікрометричним гвинтом 4. Після того, як досягнуто певного ступеня натиску на деталь (5 – 6 Н), фрикційна голівка починає проковзувати, даючи характерний

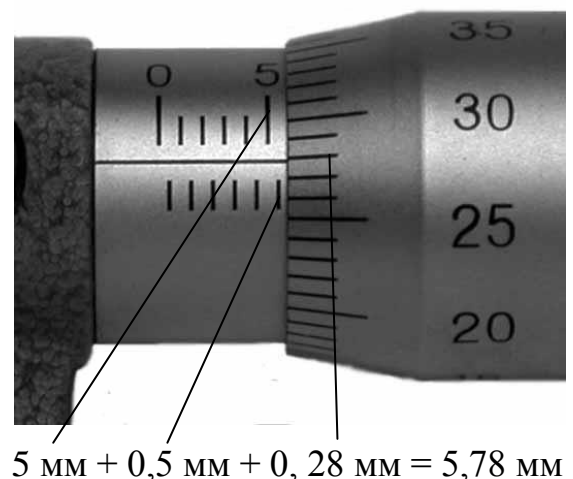


Рис. 2.1.4. Відлік на мікрометрі

тріск. Завдяки цьому затиснута деталь деформується порівняно мало (її розміри не спотворюються) і, крім того, це запобігає псуванню мікрометричного гвинта.

Для відліку показів мікрометра по шкалі стебла визначають ціле число (оцифрована шкала) і половини (не оцифрована шкала) міліметрів. Для відлічування сотих часток міліметра користуються поділками на барабані. Наприклад, на оцифрованій шкалі барабан відлічує 5 мм (рис. 2.1.4), на не оцифрованій шкалі барабан перетнув половинку між позначками 5 та 6 (+ 0,5 мм), а лінія на стеблі мікрометра відлічує на барабані 28-му позначку (+ 0,28 мм). Тоді вимірювана довжина рівна 5,78 мм.

Технічні терези Т-200 (рис. 2.1.5) – прилад для вимірювання маси. Основною робочою частиною технічних терезів є рівноплече коромисло 1, на кінці якого за допомогою двох серг 2 і стремен підвішені шальки терезів 3. Посередині коромисла закріплена довга стрілка 6. Коромисло має три тригранні призми: центральною призмою воно спирається на подушку в штоці аретира, який міститься всередині колонки 7, встановленої на станині 4, 5 – рукоятка аретира. *Аретир* – пристрій, який зупиняє коливання терезів, а також звільняє призми від навантаження, щоб запобігти пошкодженням відповідальних частин під час транспортування та тоді, коли на терезах не виконують зважування. Щоб привести терези в робочий стан, рукояткою 5 відкривають аретир.



Рис. 2.1.5. Технічні терези Т-200

Терези – точний вимірювальний прилад. Вони потребують особливо суворого дотримання правил експлуатації. Перед початком зважування терези вста-

новлюють за відвісом і перевіряють правильність їхньої роботи (однаковість відхилення вправо і вліво стрілки вільних, не навантажених терезів).

Гарячі, сильно охолоджені і мокрі предмети зважувати не рекомендується.

Класти тягарці на шальки терезів і знімати їх потрібно пінцетом при закритому аретирі. Спочатку кладуть тягарець, маса якого вважається найбільш близькою до маси предмета, що зважується, потім, послідовно замінюючи або додаючи менші тягарці, досягають рівноваги терезів. Аретир повертають рівномірно і повільно.

Кожні терези розраховані на певне, гранично допустиме навантаження, яке зазначається на терезах. Наприклад, на терезах Т-200 допустимо зважувати тіла, масою до 200 г, на терезах Т-1000 – відповідно тіла з масою до 1000 г.

Електронні терези DEGEVER GKH-500 (рис. 2.1.6) складаються з корпусу 1, чашки 2, табло 3, набором кнопок 4-8. Ввімкнення та вимкнення терезів відбувається кнопкою «1/0» (4). Після того, як табло покаже «0.0», тіло кладуть на чашку. Покази маси зчитують з табло. Максимальна допустима маса, що може бути виміряна на цих терезах – 500 г. Ціна поділки терезів 0,1 г. Кнопка «ZERO» (5) дозволяє виставити нуль на табло. Кнопка «TARE» (6) дозволяє врахувати посудину, в якій знаходиться досліджуване тіло. Наприклад, якщо поставити на чашу порожній стакан, на табло буде показано його масу. Якщо після цього натиснути кнопку «TARE», табло покаже «0.0» і можна наливати рідину для зважування. Кнопка «MODE» (7) дозволяє переключити режими зважування: зважування у грамах, у каратах, у унціях, поштучно. При зважуванні поштучно використовують також кнопку «PCS» (8).



Рис. 2.1.6. Електронні терези DEGEVER GKH-500

2.2. Комплект фізичних приладів з механіки FPM.

FPM-02 «Прилад Атвуда» (рис. 2.2.1) призначений для дослідження прямолінійного рівномірного та рівноприскореного рухів, а також для вимірювання прискорення вільного падіння. На вертикальному штативі, закріпленому на основі, містяться три кронштейни: нерухомий нижній кронштейн 7 та два рухомих кронштейни: середній 6 та верхній 5. За допомогою гвинтів на основі приладу можна встановити основу горизонтально.

В верхній частині штативу закріплений блок 1 разом з електромагнітом. Через блок проходить нитка із закріпленими на її кінцях однаковими циліндрами 2а та 2б. За допомогою електромагніта система утримується в стані спокою. Верхній та середній кронштейни можна переміщувати та фіксувати в довільному положенні, змінюючи таким чином ділянки рівноприскореного та рівномір-

ного рухів. Верхній кронштейн має додаткову поділку, яка полегшує точне узгодження нижньої грані верхнього тягара з початком шляху руху. На середньому кронштейні кріпиться кільце 10 та фотоелектричний датчик 8. Кільце знімає з падаючого циліндра додатковий тягар 3, а фотоелектричний датчик у цей момент утворює електричний імпульс, який сигналізує про початок рівномірного руху циліндрів. Нижній кронштейн містить другий фотоелектричний датчик. Після перетинання осі цього датчика нижньою поверхнею циліндра утворюється електричний імпульс, який сигналізує про проходження тягарцями шляху. Проміжок часу між імпульсами фотоелектричних датчиків вимірюється за допомогою секундоміра на блоці 11.

Прилад вмикається при натисканні кнопки «СЕТЬ». Кнопка «ПУСК» вмикає електромагніт. Кнопка «СБРОС» встановлює нуль на табло. Табло «ВРЕМЯ» показує час в секундах проходження циліндром 2а ділянки прямолінійного руху між середнім та нижнім кронштейнами.

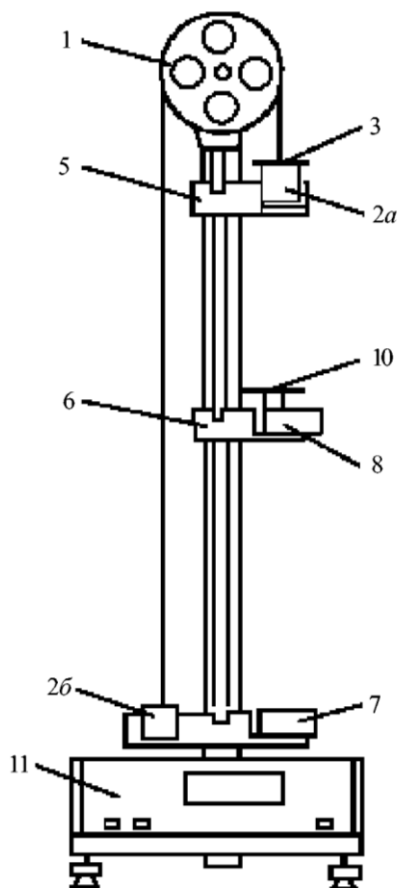


Рис. 2.2.1. FPM-02
«Прилад Атвуда»

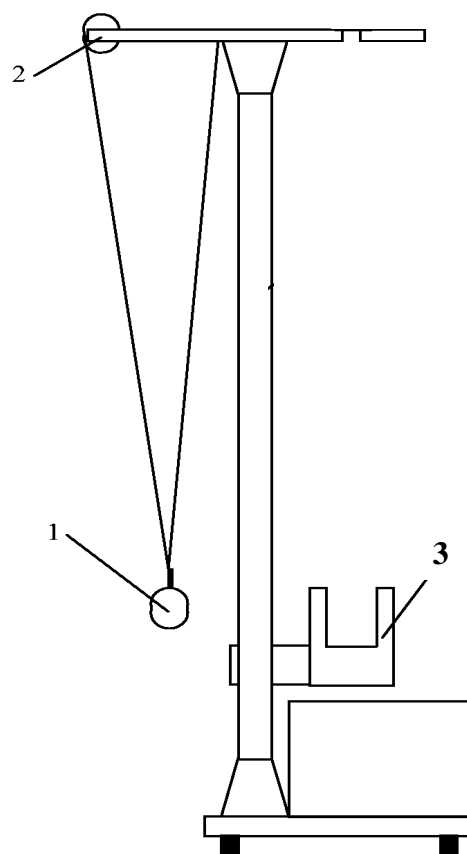


Рис. 2.2.2. FPM-04 «Математичний маятник»

FPM-04 «Математичний маятник» (рис. 2.2.2) призначений для вимірювання прискорення вільного падіння. Математичний маятник являє собою металеву кульку 1 на біфілярному підвісі 2. Довжина підвісу вимірюється лінійкою на штативі. Фотодатчик 3 сигналізує про проходження маятником положення рівноваги. Прилад вмикається при натисканні кнопки «СЕТЬ». Кнопка «СБРОС» встановлює нуль на табло. Натискання кнопки «СТОП» призводить

до того, що прилад рахує ще одне коливання і зупиняє відлік. Табло «ПЕРИОДИ» показує кількість коливань, а табло «ВРЕМЯ» – загальний час коливань в секундах.

ФРМ-06 «Прилад Обербека» (рис. 2.2.3) призначений для дослідження обертального руху. На вертикальній колоні закріплені два кронштейни 5: нерухомий нижній та рухомий верхній. На верхній частині колони закріплено блок з електромагнітом. Через цей блок перекладено нитку 1, один кінець якої закріплено на диску маховика 2, а на другому кінці закріплені тягарі. Маховик являє собою 4 металевих стержні 3, на яких нанесені через 1 см риски. На кожному стержні можуть переміщуватися та фіксуватися циліндри 4, що дає можливість змінювати момент інерції приладу. Рухомий кронштейн можна переміщувати вздовж колони, та фіксувати у будь-якому положенні, встановлюючи таким чином висоту падіння тягарців. Цю висоту можна вимірювати за допомогою міліметрової шкали 6. Час руху тягарців вимірюється за допомогою двох фотоелектричних датчиків 5, встановлених на кронштейнах, та мілісекундоміра, який вмонтовано в основу приладу.

Прилад вмикається при натисканні кнопки «СЕТЬ». Кнопка «ПУСК» вмикає електромагніт. Кнопка «СБРОС» встановлює нуль на табло. Табло «ВРЕМЯ» показує час в секундах проходження тягарцями ділянки між верхнім та нижнім кронштейнами.

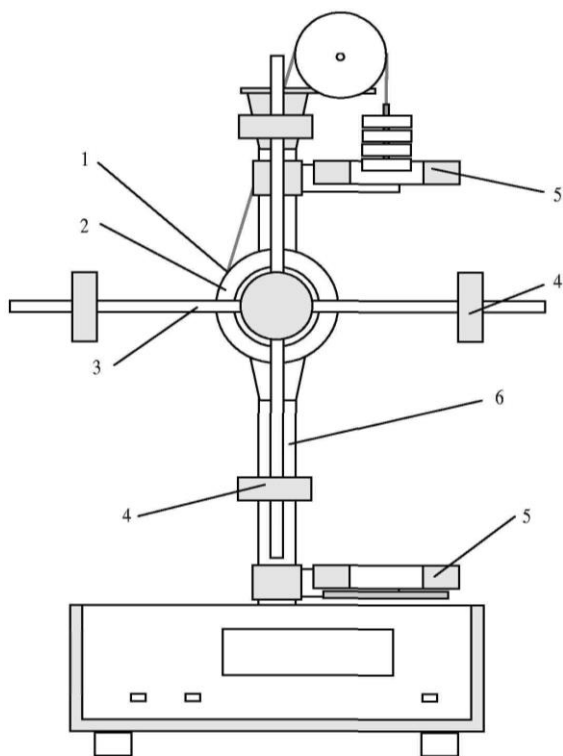


Рис. 2.2.3. ФРМ-06
«Прилад Обербека»

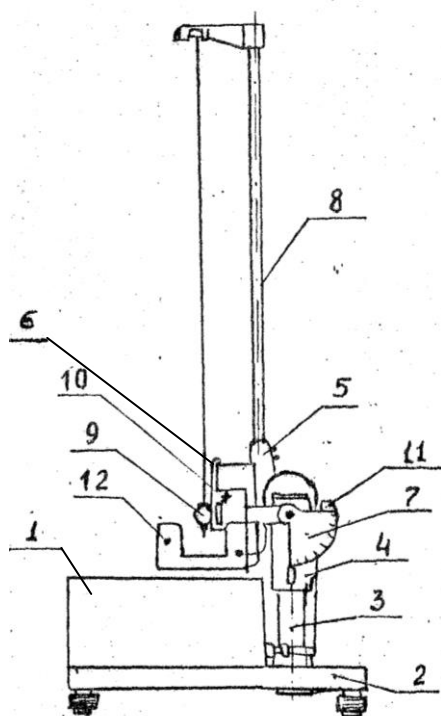


Рис. 2.2.4. ФРМ-07
«Похилий маятник»

ФРМ-07 «Похилий маятник» (рис. 2.2.4) призначений для вимірювання коефіцієнта тертя кочення. В основі 2 закріплена труба 3, на якій змонтований корпус 4. Корпус з'єднаний з кронштейном 5 за допомогою осі. У кронштейні

закріплена колонка 8, на якій підвішена на нитці куля з покажчиком 9. У кронштейн також вставляються зразки 10. Для нахилу маятника використовується ворот 11, для вимірювання кута нахилу маятника – шкала 7, для вимірювання кута відхилення кульки – шкала 6.

ФРМ-08 «Прилад для вивчення удару» (рис. 2.2.5) призначений для перевірки законів збереження при пружному та не пружному ударах. Основа приладу 1 має ніжки 2, які дозволяють встановити 1 горизонтально. На основі закріплена колона 3 з двома кронштейнами (4, 5). На верхньому кронштейні закріплені стержні 6 та вороток 7, який дозволяє змінювати відстань між кулями. На стержнях 6 розміщені рухомі тримачі 8 із втулками 9, які фіксуються за допомогою гвинтів 10 і дозволяють кріпити підвіси 11; через ці підвіси проведені провідники 12, які підводять напругу до підвісів 13 і куль 14. На нижньому кронштейні закріплені шкали (15, 16) та електромагніт 17. Гвинти (18, 19) дозволяють фіксувати положення електромагніта, а вороток 23 регулювати його силу. Положення шкал фіксується гайками 20. На основі приладу закріплено секундомір 21, що вимірює час взаємодії куль під час удару.

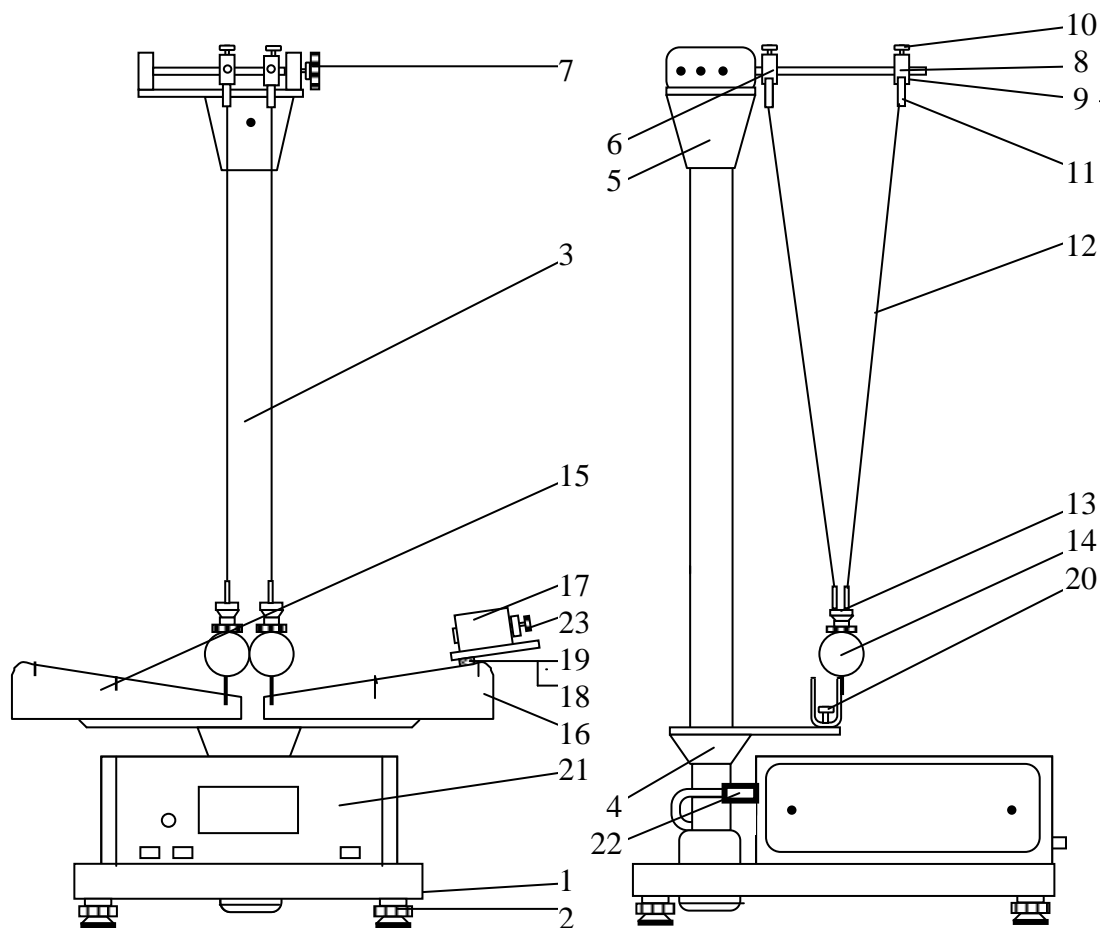


Рис. 2.2.5. ФРМ-08 «Прилад для вивчення удару»

ФРМ-10 «Гіроскоп» (рис. 2.2.6) призначений для дослідження гіроскопічного ефекту. На основі 1 закріплена вертикальна колона 2, на якій встановлений кронштейн 3 з закріпленими на ньому фотоелектричним датчиком 4 та зовнішньою втулкою обертового з'єднання 5. Обертальний вузол дозволяє гіроско-

пу обертатися навколо вертикальної осі та забезпечує живлення фотоелектричного датчика 6 і двигуна 7, змонтованих на кронштейні 8. На осі двигуна закріплений диск 9 (власне сам гіроскоп), захищений екраном 10. Диск 9 має відмітки, за якими датчик 6 визначає частоту обертання. На важелі 11 з лінійкою може закріплюватися тягар 12. Кут повороту гіроскопа навколо вертикальної осі вказує на диску 13 стрілка 14. Цей кут вимірюється за допомогою датчика 4.

Установка вмикається натисканням на кнопку «СЕТЬ». Ручка на лицьовій панелі встановлює частоту обертання. Кнопка «СБРОС» запускає електронний секундомір та вимірювач кута прецесії. Кнопка «СТОП» зупиняє вимірювання кута прецесії та часу повороту.

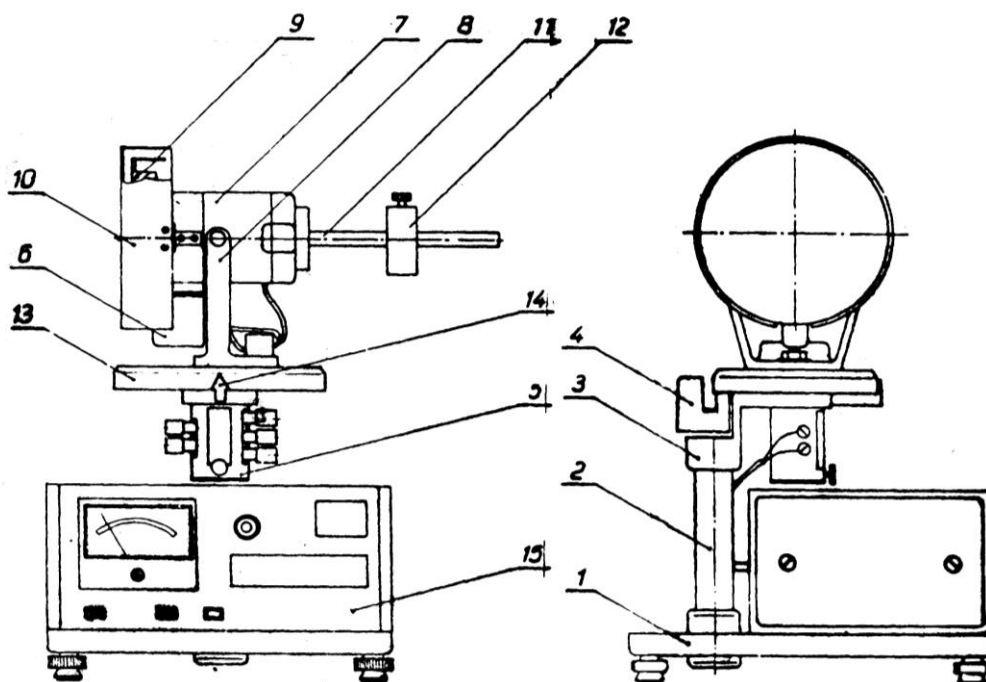


Рис. 2.2.6. FPM-10 «Гіроскоп»

FPM-13 «Зв'язані маятники» (рис. 2.2.7) призначений для дослідження коливальної системи з двома ступенями вільності. До основи 1 приладу прикріплено колону 2, на якій закріплено втулку 3 та кронштейн 4. На стержні 5 втулки 3 нанизані шарнірні вузли 6, з'єднані зі стержнем 9 і двома маятниками, кожен з яких складається зі стержнів 7 і масивної шайби 8. За допомогою стержня 9 через пружину 10 здійснюється збудження коливальної системи маятників за допомогою електродвигуна. На стержні 7 нанесені поділки з інтервалом 5 см. Маятники скріплені між собою за допомогою пружин 11.

На валу електродвигуна розміщений диск, з'єднаний зі стержнем 9 так, що при обертанні диска стержень здійснює гармонічні коливання і через пружини 10 передає їх задньому маятнику, який в свою чергу через пружини 11 залучає до коливального процесу передній маятник.

До кронштейна 4 прикріплена шкала 13, яка дозволяє визначити амплітуду коливань маятників, а також фотоелектричний датчик 14, який дозволяє визначити кількість та час коливань заднього маятника.

Прилад вмикається при натисканні кнопки «СЕТЬ». Кнопка «СБРОС» встановлює нуль на табло. Кнопка «СТОП» зупиняє відлік часу. Табло «ПЕРІОДИ» показує кількість, а табло «ВРЕМЯ» – загальний час коливань заднього маятника в секундах. Тумблер «ВКЛ. ДВИГАТЕЛЯ» вмикає двигун, а ручка «ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ» дозволяє змінювати частоту його коливань.

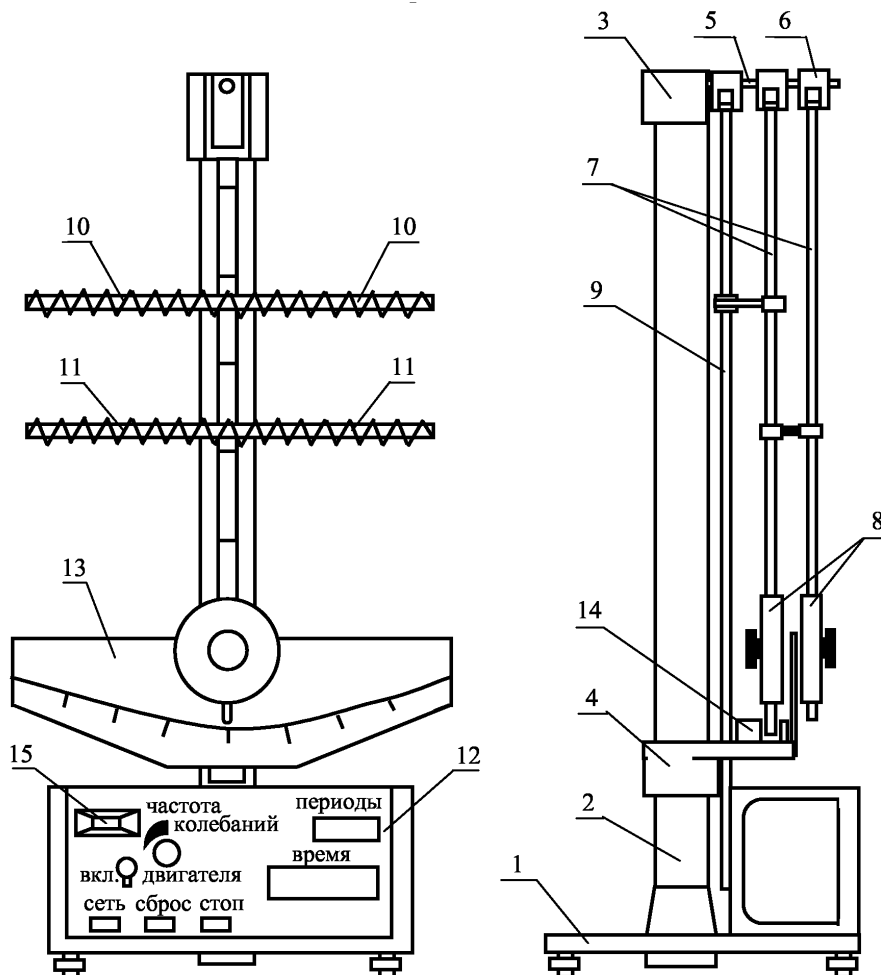


Рис. 2.2.7. FPM-13 «Зв'язані маятники»

2.3. Фізичні установки з механіки

Установка Лермантова (рис. 2.3.1) призначена для дослідження деформації розтягу металевої нитки. Досліджувана сталевана нитка *1* своїм верхнім кінцем міцно закріплена на кронштейні *К*. До нижнього кінця нитки прикріплено циліндр *2*. Деформація повздовжнього розтягу нитки здійснюється під дією тягарців *3*. Щоб уникнути впливу прогину кронштейна *К* на величину деформації нитки, до кронштейна на двох окремих нитках прикріплено утримувач *4*. Завдяки такому кріпленню при перекладанні тягарців із утримувача на підвіс *5*, змінюється навантаження тільки досліджуваної нитки, загальне навантаження на кронштейн *К* не змінюється.

На нижньому кронштейні закріплено аретир, який піднімається за допомогою гвинта *A*. Звільнити нитку від аретира слід безпосередньо на час проведення вимірювань.

Деформація досліджуваної нитки вимірюється за кутом повороту пластини *б*, на кінці якої закріплено дзеркало *7*. Світловий промінь з освітлювача *8* падає на дзеркало, відбивається і падає на шкалу *B*. При повороті пластини *б* світловий промінь буде зміщуватись у вертикальному напрямі на величину *L*, яка вимірюється за допомогою шкали *B*.

Установка для перевірки рівняння Бернуллі (рис. 2.3.2) призначена для отримання потоку рідини, перевірки рівняння Бернуллі для цього потоку та визначення числа Рейнольдса. Трубка *1* змінного перерізу закріплена на штативі *2*. Найбільший діаметр трубки 40 мм, а найменший 4 мм. У цих місцях трубка сполучається з водяним манометром *3*. Якщо меж вимірювання водяного манометра недостатньо, то слід використати два водяні манометри, з'єднані послідовно.

До ширшого кінця трубки *1* за допомогою шлангу подається вода з крану або посудини, розміщеної вище установки. Від вузького кінця шланг відводять до раковини або посудини. Плавний перехід від найбільшого перерізу до найменшого трубки сприяє збереженню ламінарного потоку рідини. У місцях різких змін перерізу виникають завихрення, турбулентні потоки, і розподіл тисків у перерізах трубки не підкоряється рівнянню Бернуллі. Тому турбулентності треба уникати.

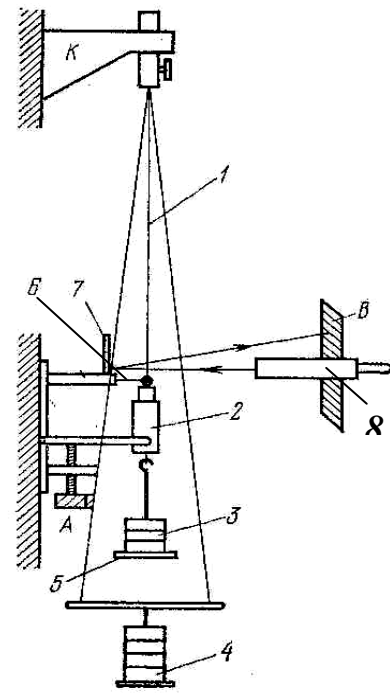


Рис. 2.3.1. Установка Лермантова

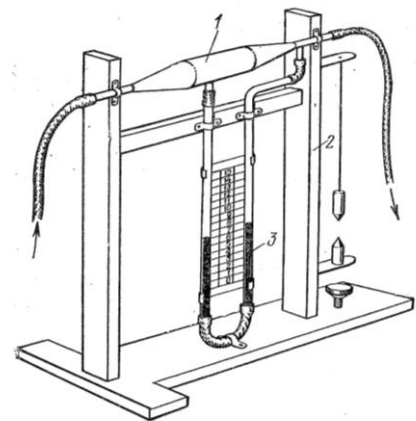


Рис. 2.3.2. Установка для перевірки рівняння Бернуллі

Розділ 3

Роботи лабораторного практикуму

3.1. Вимірювання густини речовини твердого тіла правильної геометричної форми

Мета роботи: 1) виміряти густину речовини трьох твердих тіл правильної геометричної форми: прямокутного паралелепіпеду, циліндру, кулі; 2) порівняти отримані значення густини з табличними даними.

Обладнання: тверді тіла правильної геометричної форми (прямокутний паралелепіпед, циліндр, куля), штангенциркуль, мікромметр, терези.

Теоретичні відомості. *Густина однорідної речовини* твердого тіла чисельно рівна відношенню маси тіла до його об'єму:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3.1.1)$$

Для *неоднорідної* речовини за формулою (3.1.1) визначають *середню густину речовини*.

Об'єм тіла правильної геометричної форми визначають за відомими формулами геометрії. Об'єм прямокутного паралелепіпеду визначається за формулою:

$$V = abc, \quad (3.1.2)$$

де a, b, c – лінійні розміри паралелепіпеду. Об'єм циліндра визначається за формулою:

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}, \quad (3.1.3)$$

де d – діаметр циліндра, h – висота. Об'єм кулі визначають за формулою:

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3, \quad (3.1.4)$$

де r – радіус кулі, d – діаметр кулі. Підставляючи (2) – (4) в (1), дістанемо:

$$\text{– для прямокутного паралелепіпеду: } \rho = \frac{m}{abc}; \quad (3.1.5)$$

$$\text{– для циліндра: } \rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}; \quad (3.1.6)$$

$$\text{– для кулі: } \rho = \frac{6m}{\pi d^3}. \quad (3.1.7)$$

Відповідно до (3.1.5) – (3.1.7) формули для розрахунку відносних похибок матимуть наступний вигляд:

$$\text{– для прямокутного паралелепіпеду: } \varepsilon_\rho = \frac{\Delta_m}{m} + \frac{\Delta_a}{a} + \frac{\Delta_b}{b} + \frac{\Delta_c}{c}; \quad (3.1.8)$$

$$\text{– для циліндра: } \varepsilon_\rho = \frac{\Delta_m}{m} + \frac{2\Delta_d}{d} + \frac{\Delta_h}{h}; \quad (3.1.9)$$

– для кулі:
$$\varepsilon_{\rho} = \frac{\Delta_m}{m} + \frac{3\Delta_d}{d}. \quad (3.1.10)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти масу m кожного з тіл за допомогою терезів не менше трьох разів.
2. Виміряти лінійні розміри (a, b, c, d, h) кожного з тіл за допомогою штангенциркуля або мікрометра не менше трьох разів.
3. Розрахувати середні арифметичні значення усіх вимірних величин.
4. Визначити абсолютні похибки Δ прямих вимірювань усіх величин.
5. Розрахувати густину речовини ρ , відносну ε_{ρ} та абсолютну Δ_{ρ} похибки вимірювання густини для трьох досліджуваних тіл.
6. Записати результати розрахунків густини. Виписати табличні значення густини $\rho_{\text{таб}}$ речовини для трьох досліджуваних тіл, порівняти з вимірними та зробити висновок про коректність результатів вимірювань. При відхиленнях розрахованого значення густини від табличного спробуйте пояснити чому так сталося.

Таблиця 3.1.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	Паралелепіпед				Циліндр			Куля			
	m	a	b	c	m	d	h	m	d		
1											
2											
3											
сер											
Δ											
Паралелепіпед				Циліндр				Куля			
Матеріал				Матеріал				Матеріал			
ρ	Δ_{ρ}	ε_{ρ}	$\rho_{\text{таб}}$	ρ	Δ_{ρ}	ε_{ρ}	$\rho_{\text{таб}}$	ρ	Δ_{ρ}	ε_{ρ}	$\rho_{\text{таб}}$

Контрольні запитання та завдання

1. Дати визначення поняттю «густина речовини».
2. Від чого залежить густина речовини?
3. Що таке однорідна та неоднорідна речовина?
4. Як визначити густину речовини тіла неправильної геометричної форми?
5. Які ще є методи вимірювання густини речовини?
6. Пояснити метод ноніусу.
7. Пояснити метод мікрометричного гвинта.

3.2. Дослідження рівномірного та рівноприскореного рухів матеріальної точки

Мета роботи: 1) спостерігати рівномірний та рівноприскорений рухи тіла на приладі Атвуда; 2) побудувати графік зміни переміщення з часом при прямолінійному рівномірному русі та визначити швидкість рівномірного руху; 3) визначити прискорення прямолінійного рівноприскореного руху; 4) перевірити, чи залежить прискорення від переміщення та часу.

Обладнання: прилад Атвуда, терези.

Теоретичні відомості. Дослідити певний вид руху – означає визначити основні параметри, які задають цей рух. Для прямолінійного рівномірного руху таким параметром є швидкість \vec{v} , а для прямолінійного рівноприскореного руху – прискорення \vec{a} .

У роботі пропонується визначити параметри рівномірного та рівноприскореного рухів за допомогою приладу Атвуда, принципова схема якого зображена на рис. 3.2.1.

Через нерухомий блок проходить нитка із двома однаковими циліндрами на кінцях (масою M кожний). При цьому система знаходиться в стані рівноваги. Якщо на один з циліндрів покласти невеликий додатковий тягар масою m , то вся система масою $2M + m$ отримає під дією прикладених сил (сили тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$, та сили реакції нитки \vec{F}_p) *стале прискорення \vec{a}* і, пересуваючись з цим прискоренням із стану спокою на першій ділянці, здійснить за час τ переміщення

$$h = \frac{a\tau^2}{2}. \quad (3.2.1)$$

та набуде швидкості

$$v = a\tau. \quad (3.2.2)$$

Далі, циліндр проходить крізь закріплене кільце, яке затримує додатковий тягар. Коли додатковий тягар буде знятий, циліндр здійснить за час t , тепер вже при *рівномірному русі*, переміщення

$$H = vt. \quad (3.2.3)$$

Графічно зміну переміщення з часом $H(t)$ для прямолінійного рівномірного руху можна зобразити прямою (рис. 3.2.2), що проходить через початок координат, а швидкість буде дорівнювати тангенсу кута нахилу цієї прямої до осі абсцис.

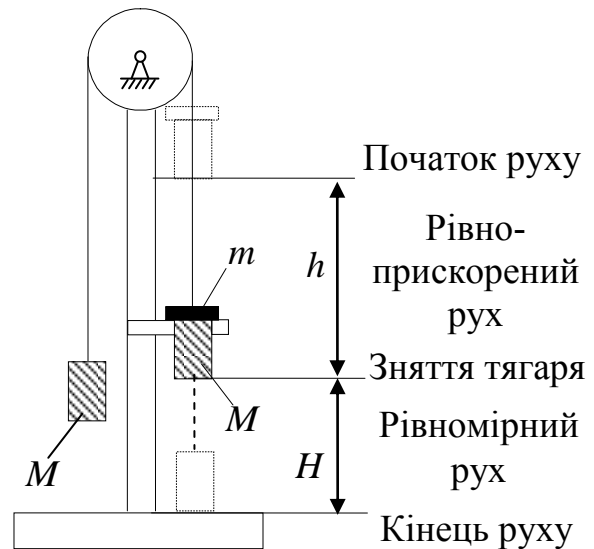


Рис. 3.2.1. Принципова схема приладу Атвуда

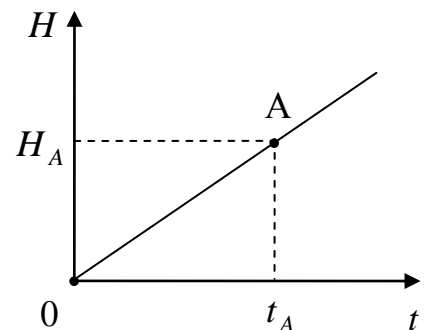


Рис. 3.2.2. Графік зміни переміщення з часом при прямолінійному рівномірному русі

Тобто, взявши довільну точку А на графіку, швидкість можна визначити за формулою:

$$v = \frac{H_A}{t_A}. \quad (3.2.4)$$

Якщо абсолютні похибки вимірювання часу та переміщення в усіх точках будуть приблизно однакові, то відносну похибку вимірювання швидкості можна оцінити за формулою:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta_t}{t_A} + \frac{\Delta_H}{H_A}. \quad (3.2.5)$$

Значення прискорення циліндра при рівноприскореному русі можна отримати з (3.2.1) – (3.2.3):

$$a = \frac{H^2}{2ht^2}. \quad (3.2.6)$$

Відповідно, відносна похибка вимірювання прискорення буде розраховуватися за формулою:

$$\varepsilon_a = \frac{2\Delta_t}{t} + \frac{2\Delta_H}{H} + \frac{\Delta_h}{h}. \quad (3.2.7)$$

Порядок виконання роботи

1. Пересуваючи середній та верхній кронштейни на приладі Атвуда, встановити відстань між нижнім та середнім кронштейнами H_1 і відстань між середнім та верхнім кронштейнами h_1 , відповідно до індивідуальних завдань.
2. Перемістити правий циліндр у верхнє положення та сумістити нижню грань правого циліндра з рисою на верхньому кронштейні (для цього скористатись додатковим механізмом, закріпленому на верхньому кронштейні). Покласти на правий циліндр тягар, відповідно до індивідуальних завдань. Ввімкнути прилад у мережу.
3. Виміряти час t_1 руху правого циліндра на ділянці рівномірного руху за допомогою електронного секундоміра на приладі Атвуда.
4. Пункти 2-3 виконати не менше п'яти разів, кожного разу зміщуючи середній та верхній кронштейни на 1 см вгору.
5. Перемістити верхній кронштейн до максимуму вгору, а середній – не чіпати. Визначити при цьому значення H_6 , h_6 , t_6 .
6. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань переміщень Δ_h , Δ_H та часу Δ_t .
7. Нанести отримані експериментальні значення висоти H та часу t у системі координат $H(t)$, апроксимувати їх прямою лінією, з отриманого графіка визначити швидкість v на ділянці рівномірного руху та оцінити відносну ε_v та абсолютну Δ_v похибки її вимірювання.
8. Розрахувати значення прискорення a_1 циліндрів при рівноприскореному русі, використавши дані п'ятого дослідження (H_5 , h_5 , t_5) та значення прискорення a_2 , використавши дані шостого дослідження (H_6 , h_6 , t_6).

9. Розрахувати відносні та абсолютні похибки вимірювання прискорення.

10. Проаналізувати отриманий графік та зробити висновок про те, чи дійсно спостерігався рівномірний рух. Записати результати розрахунків швидкості. Записати результати розрахунків прискорень a_1 та a_2 . Перевірити, чи залежить прискорення від переміщення та часу. Для цього перевірити, чи виконується нерівність $|a_1 - a_2| \leq (\Delta_{a1} + \Delta_{a2})$ та зробити висновок про те, чи дійсно спостерігався рівноприскорений рух.

Таблиця 3.2.1. Результати вимірювань та розрахунків

№		H		h		t_1				
1										
2										
3										
4										
5										
6										
Δ										
v	ε_v	Δ_v	a_1	ε_{a1}	Δ_{a1}	a_2	ε_{a2}	Δ_{a2}	$ a_1 - a_2 $	$\Delta_{a1} + \Delta_{a2}$

Таблиця 3.2.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	H_1 , см	h_1 , см	m , г
1, 6	15	19	14
2, 7	16	18	16
3, 8	17	17	14
4, 9	18	16	16
5, 10	19	15	14

Контрольні запитання та завдання

1. Дати означення прямолінійного рівномірного руху.
2. Що таке швидкість?
3. Як змінюється переміщення, швидкість та прискорення з часом при рівномірному русі?
4. Дати означення прямолінійного рівноприскореного руху.
5. Що таке прискорення? Від чого воно залежить?
6. Як змінюється переміщення, швидкість та прискорення з часом при рівноприскореному русі?
7. Дати означення миттєвої швидкості.
8. Що таке середня швидкість?
9. Вивести формулу 3.2.6.

3.3. Вимірювання коефіцієнта тертя ковзання

Мета роботи: 1) спостерігати явище тертя ковзання; 2) виміряти коефіцієнт тертя ковзання за допомогою трибометра; 3) перевірити закон Амонтона-Кулона.

Обладнання: трибومتر, брусок, чашка, додаткові тягарі по 100 г., набір тягарців, молоток, терези.

Теоретичні відомості. Тертя ковзання виникає при русі одна відносно одної двох твердих поверхонь, що дотикаються. Відповідно до закону Амонтона-Кулона сила тертя ковзання пропорційна силі нормальної реакції і не залежить ані від площі поверхонь, що дотикаються, ані від швидкості відносного руху:

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (3.3.1)$$

де N – модуль сили нормальної реакції, μ – коефіцієнт тертя ковзання.

Коефіцієнт тертя μ залежить від матеріалу тіл, що взаємодіють, від якості обробки поверхонь, забруднення і змащення. Закон Амонтона-Кулона можна застосовувати для наближеного розрахунку сил тертя при не досить великих швидкостях і тисках.

Для вимірювання сил тертя можна використовувати трибومتر, що являє собою площину (рис. 3.3.1), кут нахилу α якої може змінюватися. На площині встановлено ролик для нитки, до якої з одного кінця приєднаний брусок масою m_6 , що рухається по площині, а з іншого – чашка масою $m_ч$ з тягарцями масою $m_т$.

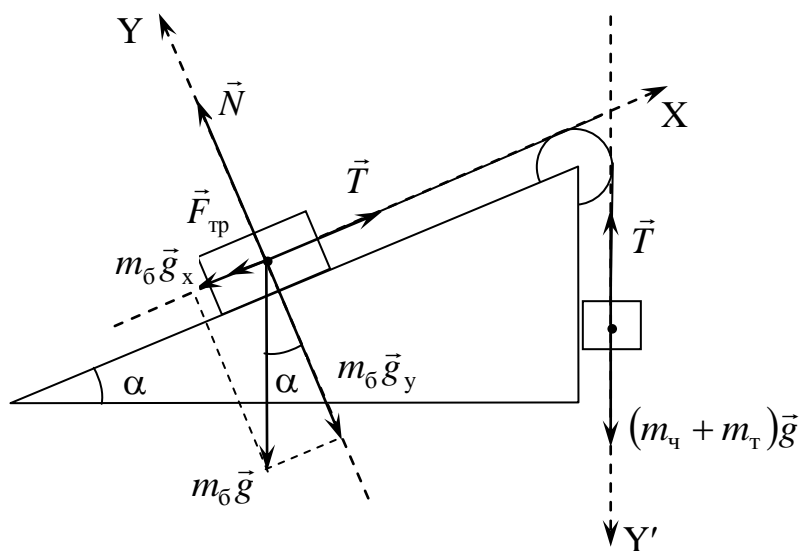


Рис. 3.3.1. Рух тіла по похилій площині

Розглянувши сили, які діють на брусок та тягарець (рис. 3.3.1) при рівномірному русі бруска вгору, а тягарця вниз, можна записати другий закон Ньютона для цих двох тіл:

$$\begin{cases} m_6 \vec{g} + \vec{N} + \vec{T} + \vec{F}_{\text{тр}} = 0 \\ (m_ч + m_т) \vec{g} + \vec{T} = 0 \end{cases} \quad (3.3.2)$$

Запишемо (3.3.2) в проекціях на осі:

$$\begin{cases} N = m_6 g \cos \alpha \\ T = m_6 g \sin \alpha + \mu N \\ T = (m_ч + m_т) g \end{cases} \quad (3.3.3)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.3.3) отримаємо вираз для визначення коефіцієнта тертя ковзання μ :

$$\mu_1 = \frac{m_ч + m_т}{m_6 \cos \alpha_1} - \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (3.3.4)$$

Аналогічно виводиться формула для визначення μ під час рівномірного руху бруска вниз, а чашки з тягарцями вгору:

$$\mu_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 - \frac{m_ч + m_т}{m_6 \cos \alpha_2}. \quad (3.3.5)$$

Якщо брусок рухатиметься рівномірно вниз без чашки з тягарцями, то (3.3.5) набуде вигляду:

$$\mu_3 = \operatorname{tg} \alpha_3 \quad (3.3.6)$$

Кут нахилу, що визначається рівністю (3.3.6), називається *кутом тертя*, а умовою збереження системи тіл у спокої за рахунок сил тертя є *нахил площини під кутом менше кута тертя*. Цією умовою широко користуються в техніці, і зокрема, різьба на болтах і гайках, в домкратах і пресах повинна бути менше кута тертя (з урахуванням змащення), щоб гвинти і гайки самі не розкручувалися, домкрати утримували піднятий вантаж, а прес зберігав наданий при закручуванні гвинта тиск.

Для перевірити закону Амонтона-Кулона можна навантажити брусок додатковим тягарем, повторити дослід і знову визначити коефіцієнт тертя ковзання μ' . Згідно з законом Амонтона-Кулона, сила тертя ковзання прямо пропорційна

силі нормальної реакції, тобто відношення $\frac{F_{\text{тр}}}{N}$, яке і дорівнює коефіцієнту тертя ковзання, має не змінитися при навантаженні бруска.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти маси бруска m_6 та чашки $m_ч$ за допомогою терезів.

2. Відпустити затискач трибометра, підняти площину у верхнє положення і затиснути. Покласти брусок на площину, причепити до нього через нитку чашку з тягарцями масою не більше 1/2 маси бруска. Відпустити затискач і повільно зменшувати кут нахилу площини до тих пір, поки брусок не почне ковзати вгору. Для подолання явища застою постукувати молоточком по пластині. Виміряти кут, під яким нахилена площина α_1 , за допомогою шкали на трибометрі.

3. Встановити площину в горизонтальне положення. Підібрати тягарці масою не більше 1/4 маси бруска. Повільно підіймаючи площину і, постукуючи молоточком по пластині, знайти кут α_2 , при якому брусок починає ковзати вниз по пластині.

4. Покласти брусок без чашки на середину пластини, повільно підіймаючи та постукуючи по пластинці, знайти кут нахилу α_3 , при якому брусок починає ковзати вниз.

5. Покласти на брусок додатковий тягар згідно з індивідуальними завданнями і повторити пункти 2 – 4. При цьому визначити $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3$.

6. Розрахувати значення коефіцієнта тертя ковзання для бруска без тягара μ_1, μ_2 та μ_3 окремо та знайти середнє значення μ . Розрахувати абсолютну похибку Δ_μ як для прямого вимірювання, а також відносну похибку ε_μ .

7. Розрахувати значення коефіцієнта тертя ковзання для бруска з тягарем μ'_1, μ'_2 та μ'_3 окремо та знайти середнє значення μ' . Розрахувати абсолютну похибку $\Delta_{\mu'}$ як для прямого вимірювання, а також відносну похибку $\varepsilon_{\mu'}$.

8. Записати результати розрахунків коефіцієнту тертя ковзання. Проаналізувати отриманий результат, використовуючи табличні значення коефіцієнтів тертя ковзання. Перевірити, чи виконується нерівність $|\mu - \mu'| \leq (\Delta_\mu + \Delta_{\mu'})$ і зробити висновок про виконання закону Амонтона-Кулона.

Таблиця 3.3.1. Результати вимірювань та розрахунків

Дослід	$m_{\text{ч}}$	$m_{\text{т}}$	Без додаткового тягара			$m'_{\text{т}}$	З додатковим тягарем		
			$m_{\text{б}}$	α	μ		$m'_{\text{б}}$	α'	μ'
Рух вгору									
Рух вниз									
Рух без чашки									
μ	Δ_μ	ε_μ	μ'	$\Delta_{\mu'}$	$\varepsilon_{\mu'}$	$ \mu - \mu' $	$\Delta_\mu + \Delta_{\mu'}$		

Таблиця 3.3.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	Маса додаткового тягара, г
1, 4, 7, 10	100
2, 5, 8	200
3, 6, 9	300

Контрольні запитання та завдання

1. У чому полягає явище тертя? Які є види тертя?
2. Пояснити виникнення тертя ковзання.
3. Від чого залежить коефіцієнт тертя ковзання?
4. Де використовується і де шкодить явище тертя?
5. Перерахуйте способи зменшення сили тертя.

3.4. Вимірювання коефіцієнта тертя кочення

Мета роботи: 1) спостерігати явище тертя кочення; 2) виміряти коефіцієнт тертя кочення за допомогою похилого маятника.

Обладнання: установка FPM-07 (похилий маятник), набір пластин та куль, мікрометр.

Теоретичні відомості. Тертя кочення виникає під час кочення циліндричного або сферичного тіла по поверхні іншого тіла. Ш. Кулон дослідним шляхом встановив, що модуль сили тертя кочення $\vec{F}_{\text{тр}}$ прямо пропорційний модулю сили нормальної реакції \vec{N} і обернено пропорційний радіусу R циліндра (кулі, колеса):

$$F_{\text{тр коч}} = \mu_{\text{к}} \frac{N}{R}, \quad (3.4.1)$$

де $\mu_{\text{к}}$ – коефіцієнт тертя кочення. Коефіцієнт тертя кочення не залежить від швидкості кочення і радіусу циліндра, а залежить від матеріалів, з яких виготовлені взаємодіючі тіла, стану їх поверхонь тощо.

Для дослідження тертя кочення в даній роботі використовується *метод похилого маятника*, запропонований А. С. Ахматовим. Похилим називають математичний маятник, у якого площина коливання кульки нахилена під кутом до горизонту, що дає змогу кульці котитися по спеціальній пластині (рис. 3.4.1).

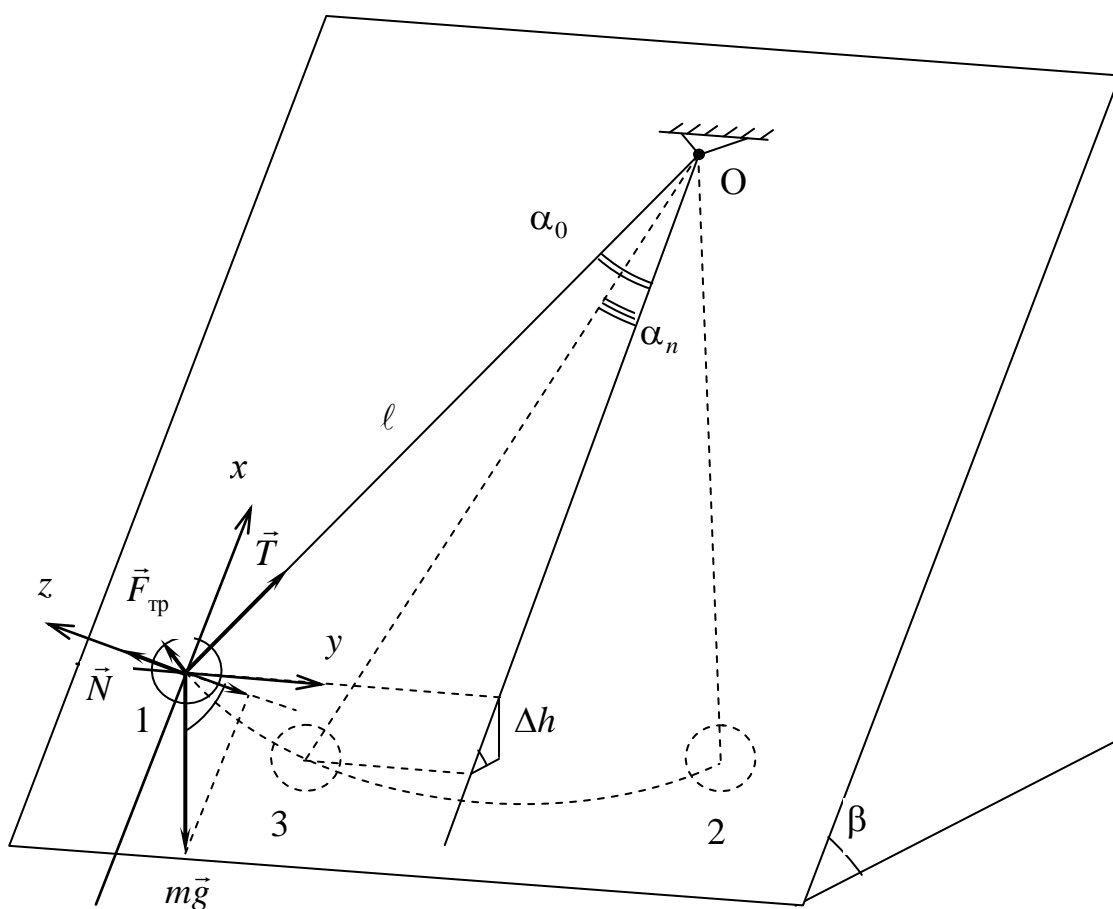


Рис. 3.4.1. Принципова схема похилого маятника

Формулу для розрахунку μ_k можна отримати із закону про зміну повної механічної енергії. За n повних коливань кулька із положення 1 переміститься в положення 3. Зміна повної механічної енергії ΔE при цьому буде рівна роботі сил опору A на подолання деякого шляху s :

$$\Delta E = A. \quad (3.4.2)$$

Кінетична енергія в точках 1 і 2 рівна нулю, силами опору середовища і тертя в підвісі маятника нехтуємо. Тому формула (3.4.2) матиме такий вигляд:

$$mg\Delta h = F_{\text{тр}}s. \quad (3.4.3)$$

Зміна висоти кульки відносно основи установки дорівнює

$$\Delta h = (\ell \cos \alpha_n - \ell \cos \alpha_0) \sin \beta. \quad (3.4.4)$$

Враховуючи невелику різницю між α_0 та α_n , а також їх малість, шлях, що пройшла кулька за n повних коливань, дорівнює

$$s \approx 2n(\ell \alpha_0 + \ell \alpha_n), \quad (3.4.5)$$

де α_0 та α_n в радіанах.

Якщо провести осі координат так, як показано на рис. 3.4.1 (початок співпадає з центром мас кулі в початковому положенні, осі OX та OY знаходяться в площині руху центра мас кулі, а вісь OZ перпендикулярна до цієї площини), і зобразити сили, які діють на тіло, то можна визначити силу нормальної реакції:

$$N = mg \cos \beta, \quad (3.4.6)$$

Підставляючи (3.4.6) в (3.4.1), а потім (3.4.1), (3.4.4), (3.4.5) в (3.4.3) і зробивши деякі математичні перетворення, отримуємо

$$\mu_k = \frac{d \operatorname{tg} \beta (\cos \alpha_n - \cos \alpha_0)}{4n(\alpha_0 + \alpha_n)}, \quad (3.4.7)$$

де d – діаметр кулі. Використовуючи формулу для різниці тригонометричних функцій

$$\cos \alpha_n - \cos \alpha_0 = 2 \sin \frac{\alpha_n + \alpha_0}{2} \sin \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{2},$$

а також враховуючи малість кутів α_0 та α_n , а саме:

$$\sin \frac{\alpha_n + \alpha_0}{2} \approx \frac{\alpha_n + \alpha_0}{2}, \quad \sin \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{2} \approx \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{2} \text{ в радіанах,}$$

формулу (3.4.7) перепишемо так:

$$\mu_k \approx d \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{8n}, \quad (3.4.8)$$

де кути α_0 та α_n в радіанах.

Порядок виконання роботи

1. Закріпити першу кульку та першу пластину з тих, які вказані в індивідуальних завданнях. За допомогою верхнього кронштейна встановити довжину маятника так, щоб куля дотикалася з геометричним центром поверхні пластини. Нахилити маятник на кут β , що заданий в індивідуальних завданнях.

2. Виміряти діаметр d кулі за допомогою мікрометра не менше трьох разів.

3. Відхилити кулю на будь-який кут $\alpha_0 < 10^\circ$. Відпустити кулю (**не штовхаючи!**). Після n повних коливань (n задається в індивідуальних завданнях) визначити кут α_n відхилення кулі від положення рівноваги. Перевести одиниці вимірювання кутів α_0 та α_n в радіани за формулою $\alpha(\text{рад}) = \frac{\pi}{180} \alpha(\text{град})$.

4. Повторити попередній пункт ще два рази для інших кутів α_0 (але пам'ятаючи, що α_0 не повинен перевищувати 10°).

5. Повторити пункти 2 – 4 для першої кульки та другої пластини, а потім для другої кульки та першої пластини.

6. Для першої кулі та першої пластини розрахувати коефіцієнт тертя кочення для кожного досліду окремо і знайти його середнє значення μ_k . Розрахувати абсолютну похибку Δ_μ як для прямого вимірювання, а також відносну похибку ε_μ . Аналогічні розрахунки провести і для інших куль і пластин.

7. Записати результати вимірювання для трьох пар «куля-пластина». Порівняти отримані значення з табличними. Порівняти коефіцієнти тертя кочення для різних речовин та зробити висновок про залежність коефіцієнта тертя кочення від речовини.

Таблиця 3.4.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	n	d	α_0	α_n	μ_k	Δ_μ	ε_μ
Матеріал кулі:				Матеріал пластини:			
1							
2							
3							
сер	–	–	–	–			
Матеріал кулі:				Матеріал пластини:			
1							
2							
3							
сер	–	–	–	–			
Матеріал кулі:				Матеріал пластини:			
1							
2							
3							
сер	–	–	–	–			

Таблиця 3.4.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	β	n	№ кулі	№ пластини
1, 6	20°	6	1, 2	3, 4
2, 7	30°	7	3, 4	2, 1
3, 8	40°	8	1, 4	1, 3
4, 9	20°	9	2, 3	1, 4
5, 10	30°	10	2, 4	2, 3

Контрольні запитання та завдання

1. У чому полягає явище тертя? Які є види тертя?
2. Пояснити виникнення тертя кочення.
3. Чому коефіцієнт тертя кочення має лінійну розмірність?
4. Від чого залежить коефіцієнт тертя кочення і як саме?
5. Де використовується і де шкодить тертя кочення?

3.5. Вимірювання модуля Юнга твердого тіла

Мета роботи: 1) спостерігати деформацію розтягу; 2) виміряти модуль Юнга металевої нитки методом деформації розтягу за допомогою приладу Лермантова; 3) порівняти виміряне значення модуля Юнга з табличним для даного матеріалу.

Обладнання: прилад Лермантова, набір тягарців, мікрометр.

Теоретичні відомості. Одним з видів пружних деформацій є деформація розтягу. Характеристикою деформації розтягу є *механічна напруга (напруження)* σ – фізична величина, яка чисельно дорівнює силі пружності $F_{\text{пр}}$, що діє на одиницю площі S перерізу тіла, нормального до напрямку дії цієї сили. Отже,

$$\sigma = \frac{F_{\text{пр}}}{S}. \quad (3.5.1)$$

Механічна напруга σ тіла виникає в результаті відносного видовження тіла ε , яке, в свою чергу, спричинене деформацією розтягу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}, \quad (3.5.2)$$

де ℓ – початкова довжина тіла (стержня, нитки та ін), $\Delta \ell$ – абсолютне видовження цього тіла.

Відповідно до закону Гука механічна напруга прямо пропорційна відносному видовженню тіла:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.5.3)$$

де E – модуль пружності (модуль Юнга). Підставивши (3.5.1) і (3.5.2) в (3.5.3), отримаємо

$$E = \frac{F_{\text{пр}} \cdot \ell}{S \cdot \Delta \ell}. \quad (3.5.4)$$

Якщо тілом є сталевий нитка, діаметром d , на якій підвішений тягарець, масою m , тоді:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad F_{\text{пр}} = mg. \quad (3.5.5)$$

Підставивши (3.5.5) в (3.5.4), отримаємо

$$E = \frac{4mg\ell}{\pi d^2 \Delta \ell}. \quad (3.5.6)$$

Знаходження $\Delta\ell$ у приладі Лермантова здійснюється оптичним методом (рис. 3.5.1).

Нитка розтягується на величину $EF = \Delta\ell$ і змушує повернутися дзеркало BD на кут $\angle EDF$. Тоді абсолютна деформація нитки дорівнює $\Delta\ell = DF \cdot \sin\angle EDF \approx a \cdot \angle EDF$, де $a \approx DF$ – довжина пластини, приєднаної до дзеркала. Цей кут малий і для його вимірювання на дзеркало падає промінь AB з лазерного джерела, відбивається від дзеркала і відбитий промінь BC падає на шкалу AC. Кут $\angle EDF = \angle AEG \approx \text{tg}\angle AEG = AG/AB \approx L/2b$, де $b = AB$ – відстань від дзеркала до шкали, $L = AC$ – зміщення променя на шкалі.

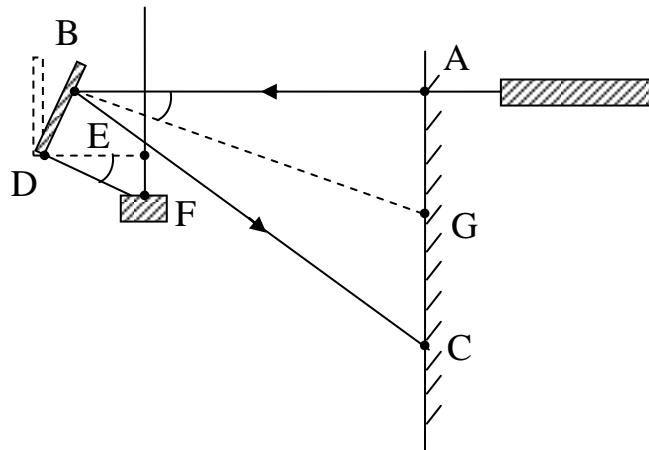


Рис. 3.5.1. Принципова схема вимірювання деформації у приладі Лермантова

Тоді абсолютну деформацію наближено можна оцінити так:

$$\Delta\ell = \frac{aL}{2b}. \quad (3.5.7)$$

Підставивши (3.5.7) в (3.5.6), отримаємо

$$E = \frac{8mglb}{\pi d^2 aL}. \quad (3.5.8)$$

Відносна похибка вимірювання модуля Юнга розраховується за формулою:

$$\varepsilon_E = \frac{\Delta\ell}{\ell} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta m}{m}. \quad (3.5.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Відпустити аретир. Відрегулювати прилад так, щоб падаючий на дзеркало промінь та відбитий лежали у горизонтальній площині.
2. Виміряти довжину нитки ℓ та довжину пластини a не менше трьох разів.
3. Виміряти діаметр нитки d за допомогою мікрометра не менше трьох разів.
4. Підвісити тягарі масою m відповідно до індивідуальних завдань.
5. Виміряти зміщення променя L по шкалі та відстань b від дзеркала до шкали не менше трьох разів.
6. Звільнити нитку від тягарців та підняти аретир.
7. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань всіх величин.

8. Визначити модуль Юнга, відносну та абсолютну похибки вимірювання.
9. Записати результати вимірювання модуля Юнга. Порівняти отримані результати з табличними даними та зробити висновок про коректність результату.

Таблиця 3.5.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	m	ℓ	a	L	b	d
1						
2						
3						
сер						
Δ						
E	Δ_E		ε_E		$E_{\text{табл}}$	

Таблиця 3.5.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	m , кг
1, 6	0,6
2, 7	0,7
3, 8	0,8
4, 9	0,9
5, 10	1

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке деформація? Які деформації називають пружними, а які пластичними?
2. Які є види пружних деформації? Пояснити їх механізм виникнення.
3. Сформулювати закон Гука для деформації розтягу.
4. Пояснити фізичний зміст модуля Юнга.

3.6. Вимірювання прискорення вільного падіння

Мета роботи: 1) виміряти прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника з біфілярним підвісом; 2) порівняти виміряне значення прискорення вільного падіння з табличним для даної широти місцевості.

Обладнання: установка FPM-04 (математичний маятник).

Теоретичні відомості. Математичний маятник являє собою матеріальну точку, підвішену на невагомій нерозтяжній нитці. Деяким наближенням до математичного маятника буде пристрій, який складається з невеликої важкої кульки, підвішеної на довгій, тонкій, легкій, мало розтяжній нитці. Якщо кулька підвішена не на одній нитці, а на двох, то такий підвіс називають *біфілярним*.

Якщо кут φ відхилення маятника буде малим (до 10°), коливання будуть близькими до гармонічних і період коливань буде мати такий вигляд:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad (3.6.1)$$

де T – період коливань, ℓ – відстань від точки підвісу до положення рівноваги, g – прискорення вільного падіння.

З цієї формули випливає, що якщо виміряти довжину маятника та період його коливань, можна визначити прискорення вільного падіння:

$$g = 4\pi^2 \frac{\ell}{T^2}. \quad (3.6.2)$$

Підставивши в (3.6.2) формулу для періоду коливань: $T = t/n$, де t – час, за який маятник здійснив n коливань, отримаємо остаточно:

$$g = 4\pi^2 \frac{\ell n^2}{t^2}. \quad (3.6.3)$$

де t – час n коливань. Відповідно відносна похибка вимірювання прискорення вільного падіння рівна:

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta\ell}{\ell} + 2\frac{\Delta t}{t}. \quad (3.6.4)$$

Порядок виконання роботи

1. Розмістити фотодатчик та кульку на заданій в індивідуальних завданнях довжині ℓ так, щоб кулька вільно проходила крізь фотодатчик і не торкалась його. Відхилити кульку на малий кут ($\leq 10^\circ$) та відпустити кульку, не штовхаючи її.

2. Виміряти час t , за який кулька здійснить n коливань (n задано в індивідуальних завданнях).

3. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань всіх величин.

4. Розрахувати середні арифметичні значення всіх вимірених величин.

5. Розрахувати прискорення вільного падіння g , відносну ε_g та абсолютну Δ_g похибки вимірювання.

6. Записати результати вимірювання. Порівняти отримане значення прискорення вільного падіння з табличним $g_{\text{табл}}$ для даної широти місцевості та зробити висновки про коректність результату.

Таблиця 3.6.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	ℓ	t	n
1			
2			
3			
сер			
Δ			
g	Δ_g	ε_g	$g_{\text{табл}}$

Таблиця 3.6.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	n	l , см
1, 6	10	35
2, 7	15	40
3, 8	20	45
4, 9	25	50
5, 10	10	40

Контрольні запитання та завдання

1. Який рух називається коливальним, гармонічним коливальним?
2. Записати рівняння гармонічних коливань, дати означення таких величин: амплітуда, частота, період, фаза, початкова фаза коливань.
3. Від чого залежить період коливань математичного маятника?
4. Описати перетворення енергії при коливаннях математичного маятника.
5. Що таке прискорення вільного падіння і як воно пов'язане з напруженістю гравітаційного поля?
6. Від чого залежить прискорення вільного падіння?

3.7. Перевірка основного закону обертового руху

Мета роботи: 1) спостерігати обертовий рух на приладі Обербека; 2) перевірити пропорційність кутового прискорення моменту сили при сталому моменту інерції тіла.

Обладнання: установка FPM-06 (прилад Обербека), штангенциркуль.

Теоретичні відомості. Згідно основного закону динаміки обертового руху:

$$\varepsilon = \frac{M_Z}{I_Z}, \quad (3.7.1)$$

де I_Z – момент інерції тіла відносно осі обертання, ε – кутове прискорення тіла відносно тієї ж осі, M_Z – сума моментів прикладених сил відносно тієї ж осі.

Для перевірки основного рівняння обертового руху на приладі Обербека встановлено: маховик, що являє собою 4 стержні, закріплені на диску; 4 циліндри, масою m , по одному на кожному стержні; тягар, масою m_0 , який з'єднаний з диском ниткою. Момент сили M_Z , що діє на маховик відносно осі обертання Z під час падіння тягара можна змінювати, змінюючи масу m_0 , а момент інерції I_Z маховика відносно осі обертання можна змінювати пересуваючи циліндри вздовж стержнів.

На падаючий тягар діють дві сили: сила тяжіння $m_0 \vec{g}$, та сила пружності з боку нитки \vec{T} . Запишемо другий закон Ньютона для тягара у проекціях на вісь, напрямлену вертикально вниз:

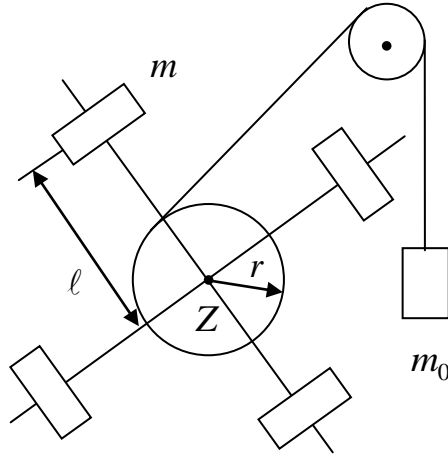


Рис. 3.7.1. Принципова схема приладу Обербека

$$T = m_0(g - a). \quad (3.7.2)$$

Сила \vec{T} діє також на диск маховика. Її момент відносно осі обертання буде дорівнювати

$$M_Z = Tr = m_0 r(g - a), \quad (3.7.3)$$

де r – радіус диску, I_Z – момент інерції маховика відносно осі обертання, ε – його кутове прискорення.

Якщо вважати, що намотана на диск нитка нерозтяжна і розмотується без тертя ковзання з його поверхні, то прискорення точок вала, як і точок нитки, дорівнює a (для точок поверхні вала це дотичне прискорення). Якщо тягар m_0 за час t падає з висоти h , то його прискорення буде рівним

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (3.7.4)$$

Треба мати на увазі, що ми при цьому нехтували опором повітря, тобто вважали, що тягарець рухається рівноприскорено. Це прискорення пов'язано з кутовим прискоренням вала ε формулою

$$\varepsilon = \frac{a}{r}, \quad (3.7.5)$$

Підставивши (3.7.4) в (3.7.3), а (3.7.5) і (3.7.3) в (3.7.1), отримаємо вираз для моменту інерції маховика відносно осі обертання:

$$I_Z = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{m_0 r^2 (gt^2 - 2h)}{2h}. \quad (3.7.6)$$

Згідно з основним законом обертального руху, при сталому моменті інерції відношення моменту сили до кутового прискорення має не змінюватися:

$$\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = I_Z = \text{const}, \quad (3.7.8)$$

тобто,

$$I_Z = m_0 r^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right) = \text{const}. \quad (3.7.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Встановити циліндри на відстані ℓ від осі обертання маховика відповідно до індивідуальних завдань (врахувати, що відстань між позначками на стержнях – 1 см). Пересунути верхній кронштейн на висоту h , задану в індивідуальних завданнях.

2. Прикріпити тягарець масою m_{01} відповідно до індивідуальних завдань.

3. Виміряти час руху тягарця t_1 не менше трьох разів.

4. Виконати пункти 2 – 3 для маси тягарців m_{02} та виміряти час руху тягарця t_2 не менше трьох разів.

5. Розрахувати момент інерції маховика I_{Z1} за маси m_{01} для кожного з трьох дослідів окремо і знайти їх середнє арифметичне значення. Розрахувати момент інерції маховика I_{Z2} за маси m_{02} для кожного з трьох дослідів окремо і знайти їх середнє арифметичне значення.

6. Розрахувати абсолютні похибки вимірювання моменту інерції як для прямих вимірювань, а також розрахувати відносні похибки вимірювань.

7. Записати результати розрахунків. Перевірити, чи залишився сталим момент інерції після зміни моменту сили. Для цього перевірити, чи виконується нерівність $|I_{Z1} - I_{Z2}| \leq (\Delta_{I1} + \Delta_{I2})$ і зробити висновок про виконання основного закону динаміки обертального руху.

Таблиця 3.7.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	r	h	m_{01}	t_1	m_{02}	t_2	
1							
2							
3							
I_{Z1}	Δ_{I1}	ε_{I1}	I_{Z2}	Δ_{I2}	ε_{I2}	$ I_{Z1} - I_{Z2} $	$\Delta_{I1} + \Delta_{I2}$

Таблиця 3.7.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	h , см	m_{01} , Г	m_{02} , Г	ℓ , см
1, 6	45	54+86	54+43	14
2, 7	40	54+43	54+86	16
3, 8	35	54+43	54+86	17
4, 9	30	54+86	54+43	18
5, 10	45	54+43	54+86	19

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке момент інерції матеріальної точки та тіла відносно осі обертання?

2. Що таке кутова швидкість? Як вона пов'язана з лінійною швидкістю тіла, що обертається?

3. Записати основне рівняння динаміки обертального руху.

4. Як визначається момент інерції відносно осей, які не проходять крізь центр мас тіла?

5. Як визначають зв'язок між кутовим та тангенціальним прискоренням тіла, що обертається?

6. Чи зміниться кутова швидкість обертання маховика при зміні положення циліндрів на стержнях?

3.8. Вимірювання моменту інерції твердого тіла

Мета роботи: 1) спостерігати рух фізичного маятника; 2) визначити теоретичне та експериментальне значення моменту інерції тіла правильної геометричної форми та порівняти між собою; 3) визначити момент інерції тіла не правильної геометричної форми.

Обладнання: тіла правильної геометричної форми, тіло неправильної геометричної форми, секундомір, терези, лінійка, штангенциркуль.

Теоретичні відомості. Моментом інерції твердого тіла відносно осі називають величину, яка характеризує його інертні властивості при обертальному русі. Момент інерції залежить не тільки від маси тіла, а також від його форми, розмірів, положення осі обертання. Момент інерції I_Z матеріальної точки маси m відносно осі Z дорівнює

$$I_Z = mr^2,$$

де r – відстань від точки до осі.

Для тіл правильної геометричної форми момент інерції можна визначити простим інтегруванням по об'єму тіла:

$$I_Z = \rho \int_V r^2 dV,$$

де ρ – густина тіла, r – відстань від елементарного об'єму dV , який розглядають як матеріальну точку, до осі обертання.

Таким чином, можна одержати формули моментів інерції кулі, циліндра, стержня відносно їх осей симетрії. Наприклад, для тонкого однорідного стержня момент інерції відносно центральної осі Z_C (тобто, осі, що проходить через його центр мас, т. С), перпендикулярної до осі стержня, визначається виразом:

$$I_C = \frac{1}{12} m \ell^2, \quad (3.8.1)$$

де m – маса, ℓ – довжина стержня.

Для однорідної пластини, довжина якої ℓ такого ж порядку, як і ширина a , момент інерції відносно центральної осі, перпендикулярної до пластини, дорівнює

$$I_C = \frac{m}{12} (a^2 + \ell^2). \quad (3.8.2)$$

Момент інерції однорідного диску, радіуса R відносно осі, що проходить через його центр перпендикулярно до площини диску дорівнює

$$I_C = \frac{1}{2}mR^2 \quad (3.8.3)$$

Момент інерції I_Z відносно іншої осі Z , паралельної до центральної осі Z_C , можна обчислити за *теоремою Штейнера*:

$$I_Z = I_C + md^2.$$

В цій формулі d – відстань між осями Z та Z_C (рис. 3.8.1).

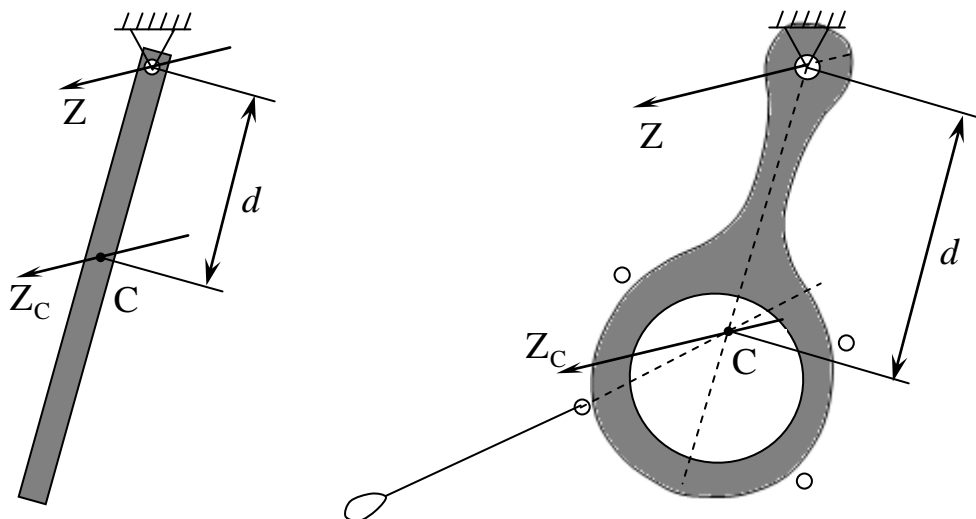


Рис. 3.8.1. Фізичні маятники, утворені з тіл правильної та не-правильної геометричної форми

Таким чином, остаточно отримаємо теоретичне значення моменту інерції:

– пластини:
$$I_T = \frac{m}{12}(a^2 + \ell^2 + d^2); \quad (3.8.4)$$

– стержня:
$$I_T = \frac{m}{12}(\ell^2 + d^2); \quad (3.8.5)$$

– диску:
$$I_T = \frac{m}{2}(R^2 + d^2). \quad (3.8.6)$$

Відповідно відносні похибки вимірювання теоретичного значення моменту інерції будуть розраховуватися за формулами:

$$\varepsilon_{I_T} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{2a\Delta a + 2\ell\Delta\ell + 2d\Delta d}{a^2 + \ell^2 + d^2} \quad (\text{для пластини}), \quad (3.8.7)$$

$$\varepsilon_{I_T} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{2\ell\Delta\ell + 2d\Delta d}{\ell^2 + d^2} \quad (\text{для стержня}), \quad (3.8.8)$$

$$\varepsilon_{I_T} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{2R\Delta R + 2d\Delta d}{R^2 + d^2} \quad (\text{для кулі}). \quad (3.8.9)$$

Момент інерції тіла довільної форми можна визначити дослідним шляхом, вимірявши період коливань фізичного маятника. *Фізичним маятником* називають тверде тіло, яке має нерухому горизонтальну вісь обертання, що не прохо-

дять через його центр мас, та знаходиться під дією тільки сили тяжіння. Період малих коливань фізичного маятника дорівнює

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_Z}{mgd}}. \quad (3.8.10)$$

Тобто, вимірявши масу тіла m , відстань d від центра мас до осі обертання та період коливань T , можна знайти момент інерції відносно осі обертання:

$$I_Z = \frac{mgdT^2}{4\pi^2}. \quad (3.8.11)$$

Так як $T = \frac{t}{n}$, де t – час, за який тіло здійснює n – коливань, то дослідне значення моменту інерції твердого тіла правильної геометричної форми:

$$I_d = \frac{mgdt^2}{4\pi^2 n^2}. \quad (3.8.12)$$

Відносна похибка вимірювання дослідного значення моменту інерції визначається за формулою:

$$\varepsilon_{I_d} = \frac{2\Delta t}{t} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta d}{d}. \quad (3.8.13)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти розміри (для стержня – довжину ℓ , для пластини – довжину ℓ та ширину a , для диску – радіус R) за допомогою лінійки або штангенциркуля та масу m за допомогою терезів тіла правильної геометричної форми. Виміряти масу тіла не правильної геометричної форми.

2. Закріпити тіло правильної геометричної форми, відповідно до індивідуальних завдань, на осі обертання, відхилити від положення рівноваги на малий кут $<10^\circ$ та виміряти час t заданої кількості коливань n . Досліди повторити тричі.

3. Визначити положення центра мас тіла, нехтуючи зміною його положення за рахунок свердлення (вважаємо, що центр мас тіла співпадає з його геометричним центром). З геометричних міркувань (див. рис. 1) визначити відстань d .

4. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань всіх величин.

5. Виконати пункти 2-4 для тіла не правильної геометричної форми.

6. Розрахувати дослідне I_d та теоретичне I_T значення моменту інерції тіла правильної геометричної форми. Розрахувати дослідне значення I_d моменту інерції для тіла не правильної геометричної форми.

7. Розрахувати відносні та абсолютні похибки моментів інерції.

8. Записати результати вимірювань моментів інерції двох тіл. Порівняти теоретичні та експериментальні значення моменту інерції для тіла правильної геометричної форми. Для цього перевірити, чи виконується нерівність $|I_T - I_d| \leq (\Delta_{I_T} + \Delta_{I_d})$, та зробити висновок про коректний результат та правильність виконання дослідів.

Таблиця 3.8.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	Тіло правильної форми							Тіло не правильної форми			
	m	ℓ	a	R	d	t	n	m	d	t	n
1											
2											
3											
сер											
Δ											
I_d	ΔI_d	ε_{I_d}	I_T	ΔI_T	ε_{I_T}	$ I_d - I_T $	$\Delta I_d + \Delta I_T$	I_d	ΔI_d	ε_{I_d}	

Таблиця 3.8.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	Форма тіла	n
1, 6	Стержень	4
2, 7	Пластина	5
3, 8	Диск	6
4, 9	Стержень	7
5, 10	Пластина	8

Контрольні запитання та завдання

1. Яку фізичну властивість тіла характеризує момент інерції?
2. Як обчислюється момент інерції матеріальної точки відносно осі?
3. Як обчислюються моменти інерції тіл правильної геометричної форми?
4. Від чого залежить момент інерції твердого тіла?
5. Сформулювати теорему Штейнера.
6. Що таке фізичний маятник?
7. Записати формулу для визначення періоду коливань фізичного маятника.

3.9. Перевірка законів збереження імпульсу та повної механічної енергії

Мета роботи: 1) спостерігати явища пружного на непружного удару; 2) перевірити закони збереження імпульсу та повної механічної енергії при пружному ударі; 3) перевірити справедливість закону збереження імпульсу при непружному ударі.

Обладнання: установка FPM-08, терези.

Теоретичні відомості. Перевірити закони збереження імпульсу та повної механічної енергії найбільш зручно під час вивчення явища удару. *Удар* – зміна стану тіл внаслідок короткочасної взаємодії при зіткненні. Час взаємодії тіл при ударі дуже малий і становить соті частки секунди. Одним із найпростіших видів удару є центральний удар двох куль. *Центральний удар* – це такий, при якому лінія удару проходить через центри куль. *Лінія удару* – пряма, проведена нормально до елемента поверхні зіткнення куль у момент удару.

Виділяють абсолютно пружний (пружний) і абсолютно непружний (непружний) удари.

Непружний удар – це взаємодія тіл, при якій спостерігається непружна (пластична) деформація. Після непружного удару швидкості тіл, що співударяються, стають однаковими. Закон збереження імпульсу для непружного удару записують у вигляді:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}, \quad (3.9.1)$$

де m_1 – маса тіла, яке рухається зі швидкістю \vec{v}_1 , m_2 – маса тіла, що рухається зі швидкістю \vec{v}_2 , \vec{v} – швидкість руху тіл після удару.

Оскільки сили взаємодії між кулями неконсервативні, то для розглядуваної системи закон зміни механічної енергії можна записати так:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} = A, \quad (3.9.2)$$

де A – робота неконсервативних сил (робота непружної деформації).

Пружний удар – це взаємодія тіл, при якій спостерігається пружна деформація. Процес пружного удару відбувається в два етапи. *Перший етап*: після початку зіткнення сили, що діють на кульки, збільшуються із зростанням деформацій. Збільшення деформації супроводжується зміною швидкості кульок. Тіла, що мали більшу швидкість, уповільнюватимуть свій рух, а тіла з меншою швидкістю прискорюватимуться. При досягненні максимальної деформації швидкості кульок дорівнюватимуть одна одній. З моменту, який характеризує початок другого етапу пружного удару, значення деформацій зменшується. При цьому сили деформацій розштовхують кульки. Після того, як деформації зникнуть, кульки розійдуться, повністю відновлять свою попередню форму і рухатимуться з різними швидкостями. Таким чином, *в кінці другого етапу* весь запас потенціальної енергії пружно деформованих тіл знову перетворюється в кінетичну енергію.

Закон збереження механічної енергії для двох тіл при пружному ударі можна записати у вигляді:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad (3.9.3)$$

де u_1 і u_2 – швидкості тіл після удару.

Закон збереження імпульсу для пружного удару:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2, \quad (3.9.4)$$

Визначити модуль швидкості кулі до та після удару можна, виходячи з закону про збереження повної механічної енергії кулі. Так, для кулі маси m , відведеної на кут α , маємо

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2. \quad (3.9.5)$$

Звідки

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (3.9.6)$$

Висота підняття кулі (див. рис. 3.9.1):

$$h = \ell(1 - \cos \alpha) = 2\ell \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (3.9.7)$$

Підставивши (3.9.7) в (3.9.6), отримаємо

$$v = 2\sqrt{g\ell} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (3.9.8)$$

З урахуванням (3.9.8) формула для знаходження модуля імпульсу тіла у нашому випадку матиме вигляд:

$$p = 2m\sqrt{g\ell} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (3.9.9)$$

Якщо імпульс першої кулі до удару рівний нулю, то сумарний імпульс куль до удару буде рівний:

$$p = p_2 = 2m_2\sqrt{g\ell} \sin \frac{\alpha_2}{2}. \quad (3.9.10)$$

Якщо маси куль близькі, то після удару імпульс другої кулі буде близьким до 0. Тому сумарний імпульс двох куль після пружного удару рівний:

$$p' \approx p'_1 = 2m_1\sqrt{g\ell} \sin \frac{\alpha'_1}{2}. \quad (3.9.11)$$

Після непружного удару обидві кулі відхиляться разом на кут α' , тоді формула (3.9.11) матиме вигляд:

$$p' \approx p'_1 = 2(m_1 + m_2)\sqrt{g\ell} \sin \frac{\alpha'}{2}. \quad (3.9.12)$$

Відносна похибка вимірювання імпульсу куль до удару визначаються за формулою:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta_\ell}{2\ell} + \frac{\Delta_{m_2}}{m_2} + \frac{\Delta_{\alpha_2}}{2\operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (3.9.13)$$

після пружного удару:

$$\varepsilon_{p'} = \frac{\Delta_\ell}{2\ell} + \frac{\Delta_{m_1}}{m_1} + \frac{\Delta_{\alpha_1}}{2\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}, \quad (3.9.14)$$

а після непружного удару:

$$\varepsilon_{p'} = \frac{\Delta_\ell}{2\ell} + \frac{\Delta_{\alpha'}}{2\operatorname{tg} \frac{\alpha'}{2}} + \frac{\Delta_{m_1} + \Delta_{m_2}}{m_1 + m_2}. \quad (3.9.15)$$

Вздовж лінії удару потенціальна енергія тіла рівна 0. Тому повна механічна енергія тіла в момент удару рівна його кінетичній енергії, яка в свою чергу за законом збереження енергії рівна потенціальній енергії в початковий момент часу:

$$E = E_{\text{кін}} = E_{n \text{ поч}} = mgh = mg\ell \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (3.9.16)$$

До удару перша куля знаходилась в стані спокою. Тоді, повна механічна енергія системи з двох куль до удару буде рівна:

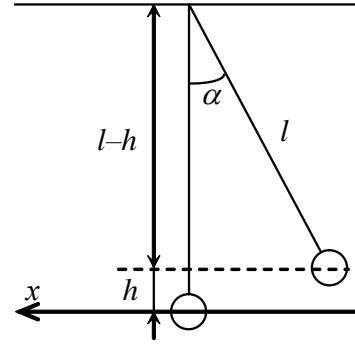


Рис. 3.9.1. Удар двох

$$E = E_2 = m_2 g l \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}. \quad (3.9.17)$$

Після пружного удару повна механічна енергія другої кулі буде близька до 0, тому повна механічна енергія системи тіл після пружного удару рівна:

$$E' \approx E'_1 = m_1 g l \sin^2 \frac{\alpha'_1}{2}. \quad (3.9.18)$$

Після непружного удару повна механічна енергія системи тіл рівна:

$$E' = (m_1 + m_2) g l \sin^2 \frac{\alpha'}{2}. \quad (3.9.19)$$

Відносні похибки вимірювання енергії до удару будуть розраховуватися за формулою:

$$\varepsilon_E = \frac{\Delta \ell}{\ell} + \frac{\Delta m_2}{m_2} + \frac{\Delta \alpha_2}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (3.9.20)$$

після пружного удару:

$$\varepsilon_{E'} = \frac{\Delta \ell}{\ell} + \frac{\Delta m_1}{m_1} + \frac{\Delta \alpha_1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}, \quad (3.9.21)$$

а після непружного:

$$\varepsilon_E = \frac{\Delta \ell}{\ell} + \frac{\Delta m_1 + \Delta m_2}{m_1 + m_2} + \frac{\Delta \alpha'}{\operatorname{tg} \frac{\alpha'}{2}}, \quad (3.9.22)$$

Порядок виконання роботи

1. Закріпити кулі з пружного матеріалу. Визначити маси m_1 та m_2 цих куль. Визначити довжину ℓ підвісу куль.
2. Праву кулю відвести в бік електромагніта і заблокувати в цьому положенні, ліву кулю встановити нерухомо в нульовому положенні. Визначити кути α_1 та α_2 .
3. Відпустити кулю та спостерігати пружний удар. Після зіткнення куль визначити кути α'_1 та α'_2 , на які відскочать кулі.
4. Повторити пункти 2-3 не менше 2 разів.
5. Закріпити кулі з пластичного матеріалу. Повторити пункти 1-4 не менше трьох разів
6. Розрахувати середні арифметичні значення всіх вимірених величин.
7. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань всіх величин.
8. Розрахувати сумарний імпульс системи двох куль до p та після p' пружного удару. Розрахувати повну механічну енергію системи двох куль до E та після E' пружного удару.
9. Розрахувати сумарний імпульс системи двох куль до p та після p' непружного удару. Розрахувати повну механічну енергію системи двох куль до E та після E' непружного удару.
10. Розрахувати відносні та абсолютні похибки всіх імпульсів та енергій.

11. Перевірити виконання законів збереження імпульсу та повної механічної енергії при пружному ударі. Для цього перевірити, чи виконуються нерівності $|p - p'| \leq (\Delta_p + \Delta_{p'})$ та $|E - E'| \leq (\Delta_E + \Delta_{E'})$, та зробити висновок про коректний результат та правильність виконання досліду. Аналогічно перевірити виконання закону збереження імпульсу та повної механічної енергії для непружного удару.

Таблиця 3.9.1. Результати вимірювань та розрахунків

№	Пружний удар							Непружний удар									
	l	m_1	m_2	α_1	α_2	α'_1	α'_2	l	m_1	m_2	α_1	α_2	α'				
1																	
2																	
3																	
сер																	
Δ																	
p	ε_p	Δ_p	p'	$\varepsilon_{p'}$	$\Delta_{p'}$	p	ε_p	Δ_p	p'	$\varepsilon_{p'}$	$\Delta_{p'}$	p	ε_p	Δ_p	p'	$\varepsilon_{p'}$	$\Delta_{p'}$
E	ε_E	Δ_E	E'	$\varepsilon_{E'}$	$\Delta_{E'}$	E	ε_E	Δ_E	E'	$\varepsilon_{E'}$	$\Delta_{E'}$	E	ε_E	Δ_E	E'	$\varepsilon_{E'}$	$\Delta_{E'}$
$ p - p' $	$\Delta_p + \Delta_{p'}$		$ E - E' $	$\Delta_E + \Delta_{E'}$		$ p - p' $	$\Delta_p + \Delta_{p'}$		$ E - E' $	$\Delta_E + \Delta_{E'}$		$ p - p' $	$\Delta_p + \Delta_{p'}$		$ E - E' $	$\Delta_E + \Delta_{E'}$	

Контрольні запитання та завдання

1. Що називається ударом? лінією удару?
2. Дайте означення пружного і непружного ударів.
3. Описати процеси перетворення енергії при пружному та непружному ударах.
4. Чи виконуються закони збереження імпульсу та повної механічної енергії при пружному та непружному ударах? Відповідь пояснити.
5. Як розрахувати швидкості куль після пружного та непружного ударів?

3.10. Перевірка рівняння Бернуллі для стаціонарного потоку рідини

Мета роботи: 1) спостерігати стаціонарний потік рідини; 2) перевірити рівняння Бернуллі для стаціонарного потоку води за допомогою трубки змінного перерізу; 3) визначити число Рейнольдса для даного потоку рідини.

Обладнання: трубка змінного перерізу, посудина з водою, посудина для зливання води, мензурка, манометр, секундомір.

Теоретичні відомості. У роботі перевіряється одне з основних рівнянь у гідродинаміці – рівняння Бернуллі. Гідродинаміка – розділ механіки рідин і газів (гідроаеромеханіки), в якому вивчається рух нестисливих рідин та взаємодія їх з твердими тілами. Вивчаючи рух рідин, користуються поняттям *ідеальної рідини*, тобто нестислової рідини, позбавленої внутрішнього тертя. Також використовують поняття лінія течії та трубка течії. *Лінія течії* – лінія, дотична до якої в кожній точці збігається з вектором швидкості. Частину рідини, обмежену лініями течії, називають *трубкою течії*. Частинки рідини рухаються по лініям течії в межах певної трубки течії. Потік рідини називають *стаціонарним*, якщо розподіл швидкостей потоку в усіх точках трубки з часом не змінюється. Також виділяють ламінарний та турбулентний потоки. При *ламінарному* потоці окремі шари рідини неначе ковзають один відносно одного і не перемішуються, а швидкості частинок в будь-якому перерізі паралельні між собою. При *турбулентному* потоці швидкість частинок змінюється хаотично як за величиною, так і за напрямом, внаслідок чого відбувається інтенсивне перемішування шарів рідини.

Для стаціонарного ламінарного потоку ідеальної рідини для довільного перерізу трубки течії сума динамічного, гідравлічного та статичного тисків є величиною сталою, тобто

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const} . \quad (3.10.1)$$

Рівняння (3.10.1) називають рівнянням Бернуллі. Воно є окремим випадком закону збереження повної механічної енергії, записаного для одиниці об'єму рідини, яка рухається у трубці течії. Рівняння Бернуллі можна застосовувати для реальних рідин, в'язкість яких невелика.

Якщо трубка течії має різні перерізи, але її вісь розташована горизонтально ($h = \text{const}$), тоді рівняння (3.10.1) матиме вигляд:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2, \quad (3.10.2)$$

де v_1 і p_1 – швидкість потоку та тиск в одному перерізі (наприклад, у широкому), а v_2 і p_2 – у другому перерізі (наприклад, у вузькому). Повні тиски

$\left(p + \frac{\rho v^2}{2} \right)$ для довільних перерізів у цьому разі залишаються незмінними. З

(3.10.2) випливає, що для перерізів, де швидкість потоку v більша, статичний тиск p менший і навпаки. Оскільки в трубці змінного перерізу швидкість потоку більша там, де площа перерізу менша (що випливає з *рівняння нерозривності* потоку $v_1 S_1 = v_2 S_2$), то перехід рідини з широкої частини трубки у вузьку супроводжується збільшенням швидкості, а, отже, й зменшенням тиску, а саме:

$$\frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) = p_1 - p_2. \quad (3.10.3)$$

З (3.10.3) можна визначити швидкість рідини в вузькому перерізі:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2}}. \quad (3.10.4)$$

Використовуючи рівняння нерозривності потоку можна записати, що

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}, \quad (3.10.5)$$

де d_1 і d_2 – діаметри трубки у широкій та вузькій її частинах. Підставивши (3.10.5) в (3.10.4), отримаємо:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}}. \quad (3.10.6)$$

Оскільки для даної установки $\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 \ll 1$, то вираз (3.10.6) матиме наступний вигляд:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}. \quad (3.10.7)$$

Якщо різницю тисків ($p_1 - p_2$) вимірювати манометром (наприклад, водяним), тоді

$$p_1 - p_2 = \rho gh, \quad (3.10.8)$$

де h – різниця рівнів манометра. Підставивши (3.10.8) в (3.10.7) матимемо теоретичне значення швидкості:

$$v_{2т} = \sqrt{2gh}. \quad (3.10.9)$$

Відносна похибка вимірювання швидкості буде рівна:

$$\varepsilon_{vт} = \frac{\Delta h}{2h}. \quad (3.10.10)$$

Дослідне значення швидкості потоку v_2 можна визначити також з кінематичних співвідношень для стаціонарного руху матеріальних точок:

$$v_{2д} = \frac{4V}{\pi t d_2^2}, \quad (3.10.11)$$

де V – об'єм рідини, що витекла за час t з трубки діаметром d_2 . Тоді відносна похибка для дослідного значення швидкості буде розраховуватися за формулою:

$$\varepsilon_{vд} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta t}{t}. \quad (3.10.12)$$

Рівність швидкостей, розрахованих за формулами (3.10.9) і (3.10.11) підтверджує справедливість рівняння Бернуллі для даної рідини та трубки.

Утворення вихрів у трубці та перехід ламінарного потоку у турбулентний зумовлено дією доцентрових сил, які викривлюють рух частинок. Цьому про-

тидіють сили в'язкості, які намагаються зберегти ламінарний характер потоку. Відносну роль сил інерції та сил в'язкості характеризує безрозмірне *число Рейнольдса*

$$Re = \frac{\rho d v}{\eta}, \quad (3.10.13)$$

де η – коефіцієнт в'язкості рідини. Для води $\eta = 10^{-3}$ Па · с. Відносна похибка вимірювання числа Рейнольдса:

$$\varepsilon_{Re} = \frac{\Delta v_d}{v_d}. \quad (3.10.14)$$

При малих значеннях числа Рейнольдса потік можна вважати ламінарним (переважають сили в'язкості), а при великих – турбулентним (переважають сили інерції). Існує певне критичне значення числа Рейнольдса $Re_{кр}$, яке залежить від багатьох факторів (трубки, рідини, умов протікання тощо). Якщо $Re < Re_{кр}$ потік ламінарний, якщо $Re \geq Re_{кр}$ потік турбулентний. Різні автори наводять різні значення для $Re_{кр}$. В роботі прийемо, що $Re_{кр} = 2300$. Число Рейнольдса використовують для порівняння потоків. Різні потоки, які характеризуються однаковими числами Рейнольдса, поведуть себе подібним чином.

Порядок виконання роботи

1. Встановити трубку змінного перерізу горизонтально. Гумовим шлангом ширший кінець сполучити з водопровідним краном або посудиною з водою, а від вузького кінця відвести шланг до порожньої посудини.
2. Повільно відкручуючи кран, встановити стаціонарну течію води у трубці. За допомогою манометра виміряти різницю рівнів води h .
3. Ввімкнути секундомір і одночасно перенести кінець зливного шлангу у мензурку. Через час t , заданий у індивідуальних завданнях, вимкнути секундомір і одночасно перенести кінець зливного шлангу у посудину. Закрити водопровідний кран. Виміряти об'єм води у мензурці V .
4. Повторити пункти 2 – 3 ще не менше двох разів.
5. Розрахувати середні арифметичні значення всіх вимірених величин.
6. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань всіх величин, за які прийняти випадкові похибки.
7. Розрахувати теоретичне значення v_T та дослідне v_d значення швидкості потоку води у вузькій частині трубки.
8. Розрахувати число Рейнольдса. Швидкість прийняти рівною дослідному значенню, а густину води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.
9. Розрахувати відносні та абсолютні похибки вимірювання теоретичного та дослідного значень швидкостей та числа Рейнольдса.
10. Порівняти теоретичне та експериментальне значення швидкості потоку. Для цього перевірити, чи виконується нерівність $|v_{експ} - v_{теор}| \leq (\Delta v_{експ} + \Delta v_{теор})$, та зробити висновок про справедливість рівняння Бернуллі. Порівняти Re і $Re_{кр}$ та зробити висновки про характер потоку.

Таблиця 3.10.1. Результати вимірювань та розрахунків

№		t, c			h, m		V, m^3			
1										
2										
3										
сер										
Δ										
v_T	Δ_{v_T}	ε_{v_T}	v_D	Δ_{v_D}	ε_{v_D}	$ v_T - v_{ек} $	$\Delta_{v_T} + \Delta_{v_D}$	Re	Δ_{Re}	ε_{Re}

Таблиця 3.10.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	t, c
1, 6, 9	4
2, 7, 10	5
3, 8, 5	6
4, 9	7

Контрольні запитання та завдання

1. Яку течію називають стаціонарною?
2. Що таке лінія та трубка течії?
3. Що таке ламінарний і турбулентний потоки? Чим вони відрізняються?
4. Який вигляд мають рівняння неперервності потоку для нестисливої та стисливої рідин?
5. Що таке число Рейнольдса та що воно показує?

3.11. Дослідження вільних коливань системи з двома ступенями вільності

Мета роботи: 1) спостерігати вільні синфазні, протифазні коливання, биття, вимушені коливання; 2) перевірити теоретичні розрахунки періодів для цих коливань експериментально.

Обладнання: експериментальна установка FPM-13.

Теоретичні відомості. Коливальна система з двома ступенями вільності, яка використовується в роботі, являє собою два фізичних маятника, з'єднаних пружним зв'язком (рис. 3.11.1). Положення коливальної системи у будь-який момент часу t визначається двома незалежними координатами φ_1 та φ_2 , що являють собою кути відхилення маятників від положення рівноваги. Тому така коливальна система має два ступеня вільності.

Маятники являють собою металеві стержні з прикріпленими на них масивними тілами масами m_1 та m_2 . Моменти інерції стержнів враховувати не буде, оскільки вони набагато менші, ніж моменти інерції тіл. Тому моменти інерції першого та другого маятників відповідно рівні

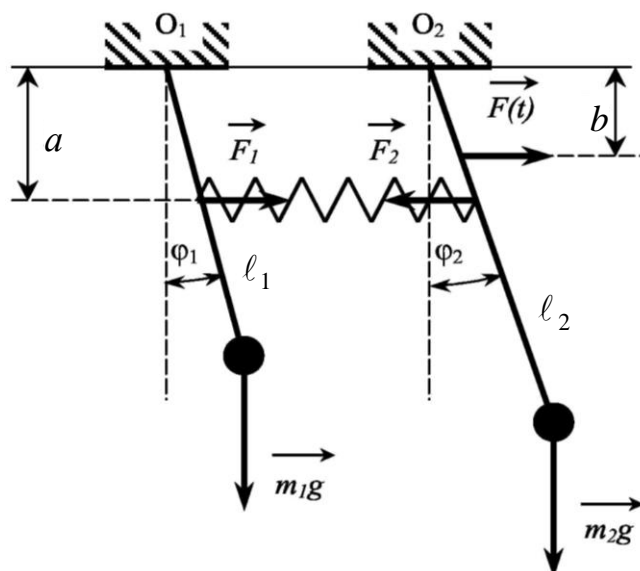


Рис. 3.11.1. Зв'язані маятники

$$\begin{aligned} I_1 &= m_1 \ell_1^2 \\ I_2 &= m_2 \ell_2^2 \end{aligned} \quad (3.11.1)$$

де ℓ_1, ℓ_2 – відстані від центра мас тіла до осі обертання маятників. На відстані a від осі обертання маятника зв'язані пружиною, а на відстані b від осі обертання до одного з маятників може бути прикладена зовнішня сила $\vec{F}(t)$.

Для виводу рівняння вільних коливань використаємо основне рівняння динаміки обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі:

$$I_Z \varepsilon = \sum M(\vec{F}). \quad (3.11.2)$$

Якщо знехтувати масами та моментами інерції стержнів, то для першого маятника основне рівняння запишемо так:

$$m_1 \ell_1^2 \ddot{\varphi}_1 = -m_1 g \ell_1 \sin \varphi_1 + F_1 a \cos \varphi_1, \quad (3.11.3)$$

де $\ddot{\varphi}_1 = \varepsilon_1$ – кутове прискорення, перший доданок справа – момент сили тяжіння першого маятника відносно осі обертання, а другий – момент сили пружності, що виникає із-за дії пружини на маятник. Скориставшись законом Гука для пружних деформацій, можна записати вираз для модуля сили \vec{F}_1 :

$$F_1 = k \Delta x, \quad (3.11.4)$$

де k – коефіцієнт жорсткості пружини, Δx – зміна довжини пружини. У відповідності з рис. 3.11.1 вираз (3.11.3) можна переписати так:

$$F_1 = ka(\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2). \quad (3.11.5)$$

В роботі вивчаються малі коливання, тому вважатимемо, що $\sin \varphi \approx 0$, $\cos \varphi \approx 1$. Враховуючи вище сказане та підставивши (3.11.5) в (3.11.3), отримаємо рівняння для вільних коливань першого маятника:

$$\ddot{\varphi}_1 + \left(\frac{g}{\ell_1} + \frac{ka^2}{m_1 \ell_1^2} \right) \varphi_1 - \frac{ka^2}{m_1 \ell_1^2} \varphi_2 = 0. \quad (3.11.6)$$

Аналогічно отримаємо рівняння для вільних коливань другого маятника:

$$\ddot{\varphi}_2 + \left(\frac{g}{\ell_2} + \frac{ka^2}{m_2 \ell_2^2} \right) \varphi_2 - \frac{ka^2}{m_2 \ell_2^2} \varphi_1 = 0. \quad (3.11.7)$$

Вирази (3.11.6) – (3.11.7) – система лінійних однорідних диференціальних рівнянь другого порядку відносно функцій $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ та $\varphi_2 = \varphi_2(t)$. Цю систему рівнянь можна спростити, якщо розглядати абсолютно однакові маятники ($\ell_1 = \ell_2 = \ell$, $m_1 = m_2 = m$). Тому наведені вище рівняння можна переписати так:

$$\begin{cases} (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + \frac{g}{\ell} (\varphi_1 + \varphi_2) = 0 \\ (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + \left(\frac{g}{\ell} + \frac{2ka^2}{m\ell^2} \right) (\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \end{cases}. \quad (3.11.8)$$

Якщо розглянути ці рівняння відносно нових змінних $\psi = \varphi_1 + \varphi_2$, $\eta = \varphi_1 - \varphi_2$, то отримаємо

$$\begin{cases} \ddot{\psi} + \frac{g}{\ell} \psi = 0 \\ \ddot{\eta} + \left(\frac{g}{\ell} + \frac{2ka^2}{m\ell^2} \right) \eta = 0 \end{cases}. \quad (3.11.9)$$

Вираз (3.11.9) – являє собою систему рівнянь, яка описує гармонічні коливання системи з двох зв'язаних маятників. Перше рівняння описує *синфазні* коливання маятників, друге рівняння – *протифазні*. З (3.11.9) можна отримати вирази для циклічної частоти синфазних та протифазних коливань:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{\ell}}, \quad \omega_{\pi} = \sqrt{\frac{g}{\ell} + \frac{2ka^2}{m\ell^2}}.$$

Таким чином, коливання кожного маятника можна описати за допомогою суперпозиції двох гармонічних коливань: синфазних $\psi(t)$ та протифазних $\eta(t)$:

$$\begin{cases} \varphi_1 = A \sin(\omega_c t + \alpha_c) + B \sin(\omega_{\pi} t + \alpha_{\pi}) \\ \varphi_2 = A \sin(\omega_c t + \alpha_c) - B \sin(\omega_{\pi} t + \alpha_{\pi}) \end{cases}, \quad (3.11.10)$$

де амплітуди A , B та початкові фази α_c , α_{π} визначаються із початкових умов зв'язаних маятників і залежать від початкових фаз першого та другого маятників α_1 , α_2 та їх циклічних частот ω_1 , ω_2 . Відповідно періоди синфазних та протифазних коливань дорівнюють

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad (3.11.11)$$

$$T_{\pi} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{\ell} + \frac{2ka^2}{m\ell^2}}}. \quad (3.11.12)$$

Синфазні коливання – коливання, з однаковими за фазами. Вони можуть бути отримані, якщо пружина, що з'єднує маятники, не буде деформуватися під час їх руху. Цього можна досягти, якщо обидва маятника в початковий момент

часу відхилити в одну сторону на однаковий кут та надати їм однакові початкові швидкості. Період синфазних коливань визначається виразом (3.11.11).

Противазні коливання – коливання, що мають протилежні фази. Їх можна отримати, якщо в початковий момент часу маятники відхилити у протилежні сторони на однакові кути і надати їм рівні за величиною, але протилежно направлені початкові швидкості. Період противазних коливань визначається виразом (3.11.12).

Якщо параметри коливальної системи підібрати так, що

$$\frac{2k}{m}a^2 \ll gl, \quad (3.11.13)$$

то в цьому випадку $\omega_c \approx \omega_{\Pi}$. Тому при довільному відхиленні коливальної системи з положення рівноваги відбуватимуться *биття* – коливання з амплітудою, що змінюється періодично за гармонічним законом (рис. 3.11.2). Найбільш наочно биття можна спостерігати, якщо в початковий момент часу один з маятників відхилити, інший підтримувати в положення рівноваги, а потім обидва маятника відпустити.

Період коливань T маятників під час биття та період биття $T_{\text{б}}$ не залежать від способу збудження коливальної системи і визначаються так:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_{\Pi} + \omega_c} = \frac{T_c T_{\Pi}}{T_c + T_{\Pi}}, \quad T_{\text{б}} = \frac{2\pi}{\omega_{\Pi} - \omega_c} = \frac{T_c T_{\Pi}}{T_c - T_{\Pi}}. \quad (3.11.14)$$

Досліджуючи зв'язані маятники експериментально можна визначити кількість n та час t коливань маятника. Знаючи ці величини, можна визначити період коливань за формулою

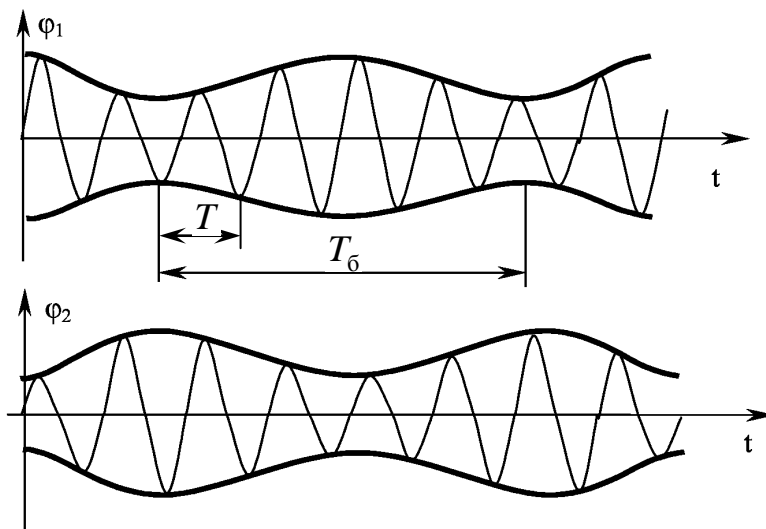


Рис. 3.11.2. Биття

$$T_{\text{д}} = \frac{t}{n}. \quad (3.11.15)$$

Таким чином, за формулами (3.11.11), (3.11.12), (3.11.14) розраховують періоди синфазних коливань, противазних коливань, коливань під час биття, та період биття, а за формулою (3.11.15) – дослідне значення періоду. Відповідно

відносні похибки вимірювання теоретичних значень періодів визначаються за формулами:

– для періодів синфазних коливань:

$$\varepsilon_{T_c} = \frac{\Delta_\ell}{\ell}; \quad (3.11.16)$$

– для періодів протифазних коливань:

$$\varepsilon_{T_{\Pi}} = \frac{\Delta_m}{2m} + \frac{\Delta_\ell}{\ell} + \frac{g(\ell\Delta_m + m\Delta_\ell) + 4ka\Delta_a}{2(mg\ell - 2ka^2)}; \quad (3.11.17)$$

– для періоду коливань під час биття:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta_{T_{\Pi}}}{T_{\Pi}} + \frac{\Delta_{T_c}}{T_c} + \frac{\Delta_{T_c} + \Delta_{T_{\Pi}}}{T_c + T_{\Pi}}; \quad (3.11.18)$$

– для періоду биття:

$$\varepsilon_{T_b} = \frac{\Delta_{T_{\Pi}}}{T_{\Pi}} + \frac{\Delta_{T_c}}{T_c} + \frac{\Delta_{T_c} + \Delta_{T_{\Pi}}}{T_c - T_{\Pi}}. \quad (3.11.19)$$

Відносна похибка вимірювання дослідного значення періоду:

$$\varepsilon_{T_d} = \frac{\Delta_t}{t}. \quad (3.11.20)$$

Порядок виконання роботи

1. Від'єднати пружини, які зв'язують маятники з двигуном.
2. Встановити пружини, які зв'язують маятники між собою на відстані a від осі обертання, а шайби, масою m – на відстані ℓ від осі обертання (відстань ℓ вимірюється від осі обертання до центра шайби). Величини m , a та ℓ наведені у індивідуальних завданнях.
3. Відхилити обидва маятника на кут α_c , заданий у індивідуальних завданнях, та відпустити. Спостерігати синфазні коливання. Виміряти час t_c для $n = 10$ синфазних коливань не менше трьох разів.
4. Відхилити маятники у протилежні сторони на кут α_{Π} , заданий у індивідуальних завданнях, та відпустити. Спостерігати протифазні коливання. Виміряти час t_{Π} для $n = 10$ протифазних коливань не менше трьох разів.
5. Відхилити однією рукою передній маятник на кут α_b , заданий у індивідуальних завданнях, одночасно другою рукою притримати задній маятник у положенні рівноваги та одночасно відпустити маятники. Уважно слідкувати за рухом переднього маятника. Спостерігати биття. У момент, коли передній маятник ненадовго зупиниться в положенні рівноваги, почати відлік часу. Після того, коли передній маятник після запуску секундоміра зупиниться ненадовго $n_b = 5$ разів, зупинити відлік часу. При цьому n_b – кількість биттів, які здійснили маятники. Секундомір виміряє час t_b для n коливань, де n – кількість коливань маятників. Вимірювання провести не менше трьох разів.
6. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань всіх величин.

7. Розрахувати теоретичні значення періодів синфазних коливань T_c , протифазних коливань T_{Π} , періоду коливань під час биття T та періоду биття $T_{\text{б}}$. Сумарний коефіцієнт пружності пружин прийняти рівним $k = 16,6 \text{ Н/м}$.

8. Розрахувати дослідні значення усіх періодів T_d .

9. Розрахувати відносні та абсолютні похибки вимірювання усіх періодів.

10. Порівняти теоретичні та дослідні значення періодів. Для цього перевірити, чи виконується нерівність $|T_T - T_d| \leq (\Delta_{T_T} + \Delta_{T_d})$ та зробити висновок про коректність результату.

Таблиця 3.11.1. Результати вимірювань та розрахунків

ℓ	Δ_ℓ		a	Δ_a		m	Δ_m				
№	Синфазні коливання		Противфазні коливання		Биття						
	n	t_c	n	t_{Π}	n	$n_{\text{б}}$	$t_{\text{б}}$				
1											
2											
3											
сер											
Δ											
Період синфазних коливань						Період противфазних коливань					
T_c	ε_{T_c}	Δ_{T_c}	T_d	ε_{T_d}	Δ_{T_d}	T_{Π}	$\varepsilon_{T_{\Pi}}$	$\Delta_{T_{\Pi}}$	T_d	ε_{T_d}	Δ_{T_d}
Період коливань під час биття						Період биття					
T	ε_T	Δ_T	T_d	ε_{T_d}	Δ_{T_d}	$T_{\text{б}}$	$\varepsilon_{T_{\text{б}}}$	$\Delta_{T_{\text{б}}}$	T_d	ε_{T_d}	Δ_{T_d}

Таблиця 3.11.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	m , г	ℓ , см	a , см	α_c , град	α_{Π} , град	α , град
1, 6	100	35	15	6	8	7
2, 7	150	35	20	7	9	10
3, 8	200	35	25	8	10	6
4, 9	100	40	15	9	6	8
5, 10	150	40	20	10	7	9

Контрольні запитання та завдання

1. Які коливання називаються вільними, вимушеними?
2. Що називають частотою, періодом, амплітудою, фазою коливань?
3. Які коливання називаються синфазними, протифазними, биттям?
4. Чому в пункті 5 необхідно притримувати один з маятників при одночасному відхиленні іншого?
5. Чим відрізняються період коливань під час биття та період биття?
6. Що таке резонанс коливань та при яких умовах він відбувається?
7. Як за допомогою установки визначити жорсткість пружини?

3.12. Вивчення гіроскопічного ефекту

Мета роботи: 1) спостерігати гіроскопічний ефект; 2) визначити кутову швидкість прецесії, момент імпульсу та момент інерції гіроскопа.

Обладнання: установка FPM-10 (гіроскоп).

Теоретичні відомості. *Гіроскоп* – симетричне тверде тіло, яке обертається з великою швидкістю навколо власної осі, що є однією з вільних осей. Гіроскоп має три ступені вільності, якщо він закріплений так, що може здійснювати будь-який поворот навколо нерухомої точки (центру підвісу). Якщо центр мас гіроскопа співпадає з центром підвісу і тертя у місцях закріплення осей досить мале, то можна вважати сумарний момент зовнішніх сил, що діють на гіроскоп, рівним нулю. Гіроскоп, сумарний момент зовнішніх сил якого рівний нулю, називають *вільним*.

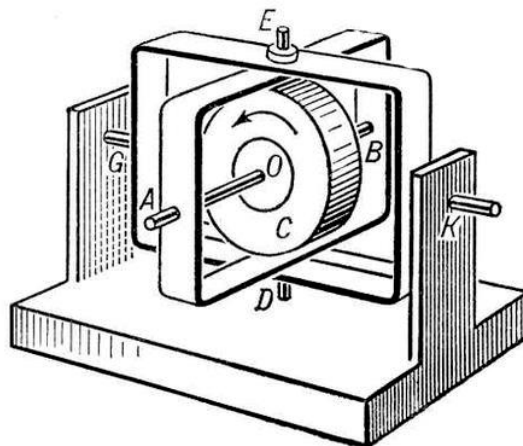


Рис. 3.12.1. Гіроскоп

Прикладом вільного гіроскопа, що має три ступені вільності, може бути гіроскоп, закріплений на карданному підвісі (рис. 3.12.1). *Карданний підвіс* складається з двох обойм, зовнішня з яких вільно повертається навколо осі GK, а внутрішня – навколо осі DE. Вісь AB гіроскопа C спирається на внутрішню обойму карданного підвісу. Точка O – центр гіроскопа.

Нехай до осі AB гіроскопа прикладена зовнішня сила \vec{F} (рис. 3.12.2). Момент \vec{M} цієї сили напрямлений перпендикулярно осі AB вздовж диску C. Під дією цієї сили за деякий час dt головний момент імпульсу \vec{L} дістає приріст $d\vec{L}$

$$d\vec{L} = \vec{M} dt, \quad (3.12.1)$$

Зміну вектора \vec{L} під дією зовнішніх сил називають *прецесією*. За час dt вісь гіроскопа повернеться на кут $d\varphi$

$$d\varphi = \frac{dL}{L \sin \alpha} = \frac{M dt}{L \sin \alpha}, \quad (3.12.2)$$

де α – кут між вектором моменту імпульсу \vec{L} та віссю прецесії OO' . Звідки

$$M = L \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha. \quad (3.12.3)$$

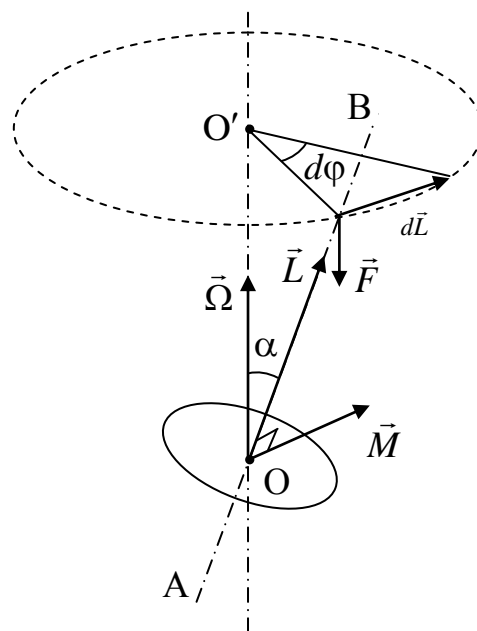


Рис. 3.12.2. Прецесія осі гіроскопа

В (3.12.3) $\Omega = \frac{d\varphi}{dt}$ – кутова швидкість прецесії гіроскопа. Тому

$$M = L\Omega \sin \alpha. \quad (3.12.4)$$

Якщо $\alpha = 90^\circ$, формула (3.12.4) матиме вигляд:

$$L = \frac{M}{\Omega}. \quad (3.12.5)$$

Момент сили M , що діє на вісь гіроскопа створюється тягарем і визначається формулою

$$M = mg(x - x_0), \quad (3.12.6)$$

де m – маса тягаря, x_0 та x – початкове та кінцеве положення тягаря.

Кутова швидкість Ω прецесії визначається як

$$\Omega = \frac{\varphi}{t}, \quad (3.12.7)$$

де φ – кут в радіанах, на який повертається вісь гіроскопа внаслідок прецесії за час t . Підставивши (3.12.6) та (3.12.7) в (3.12.5), отримуємо формулу для визначення моменту імпульсу гіроскопа:

$$L = \frac{mg(x - x_0)}{\Omega}. \quad (3.12.8)$$

Момент інерції гіроскопа визначається формулою

$$I = \frac{L}{\omega}, \quad (3.12.9)$$

де ω – частота обертання гіроскопа.

Відносні похибки для розрахунку кутової швидкості, моменту імпульсу та моменту інерції матимуть вигляд:

$$\varepsilon_\Omega = \frac{\Delta_\varphi}{\varphi} + \frac{\Delta_t}{t}; \quad (3.12.10)$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_\Omega + \frac{\Delta_m}{m} + \frac{2\Delta x}{x - x_0}; \quad (3.12.11)$$

$$\varepsilon_I = \varepsilon_L + \frac{\Delta_\omega}{\omega}. \quad (3.12.12)$$

Порядок виконання роботи

1. Визначити масу тягаря m не менше трьох разів.
2. Переміщенням тягаря по лінійці знайти положення рівноваги гіроскопа x_0 .
3. Встановити частоту обертання ω гіроскопа відповідно до індивідуальних завдань. **Увага! Під час обертання гіроскопа дотримуватися техніки безпеки!**
4. Встановити положення x тягаря, задане в індивідуальних завданнях. При цьому вільний кінець лінійки обережно підтримувати рукою. Зафіксувати напрям обертання осі гіроскопа (за годинниковою стрілкою чи проти).

5. Виміряти час t повороту гіроскопа на кут φ , заданий в індивідуальних завданнях. **Під час проведення досліду слідкувати, щоб частота обертання гіроскопа ω не змінювалась!**

6. Виконати пункти 2–5 ще не менше двох разів.

7. Визначити абсолютні похибки прямих вимірювань всіх величин.

8. Розрахувати, кутову швидкість прецесії, момент імпульсу та момент інерції гіроскопа.

9. Розрахувати відносні та абсолютні похибки вимірювання кутової швидкості прецесії, моменту імпульсу та моменту інерції гіроскопа.

10. Записати результати вимірювання. Перевірити, чи залежить напрям обертання осі гіроскопа від положення тягаря. Відповідь пояснити.

Таблиця 3.12.1. Таблиця результатів вимірювання

№	t	x_0	x	φ	t	ω		
1								
2								
3								
сер								
Δ								
Ω	ε_{Ω}	Δ_{Ω}	L	ε_L	Δ_L	I	ε_I	Δ_I

Таблиця 3.12.2. Індивідуальні завдання

№ бригади	ω , об/хв	x , см	φ , град
1, 6	5000	8	70
2, 7	6000	9	80
3, 8	7000	10	90
4, 9	8000	11	100
5, 10	9000	12	110

Контрольні запитання та завдання

1. Що називають гіроскопом? Вільним гіроскопом?
2. Пояснити, чому вектор моменту зовнішньої сили направлений перпендикулярно осі гіроскопа?
3. Як залежить кутова швидкість прецесії гіроскопа від положення тягаря? Чому не відбувається прецесія урівноваженого гіроскопа?
4. Від чого залежить напрямок прецесії гіроскопа?
5. Як буде поводити себе гіроскоп під час намагання повернути його навколо вертикальної осі? Чому?

Розділ 4

Підсумкові тестові завдання

1. Яка похибка зазвичай виражається у відсотках:
 - а) абсолютна;
 - б) інструментальна;
 - в) випадкова;
 - г) відносна.
2. Яка похибка має ті ж самі одиниці вимірювання, що й вимірювана фізична величина:
 - а) відносна;
 - б) зведена;
 - в) систематична;
 - г) похибки не мають розмірностей.
3. Визначення об'єму паралелепіпеда за формулою $V = abc$ – це:
 - а) пряме вимірювання;
 - б) посереднє вимірювання;
 - в) сумісне вимірювання;
 - г) сукупне вимірювання.
4. Визначення об'єму паралелепіпеда за допомогою мензурки – це:
 - а) пряме вимірювання;
 - б) посереднє вимірювання;
 - в) сумісне вимірювання;
 - г) сукупне вимірювання.
5. Для визначення відносної похибки фізичної величини при посередніх вимірюваннях необхідно:
 - а) додати відносні похибки фізичних величин, що входять до розрахункової формули;
 - б) продиференціювати розрахункову формулу;
 - в) прологарифмувати, а потім продиференціювати розрахункову формулу;
 - г) прологарифмувати розрахункову формулу.
6. Фізична величина визначається за формулою $a = b + c$, де b і c вимірюються. У цьому випадку абсолютна похибка буде дорівнювати:
 - а) $\Delta_a = \Delta_b \cdot \Delta_c$;
 - б) $\Delta_a = \Delta_b + \Delta_c$;
 - в) $\Delta_a = \frac{\Delta_b + \Delta_c}{b + c}$;
 - г) $\Delta_a = \frac{\Delta_b}{b} + \frac{\Delta_c}{c}$.
7. Результат вимірювання правильно записують так:
 - а) $a = (12,64 \pm 1,43)$ м;
 - б) $a = 12,64$ м;

в) $a = (12,6412 \pm 1,43) \text{ м}$;

г) $a = (12,64 \pm 1,4307) \text{ м}$.

8. В експерименті тіло переміщується вздовж прямої. Вимірюють 5 разів пройдений шлях через кожні 5 с від початку руху. Потім будують графік залежності шляху від часу і визначають, який шлях пройде тіло через 10,5 с. Така процедура називається:
- а) апроксимація;
 - б) скупне вимірювання;
 - в) інтерполяція;
 - г) екстраполяція.
9. В експерименті тіло переміщується вздовж прямої. Вимірюють 5 разів пройдений шлях через кожні 5 с від початку руху. Потім будують графік залежності шляху від часу і визначають, який шлях пройде тіло через 30,5 с. Така процедура називається:
- а) апроксимація;
 - б) скупне вимірювання;
 - в) інтерполяція;
 - г) екстраполяція.
10. Декілька вимірювань роблять для того, щоб:
- а) збільшити точність вимірювань;
 - б) збільшити випадкову похибку вимірювань;
 - в) виключити промахи;
 - г) зменшити систематичну похибку.
11. Відносна похибка характеризує:
- а) у скільки разів абсолютна похибка менша за вимірюване значення;
 - б) у скільки разів абсолютна похибка більша за вимірюване значення;
 - в) клас точності приладу;
 - г) яку частину від вимірюваної величини складає абсолютна похибка.
12. Густина в системі СІ вимірюється у:
- а) $\text{кг}/\text{см}^2$;
 - б) $\text{кг}/\text{м}^3$;
 - в) $\text{м}^3/\text{кг}$;
 - г) $\text{кг}/\text{см}^3$.
13. Густина речовини залежить від:
- а) маси тіла;
 - б) об'єму тіла;
 - в) геометричних розмірів тіла;
 - г) температури тіла.
14. За формулою $\frac{\pi d^2 h}{4}$ експериментально можна знайти:
- а) площу поверхні циліндра;
 - б) площу основи паралелепіпеда;
 - в) об'єм циліндра;
 - г) об'єм кулі.

15. Густина кулі можна визначити експериментально за формулою:

а) $\frac{m}{abc}$;

б) $\frac{6m}{\pi d^3}$;

в) $\frac{m}{2abc}$;

г) $\frac{4m}{\pi d^2 h}$.

16. Густина циліндра можна визначити експериментально за формулою:

а) $\frac{m}{abc}$;

б) $\frac{6m}{\pi d^3}$;

в) $\frac{m}{2abc}$;

г) $\frac{4m}{\pi d^2 h}$.

17. Густина прямокутного паралелепіпеда можна визначити експериментально за формулою:

а) $\frac{m}{abc}$;

б) $\frac{6m}{\pi d^3}$;

в) $\frac{m}{2abc}$;

г) $\frac{4m}{\pi d^2 h}$.

18. Ціна поділки штангенциркуля дорівнює:

а) 1 мм;

б) 10^{-3} м;

в) 10^{-4} м;

г) 10^{-5} м.

19. За допомогою мікрометра можна робити вимірювання з точністю до:

а) 1 мм;

б) 0,1 мм;

в) 0,01 мм;

г) 0,001 мм.

20. Ноніус – це додаткова шкала:

а) штангенциркуля;

б) мікрометра;

в) технічних терезів;

- г) будь-якого фізичного приладу.
21. Аретир – це:
- шкала, що нанесена на барабані мікрометра;
 - додаткова шкала у кутомірних приладах;
 - шкала на технічних терезах;
 - пристрій, який зупиняє коливання коромисла в технічних терезах.
22. При зважуванні на технічних терезах, тягарці необхідно класти
- на праву шальку;
 - на ліву шальку;
 - на будь-яку шальку;
 - в залежності від того, в якій руці тримають пінцет.
23. Прямолінійний рівномірний рух – це такий рух, при якому:
- $\vec{a} = \text{const}$;
 - $v \sim t$;
 - $s \sim t$;
 - $s \sim t^2$.
24. Прямолінійний рівноприскорений рух – це такий рух, при якому:
- $\vec{a} = \text{const}$;
 - $\vec{a} = 0$;
 - $\vec{v} = \text{const}$;
 - $s \sim t$.
25. На якій частині траєкторії тіло здійснює нерівномірний рух на приладі Атвуда:
- на верхній частині траєкторії;
 - на нижній частині траєкторії;
 - вздовж усієї траєкторії тіло рухається нерівномірно;
 - вздовж усієї траєкторії тіло рухається рівномірно.
26. Додатковий тягар у приладі Атвуда призначений для:
- створення рівнодійної сили, напрямленої вниз;
 - врівноваження циліндрів;
 - надання циліндрам прискорення;
 - зменшення швидкості руху циліндрів.
27. Формулою, яка не описує прямолінійний рівноприскорений рух є:
- $v = at$;
 - $s = \frac{at^2}{2}$;
 - $a = \frac{H^2}{2ht^2}$;
 - $s = vt$.
28. Швидкість циліндрів у приладі Атвуда дорівнює нулю:
- у верхній точці траєкторії;
 - у момент зняття додаткового тягаря;
 - у момент проходження фотодатчика;
 - у нижній точці траєкторії.

29. Миттєва швидкість тіла – це:
- швидкість у початковій точці траєкторії;
 - швидкість у даний момент часу;
 - перша похідна від переміщення за часом;
 - друга похідна від переміщення за часом.
30. З експерименту відомо, що сила тертя ковзання:
- прямо пропорційна силі нормальної реакції;
 - прямо пропорційна площі дотичних поверхонь;
 - прямо пропорційна швидкості руху тіла;
 - не залежить від матеріалу поверхонь.
31. Сила тертя ковзання:
- збільшує механічну енергію системи;
 - збільшує швидкість руху тіла;
 - виконує додатну роботу;
 - напрявлена проти руху тіла.
32. Сила тертя ковзання визначається за формулою:
- $F = \mu \frac{N}{R}$;
 - $F = \mu \frac{R}{N}$;
 - $F = \mu N$;
 - $F = \mu R$.
33. Сила тертя ковзання дорівнює силі, прикладеній до бруска паралельно дотичним поверхням при русі:
- по похилій площині вгору;
 - по похилій площині вниз;
 - по горизонтальній площині рівномірно;
 - по горизонтальній площині прискорено.
34. З підвищенням якості обробки поверхонь сила тертя ковзання:
- зменшується;
 - збільшується;
 - спочатку збільшується, а потім зменшується;
 - спочатку зменшується, а потім збільшується.
35. Коефіцієнт тертя ковзання не залежить від:
- матеріалу поверхонь;
 - якості обробки поверхонь;
 - забруднення поверхонь;
 - площі дотичних поверхонь.
36. Сила тертя кочення визначається за формулою:
- $F = \mu \frac{N}{R}$;
 - $F = \mu \frac{R}{N}$;
 - $F = \mu N$;

г) $F = \mu R$.

37. Коефіцієнт тертя кочення циліндра залежить від:

- а) швидкості кочення;
- б) радіуса циліндра;
- в) температури циліндра;
- г) матеріалу поверхні циліндра.

38. Для експериментального визначення коефіцієнта тертя кочення використовують метод:

- а) біфілярного підвісу;
- б) похилого маятника;
- в) трибометра;
- г) крутильного маятника.

39. В основу методу експериментального визначення коефіцієнта тертя кочення покладено закон про:

- а) збереження повної механічної енергії;
- б) зміну повної механічної енергії;
- в) збереження імпульсу;
- г) зміну імпульсу.

40. Співвідношення між коефіцієнтами тертя має вигляд:

- а) $\mu_{\text{коч}} \ll \mu_{\text{ковз}}$;
- б) $\mu_{\text{коч}} \approx \mu_{\text{ковз}}$;
- в) $\mu_{\text{коч}} \gg \mu_{\text{ковз}}$;
- г) $\mu_{\text{коч}} > \mu_{\text{ковз}}$.

41. Сила тертя кочення:

- а) прямо пропорційна радіусу колеса;
- б) прямо пропорційна силі нормальної реакції;
- в) напрямлена в бік руху;
- г) співнаправлена з силою нормальної реакції.

42. Коефіцієнт пружності (модуль Юнга) залежить від:

- а) відносної деформації;
- б) механічного напруження;
- в) матеріалу тіла;
- г) сили пружності.

43. Вкажіть невірну формулу для визначення модуля Юнга:

- а) $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$;
- б) $E = \frac{l_0}{\Delta l \sigma}$;
- в) $E = \frac{\sigma l_0}{\Delta l}$;
- г) $E = \frac{F l_0}{S \Delta l}$.

44. Модуль Юнга має наступну одиницю вимірювання:
- Па;
 - Н;
 - м;
 - Н·м.
45. Деформацію називають пластичною, якщо:
- тіло відтворює свою форму після деформації;
 - виконується закон Гука;
 - вона зникає після припинення дії сили на тіло;
 - вона залишається після припинення дії сили на тіло.
46. Закон Гука формулюється так:
- механічне напруження прямо пропорційне відносній деформації;
 - механічне напруження прямо пропорційне абсолютній деформації;
 - сила пружності прямо пропорційна відносній деформації;
 - сила пружності обернено пропорційна абсолютній деформації.
47. У приладі Лермантова видовження нитки вимірюють:
- прямо за допомогою певного приладу;
 - посередньо оптичним методом;
 - посередньо механічним методом;
 - посередньо електричним методом.
48. Математичний маятник – це:
- матеріальна точка, підвішена на нерозтяжній невагомій нитці;
 - кулька, підвішена на нескінченно довгій нитці;
 - тіло, підвішене в одній точці;
 - тіло, підвішене на двох нерозтяжних нитках.
49. Коливання називаються гармонічними, якщо:
- період коливань не змінюється з часом;
 - коливання відбуваються за законом синуса;
 - амплітуда коливань не залежить від часу;
 - відсутня вимушуюча сила, яка підтримує коливання.
50. Період коливань математичного маятника визначається формулою:
- $T = \frac{N}{t}$;
 - $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$;
 - $T = 2\pi\sqrt{\frac{g}{l}}$;
 - $T = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{l}{g}}$.
51. Під час гармонічних коливань змінюється з часом:
- період;
 - частота;
 - фаза;

- г) амплітуда.
52. При коливаннях математичного маятника не змінюється з часом:
- імпульс матеріальної точки;
 - кінетична енергія матеріальної точки;
 - потенціальна енергія матеріальної точки;
 - повна механічна енергія матеріальної точки.
53. Прискорення вільного падіння:
- залежить від кількості коливань;
 - залежить від маси матеріальної точки;
 - залежить від довжини підвісу маятника;
 - жодна відповідь не є вірною.
54. Напруженість гравітаційного поля:
- прямо пропорційна прискоренню g ;
 - обернено пропорційна прискоренню g ;
 - дорівнює прискоренню g ;
 - не залежить від прискорення g .
55. Оберіть неправильне твердження. Момент інерції матеріальної точки відносно осі обертання:
- обернено пропорційний масі точки;
 - характеризує інертні властивості матеріальної точки;
 - вимірюється в $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;
 - пропорційний квадрату відстані точки до осі обертання.
56. Який з виразів не є основним рівнянням динаміки обертального руху:
- $\varepsilon = \frac{M}{I}$;
 - $M = \varepsilon I$;
 - $M = \frac{dL}{dt}$;
 - $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$.
57. Момент інерції тіла відносно осі, що не проходить через центр мас, визначається за формулою (де I_0 – момент інерції тіла відносно осі, яка проходить через центр мас; R – радіус тіла; d – відстань центра мас до осі обертання):
- $I = md^2$;
 - $I = I_0 + md^2$;
 - $I = I_0 + mR^2$;
 - $I = mR^2$.
58. Оберіть неправильне твердження. Кутове прискорення тіла:
- вимірюється в с^{-2} ;
 - співпадає за напрямом з кутовим переміщенням;
 - співпадає за напрямом зі зміною кутової швидкості;

- г) дорівнює першій похідній від кутової швидкості за часом.
59. Зміна положення циліндрів у приладі Обербека не впливає на зміну:
- моменту інерції маховика;
 - кутової швидкості маховика;
 - кутового прискорення маховика;
 - обертального моменту маховика.
60. Зміна маси тягарців у приладі Обербека не впливає на зміну:
- моменту інерції маховика;
 - сили тяжіння, що діє на маховик;
 - кутового прискорення маховика;
 - обертального моменту маховика.
61. У роботі з приладом Обербека перевіряється пропорційність:
- $\varepsilon \sim I$;
 - $\varepsilon \sim M$;
 - $\varepsilon \sim \frac{1}{I}$;
 - $\varepsilon \sim \frac{1}{M}$.
62. Не є осьовим вектором:
- кутова швидкість;
 - кутове прискорення;
 - тангенціальне прискорення;
 - момент сили.
63. Фізичний маятник здійснює коливання під дією:
- сили тяжіння;
 - сили пружності;
 - сили тертя;
 - квазіпружної сили.
64. Період коливань фізичного маятника визначається формулою:
- $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$;
 - $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgd}}$;
 - $T = \frac{N}{t}$;
 - $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.
65. За теоремою Штейнера визначається момент інерції відносно:
- центра мас тіла;
 - довільної точки тіла;
 - осі, що проходить через центр мас тіла;
 - довільної осі тіла.

66. Теорема Штейнера записується математично так:

а) $I_Z = I_0 + md^2$;

б) $I_Z = \frac{m}{12}(a^2 + l^2)$;

в) $I_Z = \frac{1}{2}ml^2$;

г) $I_Z = \frac{1}{12}ml^2$.

67. Період коливань фізичного маятника:

а) прямо пропорційний масі тіла;

б) обернено пропорційний масі тіла;

в) не залежить від прискорення вільного падіння;

г) не залежить від моменту інерції тіла.

68. Абсолютно пружним називають удар, якщо:

а) швидкості обох тіл після удару зміняться на протилежні;

б) обидва тіла після удару рухаються з однаковою швидкістю;

в) повна механічна енергія системи тіл зменшується;

г) повна механічна енергія системи тіл зберігається.

69. Вкажіть неправильну відповідь. Абсолютно непружним називають удар, при якому:

а) частина повної механічної енергії перетворюється на внутрішню;

б) кінетична енергія тіл після удару не змінюється;

в) тіла після удару рухаються з однаковою швидкістю;

г) у тілах залишається деформація.

70. При абсолютно непружному ударі:

а) закон збереження повної механічної енергії виконується, а закон збереження імпульсу не виконується;

б) закон збереження повної механічної енергії не виконується, а закон збереження імпульсу виконується;

в) закон збереження повної механічної енергії та закон збереження імпульсу не виконуються;

г) закон збереження повної механічної енергії та закон збереження імпульсу виконуються.

71. При абсолютно пружному ударі:

а) закон збереження повної механічної енергії виконується, а закон збереження імпульсу не виконується;

б) закон збереження повної механічної енергії не виконується, а закон збереження імпульсу виконується;

в) закон збереження повної механічної енергії та закон збереження імпульсу не виконуються;

г) закон збереження повної механічної енергії та закон збереження імпульсу виконуються.

72. Вимірюючи кут відхилення кулі після удару, не можна визначити:
- а) довжину підвісу кулі;
 - б) висоту підняття кулі відносно положення рівноваги;
 - в) імпульс кулі в початковий момент після удару;
 - г) потенціальну енергію в момент відхилення кулі на максимальний кут після удару.
73. Вкажіть неправильне твердження. Ідеальна рідина – це:
- а) модель реальної рідини;
 - б) рідина, в якій відсутня в'язкість;
 - в) нестислива рідина;
 - г) рідина, охолоджена до 0°C .
74. Лінія течії – це:
- а) лінія, дотична до якої перпендикулярна вектору сили в'язкості, що діють на частинки в рідині;
 - б) лінія, дотична до якої збігається з вектором швидкості частинок рідини;
 - в) лінія, перпендикулярно до якої рухаються частинки рідини;
 - г) нескінченно довга труба малого діаметру, в якій відбувається потік рідини.
75. Трубка течії – це:
- а) труба, вздовж якої тече рідина в досліді;
 - б) трубка для вимірювання тиску в рідині;
 - в) частина рідини, обмежена двома лініями;
 - г) частина рідини, обмежена лініями течії.
76. Якщо швидкості частинок рідини у всіх точках перерізу труби паралельні між собою, потік називають:
- а) турбулентним;
 - б) ламінарним;
 - в) стаціонарним;
 - г) ідеальним.
77. Якщо розподіл швидкостей частинок рідини не змінюється з часом, потік називають:
- а) турбулентним;
 - б) ламінарним;
 - в) стаціонарним;
 - г) ідеальним.
78. Тиск рідини, зумовлений її рухом, називають:
- а) динамічним;
 - б) статичним;
 - в) гідравлічним;
 - г) повним.
79. Тиск рідини, зумовлений перепадом висот трубки, називають:
- а) динамічний;
 - б) статичний;
 - в) гідравлічний;

- г) повний.
80. Тиск рідини, зумовлений деформацією нижніх шарів рідини верхніми, називають:
- а) динамічний;
 - б) статичний;
 - в) гідравлічний;
 - г) повний.
81. Закон Бернуллі – це окремий випадок закону:
- а) збереження повної механічної енергії;
 - б) зміни повної механічної енергії;
 - в) збереження імпульсу;
 - г) зміни імпульсу.
82. Закон Бернуллі не виконується для:
- а) ідеальної рідини;
 - б) ламінарного потоку;
 - в) стаціонарного потоку;
 - г) турбулентного потоку.
83. Число Рейнольдса характеризує:
- а) швидкість потоку рідини;
 - б) зміну тиску за одиницю часу;
 - в) ступінь турбулентності та ламінарності потоку;
 - г) інертні властивості потоку.
84. Коливання, які відбуваються в одній фазі, називають:
- а) синфазними;
 - б) протифазними;
 - в) гармонічними;
 - г) биттям.
85. Коливання, які відбуваються в протилежних фазах, називають:
- а) синфазними;
 - б) протифазними;
 - в) гармонічними;
 - г) биттям.
86. Резонанс – це явище:
- а) співпадання синфазних та протифазних коливань;
 - б) співпадання частот власних та вимушених коливань;
 - в) різкого зростання амплітуди вимушених коливань при співпаданні частот власних та вимушених коливань;
 - г) утворення биття.
87. Коливальна система з двома ступенями вільності має:
- а) одну резонансну частоту;
 - б) дві резонансні частоти;
 - в) три резонансні частоти;
 - г) багато резонансних частот.

88. Вимушені коливання відбуваються:
- а) під дією внутрішньої повертальної сили;
 - б) під дією зовнішньої періодично діючої сили;
 - в) під час биття в системі;
 - г) при накладанні синфазних та протифазних коливань.
89. Щоб отримати биття у досліді, необхідно:
- а) відхилити маятники в протилежні сторони на однаковий кут та одночасно відпустити;
 - б) відхилити маятники в один бік та одночасно відпустити;
 - в) відхилити маятники в протилежні сторони на різні кути та одночасно відпустити;
 - г) приєднати коливальну систему до двигуна.
90. Тіло, яке швидко обертається навколо осі симетрії, називають:
- а) двигун;
 - б) гіроскоп;
 - в) турбіна;
 - г) ротор.
91. Явище повертання осі гіроскопа зі сталою кутовою швидкістю називають:
- а) нутація;
 - б) прецесія;
 - в) дисперсія;
 - г) аберація.
92. Основною властивістю гіроскопа з трьома ступенями вільності є:
- а) прецесія;
 - б) нутація;
 - в) зберігання напрямку осі обертання;
 - г) поступове сповільнення обертання.
93. Прецесія – це явище:
- а) зберігання напрямку осі обертання;
 - б) обертання осі гіроскопа зі сталою кутовою швидкістю;
 - в) коливання осі гіроскопа в напрямку дії моменту сили;
 - г) коливання осі гіроскопа навколо її середнього положення.
94. Вісь гіроскопа під час прецесії :
- а) описує сферичну поверхню;
 - б) описує конічну поверхню;
 - в) описує циліндричну поверхню;
 - г) залишається нерухомою.
95. В основі гіроскопічного ефекту лежить закон:
- а) збереження імпульсу;
 - б) зміни імпульсу;
 - в) збереження моменту імпульсу;
 - г) зміни моменту імпульсу.

Додатки

Деякі фізичні сталі

Гравітаційна стала

$$G = (6,67428 \pm 0,00067) 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$$

Прискорення вільного падіння:

– на полюсі

$$g_{\text{пол}} = 9,83235 \text{ м/с}^2$$

– на екваторі

$$g_{\text{екв}} = 9,78049 \text{ м/с}^2$$

– середнє

$$g_{\text{сер}} = 9,80665 \text{ м/с}^2$$

Таблиця 1. Множники та приставки СІ

Назва приставки	Позначення		Множник
	Українське	Міжнародне	
тера	Т	T	10^{12}
гіга	Г	G	10^9
мега	М	M	10^6
кіло	к	k	10^3
гекто	г	h	10^2
дека	да	da	10^1
деци	д	d	10^{-1}
санти	с	c	10^{-2}
мілі	м	m	10^{-3}
мікро	мк	μ	10^{-6}
нано	н	n	10^{-9}
піко	п	p	10^{-12}

Таблиця 2. Нормований коефіцієнт Стьюдента

Кількість вимірювань	Довірча ймовірність								
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	0,16	0,33	0,73	1,38	3,08	6,31	12,70	31,80	63,70
3	0,14	0,29	0,62	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,14	0,28	0,58	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,13	0,27	0,57	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,13	0,27	0,56	0,92	1,48	2,02	2,57	3,36	4,03
7	0,13	0,27	0,55	0,90	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,13	0,26	0,54	0,90	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50
9	0,13	0,26	0,54	0,90	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,13	0,26	0,54	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
12	0,13	0,26	0,54	0,87	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
14	0,13	0,26	0,54	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
16	0,13	0,26	0,54	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
18	0,13	0,26	0,53	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
20	0,13	0,26	0,53	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86

Таблиця 3. Густина деяких газів

Речовина	Густина речовини, кг/м ³	Речовина	Густина речовини, кг/м ³
Азот	1,250	Кисень	1,429
Водень	0,089	Метан	0,717
Вуглекислий газ	1,977	Неон	0,900
Гелій	0,178	Повітря	1,293

Примітка: при температурі 0°C, якщо не вказано у дужках

Таблиця 4. Густина деяких рідин

Речовина	Густина речовини, кг/м ³	Речовина	Густина речовини, кг/м ³
Азот (-196°C)	850	Мазут	890 – 1000
Алюміній (660,4°C)	2400	Масло соняшникове	926
Ацетон	781	Мед	1345
Бензин	710 – 750	Молоко	1280
Бензол	879	Нафта	730 – 940
Вода (4°C)	1000	Олово (400°C)	6800
Вода (100°C)	958	Повітря (-194°C)	960
Водень (-253°C)	70	Платина (1775°C)	19000
Гелій (-271°C)	150	Ртуть	13546
Гліцерин	1260	Свинець (400°C)	10500
Гас	790 – 820	Скипидар	860
Ефір етиловий	710	Спирт етиловий (0°C)	789
Золото (1100°C)	17240	Спирт метиловий (0°C)	792
Кисень (-182°C)	1100	Толуол	870
Кров	1050	Хлороформ	1483

Примітка: при температурі 20°C, якщо не вказано у дужках

Таблиця 5. Густина деяких твердих тіл

Речовина	Густина речовини, кг/м ³	Речовина	Густина речовини, кг/м ³
Азот (-252°C)	1026	Мідь	8940
Алмаз	3400 – 3600	Молибден	10200
Алюміній	2700	Натрій	968
Бетон	1800 – 2800	Нікель	8900
Береза сира	880	Ніхром	8100 – 8400
Береза суха	650	Олово	7300
Бронза	8700 – 8900	Осмій	22610
Ванадій	6110	Папір	700 – 1200
Віск	960 – 980	Парафін	870 – 920
Вісмут	9800	Пінопласт	40 – 220

Водень (– 262°C)	81	Платина	21460
Вольфрам	19300	Поліетилен	920
Гума	910 – 1400	Поліхлорвініл	1200 – 1800
Дуб сирий	1020	Свинець	11340
Дуб сухий	760	Сіль поварена	2200
Дюралюміній	2700 – 2900	Скло віконне	2400 – 2700
Ебоніт	1200 – 1400	Скло органічне	1200
Залізо	7874	Склотекстоліт	1700 – 1800
Золото	19320	Сосна сира	860
Калій	862	Сосна суха	520
Каніфоль	1070	Срібло	10500
Капрон	1100 – 1200	Сталь	7700 – 7800
Кисень (– 252°C)	1426	Тополя сира	750
Клен сирий	960	Тополя суха	480
Клен сухий	750	Уран	19040
Константан	8900	Фарфор	2200 – 2500
Крейда	1800 – 2600	Хром	7190
Кремній	2328	Цегла	1800
Латунь	8300 – 8700	Цинк	7130
Липа суха	450	Цукор рафінад	1600
Липа сира	790	Чугун	7000 – 7800
Лід (0°C)	917	Ялина сира	800
Літій	539	Ялина суха	450
Магній	1740	Янтар	1100

Примітка: при температурі 20°C, якщо не вказано у дужках

Таблиця 6. Модуль Юнга деяких речовин

Речовина	Модуль Юнга, ГПа	Речовина	Модуль Юнга, ГПа
Алюміній	70	Свинець	17
Дерево вздовж волокон	10 – 12	Сталь	216
Дерево поперек волокон	0,5 – 1,0	Скло	56
Залізо	200	Титан	112
Золото	79	Хром	240 – 250
Мідь	110	Цинк	80
Оргскло	2,9	Чугун	115 – 150

Таблиця 7. Межа міцності деяких речовин

Речовина	Межа міцності, ГПа	Речовина	Межа міцності, ГПа
Алюміній	0,05 – 0,11	Срібло	0,14
Залізо	0,17 – 0,21	Сталь	0,38 – 0,47
Золото	0,14	Скло	0,06 – 0,12
Оргскло	0,08	Цинк	0,11
Свинець	0,016	Чугун	0,25 – 0,55

Таблиця 8. Коефіцієнт тертя ковзання деяких речовин

Речовина	Коефіцієнт тертя ковзання	Речовина	Коефіцієнт тертя ковзання
Дерево по дереву	0,20 – 0,50	Сталь по сталі	0,03 – 0,09
Дерево по сталі	0,3 – 0,6	Сталь по пластмасі	0,18 – 0,35
Лід по льоду	0,028	Шина по асфальту	0,50 – 0,70
Метал по металу	0,15 – 0,20	Шина по ґрунту	0,40 – 0,50
Сталь по льоду	0,015	Шина по льоду	0,15 – 0,20

Таблиця 9. Коефіцієнт тертя кочення деяких речовин

Речовина	Коеф. тертя кочення, см	Речовина	Коеф. тертя кочення, см
Дерево по дереву	0,05 – 0,08	Підшипник кульковий	0,001 – 0,004
Дерево по сталі	0,03 – 0,04	Сталь по сталі	0,05
Підшипник роликовий	0,0025 – 0,01	Сталь по дереву	0,15 – 0,25

Таблиця 10. Значення тригонометричних функцій

α , град	$\sin(\alpha)$	$\operatorname{tg}(\alpha)$	-	α , град	$\sin(\alpha)$	$\operatorname{tg}(\alpha)$	-
0	0,0000	0,0000	90	45	0,7071	1,0000	45
1	0,0175	0,0175	89	46	0,7193	1,0355	44
2	0,0349	0,0349	88	47	0,7314	1,0724	43
3	0,0523	0,0524	87	48	0,7431	1,1106	42
4	0,0698	0,0699	86	49	0,7547	1,1504	41
5	0,0872	0,0875	85	50	0,7660	1,1918	40
6	0,1045	0,1051	84	51	0,7771	1,2349	39
7	0,1219	0,1228	83	52	0,7880	1,2799	38
8	0,1392	0,1405	82	53	0,7986	1,3270	37
9	0,1564	0,1584	81	54	0,8090	1,3764	36
10	0,1736	0,1763	80	55	0,8192	1,4281	35
11	0,1908	0,1944	79	56	0,8290	1,4826	34
12	0,2079	0,2126	78	57	0,8387	1,5399	33
13	0,2250	0,2309	77	58	0,8480	1,6003	32
14	0,2419	0,2493	76	59	0,8572	1,6643	31
15	0,2588	0,2679	75	60	0,8660	1,7321	30
16	0,2756	0,2867	74	61	0,8746	1,8040	29
17	0,2924	0,3057	73	62	0,8829	1,8807	28
18	0,3090	0,3249	72	63	0,8910	1,9626	27
19	0,3256	0,3443	71	64	0,8988	2,0503	26
20	0,3420	0,3640	70	65	0,9063	2,1445	25
21	0,3584	0,3839	69	66	0,9135	2,2460	24
22	0,3746	0,4040	68	67	0,9205	2,3559	23
-	$\cos(\alpha)$	$\operatorname{ctg}(\alpha)$	α , град	-	$\cos(\alpha)$	$\operatorname{ctg}(\alpha)$	α , град

Продовження таблиці 10

α , град	$\sin(\alpha)$	$\operatorname{tg}(\alpha)$	-	α , град	$\sin(\alpha)$	$\operatorname{tg}(\alpha)$	-
23	0,3907	0,4245	67	68	0,9272	2,4751	22
24	0,4067	0,4452	66	69	0,9336	2,6051	21
25	0,4226	0,4663	65	70	0,9397	2,7475	20
26	0,4384	0,4877	64	71	0,9455	2,9042	19
27	0,4540	0,5095	63	72	0,9511	3,0777	18
28	0,4695	0,5317	62	73	0,9563	3,2709	17
29	0,4848	0,5543	61	74	0,9613	3,4874	16
30	0,5000	0,5774	60	75	0,9659	3,7321	15
31	0,5150	0,6009	59	76	0,9703	4,0108	14
32	0,5299	0,6249	58	77	0,9744	4,3315	13
33	0,5446	0,6494	57	78	0,9781	4,7046	12
34	0,5592	0,6745	56	79	0,9816	5,1446	11
35	0,5736	0,7002	55	80	0,9848	5,6713	10
36	0,5878	0,7265	54	81	0,9877	6,3138	9
37	0,6018	0,7536	53	82	0,9903	7,1154	8
38	0,6157	0,7813	52	83	0,9925	8,1443	7
39	0,6293	0,8098	51	84	0,9945	9,5144	6
40	0,6428	0,8391	50	85	0,9962	11,4301	5
41	0,6561	0,8693	49	86	0,9976	14,3007	4
42	0,6691	0,9004	48	87	0,9986	19,0811	3
43	0,6820	0,9325	47	88	0,9994	28,6363	2
44	0,6947	0,9657	46	89	0,9998	57,2900	1
-	$\cos(\alpha)$	$\operatorname{ctg}(\alpha)$	α , град	-	$\cos(\alpha)$	$\operatorname{ctg}(\alpha)$	α , град

Таблиця 11. Характеристики деяких засобів вимірювання

Засіб вимірювання	Верхня межа вимірювання	Ціна поділки	Абсолютна інструментальна похибка
Лінійка вимірювальна металева або пластмасова	—	1 мм	0,2 мм
Лінійка вимірювальна дерев'яна	—	1 мм	0,5 мм
Штангенциркуль	125; 200мм	0,1 мм	0,05 мм
	320; 500 мм	0,05 мм	0,025 мм
Мікрометр	—	10 мкм	5 мкм
Терези технічні	—	10 мг	5 мг
Терези електронні	500 г	0,1 г	0,1 г
Секундомір механічний	60 хв	0,2 с	0,2 с
Секундомір електронний	—	0,01 с	0,01 с

Продовження таблиці 11

Засіб вимірювання	Верхня межа вимірювання	Ціна поділки	Абсолютна інструментальна похибка
Мензурки	1000 мл	50 мл	25 мл
	500 мл	25 мл	12,5 мл
	250 мл	25 мл	5 мл
	100 мл	10 мл	5 мл
	50 мл	5 мл	2,5 мл
Тягарі загального призначення	500 г	—	80 мг
	200 г		60 мг
	100 г		40 мг
	50 г		30 мг
	20 г		20 мг
	10 г		12 мг
	5 г		8 мг
	2 г		6 мг
	1 г		4 мг
	500 мг		3 мг
	200 мг		2 мг
	100 мг		1 мг
	10; 20; 50 мг		1 мг
Лабораторні установки ФРМ – секундомір електронний – шкали для визначення довжини – шкали для визначення кута – маса тіл	99,999 с	0,001 с	0,001 с
	—	—	2 мм
	15°	0,25°	0,125°
	11°	0,5°	0,25°
	30°; 90°; 120°	1°	0,5°
	360°	10°	5°
	—	—	0,01 г

Література

1. Бушок Г. Ф., Венгер Є. Ф. Курс фізики: У 3 кн. Кн.1. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика та термодинаміка: Навч. посіб. – К.: Вища школа, 2002. – 375 с.
2. Дущенко В. П., Кучерук І. М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. - К.: Вища школа, 1987. – 431 с.
3. Загальна фізика. Лабораторний практикум: Навчальний посібник / Заг. ред. І. Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.
4. Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. К. А. Барсукова и Ю. И. Уханова. – М.: Высш. шк., 1988. – 351 с.
5. Механика. Колебания и волны. Молекулярная физика: Лабораторный практикум / Под ред. И. И. Коваленко. – Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2001. – 124 с.
6. Общий физический практикум. Механика / Под ред. А.Н.Матвеева, Д. Ф. Киселева. – М.: Издательство МГУ, 1991. – 272 с.
7. Попко Ю. М., Князева Л. А. Руководство к практикуму по физике: Учебное пособие для студентов физико-математических факультетов педагогических институтов / Под ред. З. В. Волковой. – М., 1959. – 443 с.
8. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Под ред. Л. Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973. – 688 с.
9. Савельев И. В. Курс общей физики. Том 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – М.: Наука, 1970. – 511 с.
10. Савчук В. П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. Ч1. Учеб. пособие для студентов вузов. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 54 с.
11. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. I. Механика. – М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с.
12. Уродов В. И., Стриженов В. С. Практикум по физике. – М.: Высшая школа, 1973. – 382 с.
13. Физические величины: справочник/А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
14. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. – С.-Пб.: НПО «Профессионал», 2008. – 284 с.

Зміст

Розділ 1. Вступ до лабораторного практикуму.....	3
1.1. Вимоги безпеки у фізичній лабораторії.....	3
1.2. Вимірювання фізичних величин та оцінка похибок вимірювання.....	5
1.3. Порядок виконання робіт лабораторного практикуму з фізики.....	8
1.4. Приклад оформлення звіту з лабораторної роботи.....	12
Розділ 2. Обладнання з механіки.....	15
2.1. Прилади для вимірювання геометричних розмірів та маси.....	15
2.2. Комплект фізичних приладів з механіки FPM.....	18
2.3. Фізичні установки з механіки.....	23
Розділ 3. Роботи лабораторного практикуму.....	25
3.1. Вимірювання густини речовини твердого тіла правильної геометричної форми.....	25
3.2. Дослідження рівномірного та рівноприскореного рухів матеріальної точки.....	27
3.3. Вимірювання коефіцієнта тертя ковзання.....	30
3.4. Вимірювання коефіцієнта тертя кочення.....	33
3.5. Вимірювання модуля Юнга твердого тіла.....	36
3.6. Вимірювання прискорення вільного падіння.....	38
3.7. Перевірка основного закону обертального руху.....	40
3.8. Вимірювання моменту інерції твердого тіла.....	43
3.9. Перевірка законів збереження імпульсу та повної механічної енергії...46	
3.10. Перевірка рівняння Бернуллі для стаціонарного потоку рідини.....	50
3.11. Дослідження вільних коливань системи з двома ступенями вільності.....	54
3.12. Вивчення гіроскопічного ефекту.....	60
Розділ 4. Підсумкові тестові завдання.....	63
Додатки.....	76
Література.....	82

Навчальне видання
(українською мовою)

Бабенко Марина Олександрівна
Коробова Ірина Володимирівна

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З МЕХАНІКИ

Навчальний посібник
для студентів напрямів підготовки «Фізика*», «Математика*»
денної, заочної та екстернатної форм навчання.

Рецензент

Відповідальний
за випуск