

Міністерство освіти і науки України
Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально- науковий фізико- технологічний інститут
Кафедра експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій

Кобель Г.П., Головіна Н.А., Мартинюк О.С., Савош В.О.

Лабораторний практикум з механіки

(Практикум)

Луцьк
Вежа–Друк
2022

УДК 531(076.5)
Л 12

*Рекомендовано науково-методичною радою Волинського
національного університету імені Лесі Українки
(протокол № 6 від 23.02.2022 р.)*

Рецензенти:

Пастернак Ярослав Михайлович - доктор фізико-математичних наук, професор кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

Шигорін Павло Павлович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Кобель Г.П., Головіна Н.А., Мартинюк О.С., Савош В.О.

Л 12 Лабораторний практикум з механіки: практикум. Луцьк: Вежа-Друк, 2022. 82 с.

Видання розраховане на студентів фізичних факультетів університетів, які вивчають загальний курс фізики (механіка). Практикум можуть успішно використовувати також студенти інших факультетів, які вивчають відповідний курс фізики, при підготовці до лабораторних робіт.

УДК 531(076.5)

© Кобель Г. П., Головіна Н. А., Мартинюк О.С., Савош В.О. 2022

© Волинський національний університету імені Лесі Українки, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ I. ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ СТУДЕНТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ	5
1.1. Загальні вимоги до підготовки, виконання й оформлення робіт лабораторного практикуму	5
1.2. Правила техніки безпеки під час виконання лабораторного практикуму	6
1.3. Похибки та їх оцінка при обробці результатів вимірювання ...	8
1.4. Інформація про Міжнародну систему одиниць	16
РОЗДІЛ II. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ.....	26
Лабораторна робота № 1. Вимірювання лінійних величин.....	26
Лабораторна робота № 2. Визначення прискорення сили земного тяжіння за допомогою математичного маятника та падаючого циліндра.....	33
Лабораторна робота № 3. Вивчення законів кінематики і динаміки поступального руху на машині Атвуда	38
Лабораторна робота № 4. Визначення швидкості кулі за допомогою балістичного маятника	41
Лабораторна робота № 5. Вимірювання потенціальної та кінетичної енергії падаючого тіла	44
Лабораторна робота № 6. Вивчення обертового руху за допомогою маятника Обербека.....	47
Лабораторна робота № 7. Вивчення руху тіл по похилій площині	51
Лабораторна робота № 8. Визначення коефіцієнтів тертя ковзання та кочення.....	54
Лабораторна робота № 9. Визначення модуля Юнга за деформацією розтягу та методом деформації прогину.....	61
Лабораторна робота № 10. Визначення моменту інерції махового колеса і сили тертя в опорі.....	66
Лабораторна робота № 11. Визначення моменту інерції тіла довільної форми та перевірка теореми Штейнера методом крутильних коливань	70
Лабораторна робота № 12. Визначення швидкості звуку в повітрі методом резонансу	73
ДОДАТОК.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81

ВСТУП

Серед багатьох методів наукового пізнання, якими користуються фізики, особливе місце посідає експериментальний метод. Наукові факти, добуті експериментально, часто стають основою фізичних теорій. З іншого боку, висновки з фізичних теорій перевіряються і уточнюються, як правило, за допомогою експерименту. У цьому сенсі фізику відносять до експериментальних наук.

Оскільки навчальні курси з фізики (з інших предметів також) формуються за рахунок відповідної наукової інформації, то цілком очевидно, що вивчення фізики як у середніх, так і у вищих навчальних закладах не можливе без експерименту. Так, наприклад, навчальний план для студентів ЗВО фізичних спеціальностей передбачає на лабораторний практикум з курсу "Загальна фізика" 29 % від загальної кількості аудиторних годин.

Однак у реалізації цієї проблеми є суттєві труднощі. Одна з них – відсутність відповідних навчальних посібників для студентів ЗВО, які вивчають фізику. Цілком зрозуміло, що посібники такого призначення або зовсім відсутні, або вони вже не відповідають вимогам сьогодення.

Пропоноване навчальне видання "Лабораторний практикум з механіки" розраховане на студентів ЗВО, які вивчають загальний курс фізики.

Рекомендації складається з двох розділів. У першому розділі розкрито основні вимоги до виконання студентами лабораторного практикуму, розглянуто правила техніки безпеки, подано класифікацію та методи обчислення похибок, коротку інформацію про Міжнародну систему одиниць.

У другому розділі подано детальну інформацію про лабораторні роботи (тема, обладнання, завдання, теоретичні відомості, рисунки, контрольні запитання). Кожна з установок цих робіт – комплексний блок вимірювальних приладів та інших експериментальних засобів разом з об'єктом дослідження. Широкий вибір тем лабораторних робіт та обладнання до них дає можливість комплектувати лабораторний практикум з механіки не тільки для студентів-фізиків, але й для майбутніх хіміків, біологів, географів та інших, які вивчають фізику.

У додатку подано таблиці фізичних величин та список літератури.

РОЗДІЛ I. ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ СТУДЕНТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

1.1. Загальні вимоги до підготовки, виконання й оформлення робіт лабораторного практикуму

Процес виконання роботи лабораторного практикуму з механіки складається з таких етапів:

1. Підготовка студента до роботи (самостійна робота).
2. Виконання роботи (робота студента в лабораторії під керівництвом викладача).
3. Оформлення звіту та його захист (самостійна робота студента й індивідуальна робота викладач – студент).

Для повноцінної реалізації цих етапів потрібно забезпечити належні умови: наявність у лабораторії відповідної літератури; наявність справного навчального обладнання; наявність у студентів спеціальних зошитів для лабораторного практикуму; постійний контроль викладачем й об'єктивне оцінювання роботи студента.

Підготовка до виконання робіт практикуму

Підготовка до виконання робіт лабораторного практикуму з механіки передбачає такі види діяльності студента:

- а) уважне опрацювання інструкції до лабораторної роботи уміщеної у виданні;
- б) записування в зошиті для лабораторних робіт номера, теми, мети, завдання роботи;
- в) опрацювання вказаної в інструкції літератури (у зошит студент записує формулювання законів, означення понять, функціональні залежності між ними, графіки й іншу потрібну інформацію);
- г) записування в зошиті переліку у наведених в інструкції дослідів;
- г) письмові відповіді на запитання, які стосуються змісту даної роботи;
- д) ознайомлення з правилами техніки безпеки, які стосуються теми лабораторної роботи.

Виконання робіт практикуму

Щоб дістати дозвіл на виконання роботи, студент повинен:

- а) мати конспект, який відповідає зазначеним вище вимогам;
- б) дати відповіді на контрольні запитання;
- в) знати будову та принцип функціонування приладів;
- г) скласти правильно за схемою робочу установку;

г) за показами приладів визначати значення відповідних фізичних величин.

Діставши дозвіл, студент повинен:

а) перевірити наявність основних та допоміжних приладів, які потрібні для виконання дослідів із даної теми;

б) виконати досліди в тій послідовності, яка вказана в інструкції;

в) визначити наукову та практичну мету кожного дослідів;

г) запропонувати практичне використання даного фізичного явища чи процесу.

Звіт про роботу

а) студент виконує схематичні рисунки кожного дослідів та письмово їх пояснює;

б) у таблицю записує числові значення фізичних величин;

в) визначає шукану величину;

г) обчислює похибки;

г) робить загальний висновок.

1.2. Правила техніки безпеки під час виконання лабораторного практикуму

Правила техніки безпеки та поведінки в лабораторії механіки

Під час виконання лабораторних робіт із механіки потрібно неухильно дотримуватися правил техніки безпеки, які стосуються передусім життя та здоров'я тієї людини, котра працює з приладами (викладач, студент). Крім того, потрібно враховувати ще правила техніки безпеки стосовно приладів, які використовуються для проведення лабораторних робіт. Збереження справності приладів навчального фізичного експерименту – одна з важливих складових частин техніки безпеки загалом.

Проаналізуємо основні правила техніки безпеки, яких потрібно дотримуватися під час проведення робіт лабораторного практикуму.

1. До роботи в лабораторії допускаються лише особи обізнані з інструкцією і правилами техніки безпеки.

2. Вивчивши зміст інструкції студент розписується в журналі з техніки безпеки і несе відповідальність за її виконання.

3. Під час роботи в лабораторії будьте обережними, додержуйте порядку і чистоти на робочому місці, виконуйте правила техніки безпеки. Безладність, поспішність, недбалість у роботі й порушення правил техніки безпеки можуть привести до нещасних випадків.

4. Перед початком роботи:

а) чітко з'ясуйте порядок і правила безпечного проведення досліду;
б) звільніть робоче місце від усіх непотрібних для роботи предметів;

в) перевірте наявність і справність приладів, при пошкодженні негайно повідомте керівника.

5. Лабораторну роботу категорично забороняється виконувати без дозволу викладача.

6. Забороняється виконання лабораторних робіт у випадку відсутності викладача, або лаборанта, який відповідає за лабораторію.

7. Не можна доторкатися до неізольованих частин електричних установок, оголених провідників, які перебувають під напругою.

8. Не слід самостійно робити будь-які сполучення на головному розподільному щиті.

9. Ставити і замінити плавкі запобіжники в установках і приладах можна лише з дозволу керівника при вимкнутій напрузі.

10. Складати коло за схемою можна тільки при вимкнутій напрузі.

11. Вимикаючи шнури зі штепсельними вилками із розеток, треба витягати їх за корпус, а не за шнур.

12. Розбираючи електричне коло, спочатку слід від'єднати джерело струму, потім – решту приладів.

13. Вмикати напругу в колі за складеною схемою можна лише з дозволу викладача.

14. Надійно здійснювати кріплення рухомих частин лабораторних установок, не ставати в площині обертання рухомих частин.

15. Чітко виконувати правила техніки безпеки вказані в інструкціях до лабораторних робіт і приладів.

16. Не відволікайтесь самі і не відволікайте інших від роботи сторонніми розмовами.

17. Виконувати роботи не пов'язані із завданням і не доручені викладачем забороняється.

18. Не переставляти і не переносити прилади і матеріали з одного робочого місця на інше.

19. Під час заняття забороняється ходити по лабораторії.

20. Якщо під час роботи установка чи прилад вийшов з ладу, відбулась поломка чи розбиття приладу, про це негайно треба повідомити керівника заняття.

21. У випадку ураження струмом – негайно вимкнути вимикач на головному розподільному щиті: щоб звільнити потерпілого від електричного струму, повідомити керівника та організувати першу

допомогу, одночасно викликавши швидку медичну допомогу.

Робота з електричним струмом. Результати дії електричного струму на організм людини залежать від сили струму, його частоти, тривалості дії, шляху проходження струму й індивідуальних особливостей людини.

Для змінного струму промислової частоти (50 Гц) безпечна сила струму становить 0,01 А. Струм силою 0,015 А спричинює хворобливий стан; людина може втратити свідомість. Струм силою 0,05 А вважається небезпечним для життя, а проходження через організм людини струму силою 0,1 А призводить до смерті.

Для постійного струму безпечна межа становить 0,05 А.

Струм частотою понад 150–200 кГц менш небезпечний для організму, ніж струм промислової частоти.

Небезпека ураження струмом підвищується із збільшенням тривалості дії струму на людину. Якщо час дії менший від 0,1 с, то організм може витримати струм силою в кілька ампер. Під час тривалішої дії настає параліч дихання, а потім – і серця. Ступінь небезпеки ураження електричним струмом залежить також від нервового стану людини. Людина стомлена, роздратована, морально пригнічена, більш вразлива, ніж здорова і врівноважена.

Якщо в організмі є хоч незначна кількість алкоголю, то електричний опір такого організму різко знижується, що підвищує небезпеку ураження струмом.

1.3. Похибки та їхнє оцінювання під час обробки результатів вимірювання

Фізика – одна із природничих наук, яка широко використовує у своїх дослідженнях експеримент. Розрізняють три види експерименту: якісний, кількісний, мислений. Кількісний експеримент неможливий без вимірювання відповідних фізичних величин. Вимірювання – одна з найдавніших операцій, яку виконує людина в процесі пізнання матеріального світу.

Вимірювання – це процес знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. У наукових дослідженнях використовують різні методи вимірювання, залежно від природи вимірювальної фізичної величини, засобів вимірювання, потрібної точності, швидкості.

Метод вимірювання – це використання сукупності відповідних наукових принципів та засобів вимірювання задля визначення числового значення відповідної фізичної величини.

Залежно від природи вимірюваної величини, будови засобу вимірювання, потрібної точності, зручності і швидкості вимірювання застосовують різні методи вимірювання (сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання):

- метод безпосереднього оцінювання – метод вимірювання, при якому значення величини визначають за відліковим пристроєм вимірювального приладу прямої дії (це прилад, в якому передбачене перетворення (одне чи декілька) одержаної інформації в одному напрямі (без зворотного зв'язку)), секундомір, манометр, термометр, амперметр;

- метод порівняння з мірою – вимірювану величину порівнюють з величиною відтвореною мірою (зважування на терезах при зрівноваженні маси тіла гирями);

- метод протиставляння – це метод, при якому і вимірювана величина і величина, відтворена мірою одночасно впливають на прилад порівняння (знаходження маси на терезах, коли на шальку кладуть і тіло і гирьки);

- диференційований метод – метод порівняння з мірою, коли на прилад впливає різниця вимірюваної величини та відомої величини, яка відтворюється мірою;

- нульовий метод – метод порівняння з мірою, коли результуючий ефект впливу величин на прилад порівняння доводять до нуля (важільні терези, амперметр з нульовою точкою);

- метод заміщення – метод порівняння з мірою, при якому вимірювану величину заміщають відомою величиною, яка відтворюється мірою;

- метод збігів – метод порівняння з мірою, при якому різницю між вимірюваною величиною і величиною, яка відтворюється мірою, знаходять, використовуючи збіг позначок шкали, або періодичних сигналів (ноніус, явище биття, інтерференція, резонанс, стробоскопічний ефект).

Під час кожного вимірювання фізичної величини, незалежно від того, який використовується метод вимірювання, неминучі похибки. Похибки вимірювань зумовлені різними причинами. За характером зміни фізичної величини похибки поділяють на такі три види:

1. *Систематичні*, зумовлені дією незмінних факторів, а саме:

а) похибки засобів вимірювання, які залежать від конструкції вимірювальних приладів (*інструментальні похибки*);

б) похибки методу вимірювання, які залежать від вибраного методу вимірювання (*методичні похибки*).

2. *Випадкові* – це похибки, які змінюються випадково під час повторних вимірювань тієї самої величини без будь-якої очевидної закономірності. Ці похибки виникають унаслідок одночасної дії багатьох відомих та невідомих причин (дія навколишнього середовища, недосконалість органів відчуттів експериментатора тощо).

3. *Промахи* – це похибки вимірювань, які істотно перевищують очікувану за певних умов похибку. Вони зумовлені неухважністю експериментатора, неправильними поводженням із засобами вимірювання. Похибки такого типу ліквідовуються шляхом повторних вимірювань.

У процесі вимірювання ці види похибок проявляються одночасно і загальна похибка вимірювань може бути виражена їхньою сумою.

За способом обчислення, змістом та критерієм оцінювання точності вимірювання похибки поділяються на *абсолютні* й *відносні*.

Абсолютна похибка обчислюється так:

$$\Delta N_i = N - N_c,$$

де N_c – середнє значення фізичної величини, здобуте під час кількох вимірювань; N – істинне значення вимірювальної величини, яке залишається невідомим. Істинне значення лежить у таких межах:

$$N = N_c \pm \Delta N. \quad (2.1)$$

Абсолютна похибка має розмірність вимірювальної фізичної величини.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірювальної величини:

$$\gamma = \frac{\Delta N}{N}. \quad (2.2)$$

Вона вимірюється у відносних одиницях або у відсотках.

Кожен експериментатор намагається якомога точніше виконати вимірювання. Однак відлік "на око" десятих часток поділок навіть за найбільш сприятливих умов не гарантує достатньої надійності вимірювання, тому в навчальних лабораторіях рекомендовано проводити відлік відповідних вимірювань із точністю до половини мінімальної поділки шкали приладу. Звідки випливає таке практичне правило: *якщо невідома похибка вимірювального приладу, то її можна оціночно вважати такою, яка дорівнює половині ціни поділки шкали*

приладу. Це й буде абсолютна похибка ΔA вимірювальної фізичної величини.

На практиці дуже рідко доводиться обмежуватися вимірюванням лише однієї фізичної величини й обчислювати її похибку. Здебільшого для одержання відповідного результату потрібно виміряти декілька фізичних величин, а з їх числовими значеннями виконати відповідні математичні обчислення. Знаючи похибки, які бувають під час вимірювання кожної з фізичних величин, котрі входять у кінцевий результат, можна обчислити на основі відповідної теорії похибку кінцевого результату.

У наведеній нижче табл. 1 подано формули для обчислення абсолютних та відносних похибок вимірювання кількох фізичних величин, над числовими значеннями яких виконано відповідні математичні операції.

Правила визначення *випадкових похибок* вивчаються в теорії похибок – математичній дисципліні, яка ґрунтується на законах теорії ймовірностей. Ми наведемо лише деякі висновки з теорії похибок, які необхідні для математичної обробки результатів вимірювання.

Випадкові похибки підпорядковуються нормальному розподілу (розподілу Гаусса). Для оцінювання точності результатів вимірювання найчастіше користуються стандартною (середньоквадратичною) похибкою, яку знаходять із закону розподілу випадкових похибок.

Оцінкою середньої квадратичної похибки $\sigma_{\bar{x}}$ є величина $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$, яку обчислюють за формулою

$$\frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}},$$

де \bar{x} – середнє арифметичне значення вимірювальної величини;
 x_i – результат i -го вимірювання.

Результат вимірювання записують у вигляді такої нерівності:

$$\bar{x} - \frac{S_n}{\sqrt{n}} \leq x_0 \leq \bar{x} + \frac{S_n}{\sqrt{n}},$$

або в інтервальній формі:

$$x_0 = \bar{x} \pm \frac{S_n}{\sqrt{n}},$$

де x_0 – дійсне значення вимірювальної величини, яке близьке до істинного значення x і є його найкращою числовою оцінкою.

№ з/п	Математична операція	Похибка	
		абсолютна похибка	відносна похибка
1	$N = A + B + C$	$\Delta N = \pm(\Delta A + \Delta B + \Delta C)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C}{A + B + C}\right)$
2	$N = A - B$	$\Delta N = \pm(\Delta A + \Delta B)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}\right)$
3	$N = A \cdot B$	$\Delta N = \pm(A\Delta B + B\Delta A)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}\right)$
4	$N = A \cdot B \cdot C$	$\Delta N = \pm(BC\Delta A + AC\Delta B + AB\Delta C)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}\right)$
5	$N = \frac{A}{B}$	$\Delta N = \pm\frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}\right)$
6	$N = A^n$	$\Delta N = \pm n \cdot A^{n-1} \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm n \cdot \frac{\Delta A}{A}$
7	$N = \sqrt[n]{A}$	$\Delta N = \pm \frac{1}{n} \cdot A^{\frac{1}{n}-1} \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta A}{A}$
8	$N = \sin A$	$\Delta N = \pm \cos A \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \operatorname{ctg} A \cdot \Delta A$
9	$N = \cos A$	$\Delta N = \pm \sin A \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \operatorname{tg} A \cdot \Delta A$
10	$N = \operatorname{tg} A$	$\Delta N = \pm \frac{\Delta A}{\cos^2 A}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{2\Delta A}{\sin 2A}$
11	$N = \operatorname{ctg} A$	$\Delta N = \pm \frac{\Delta A}{\sin^2 A}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{2\Delta A}{\sin 2A}$
12	$N = \ln A$	$\Delta N = \pm \frac{\Delta A}{A}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{\Delta A}{A \cdot \ln A}$

Проміжок $\left[\bar{x} - \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right]$ називають надійним або довірчим інтервалом. Підрахунки показують, що цей інтервал, який визначається середньою квадратичною похибкою $\sigma_{\bar{x}}$, містить дійсне значення вимірюваної величини з надійною або довірчою імовірністю $\alpha = 0,68$; подвоєній середній квадратичній похибці ($2\sigma_{\bar{x}}$) відповідає надійна ймовірність – 0,95, потроєній ($3\sigma_{\bar{x}}$) – 0,997. Можна сформулювати запитання інакше: який надійний інтервал слід вибрати, щоб приблизно 81 % результатів попали в нього? Із відповідних таблиць знаходимо, що

значенню надійної ймовірності $\alpha = 0,81$ відповідає частка середньої квадратичної похибки $\frac{\Delta x}{\sigma_{\bar{x}}} = 1,3$. Отже, вибраному $\alpha = 0,81$ відповідає

надійний інтервал $\left[\bar{x} - 1,3 \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + 1,3 \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right]$. Отже, для характеристики величини випадкової похибки потрібне знання двох чисел: значення самої похибки (або надійного інтервалу) та значення надійної ймовірності.

Однак користуватися формулами нормального розподілу випадкових похибок для визначення надійного інтервалу при заданій надійній ймовірності або навпаки можна лише для великої кількості вимірювань (практично при $n \geq 10$). Насправді ж число вимірювань здебільшого невелике, і часто в лабораторних роботах, наукових дослідженнях користуються результатами, які дістали з двох-трьох вимірювань. За малої кількості вимірювань користуються розподілом Стюдента, який дає змогу обчислити значення коефіцієнтів $t_{\alpha,n}$ для будь-якого значення надійної ймовірності α та числа вимірювань n . Значення коефіцієнтів Стюдента $t_{\alpha,n}$ для різних значень α і n наведено у відповідних таблицях. У цьому разі надійний інтервал випадкової похибки задається аналогічно до попереднього:

$$\left[\bar{x} - t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right].$$

Для оцінювання точності вимірювань користуються відносною похибкою E , яка визначається таким відношенням:

$$E = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100 \%.$$

Для оцінювання максимально можливих, граничних похибок користуються правилом трьох сигма. Згідно з цим правилом значення

$3S_n = 3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$ є межею випадкового відхилення спостереження.

Значення відхилення окремого спостереження понад $3S_n$ вважають промахом і під час обробки результатів вимірювання не враховують.

Інколи на практиці для оцінювання випадкової похибки користуються середньою арифметичною. Хоча вона легше

обчислюється, ніж $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$, середню арифметичну похибку

використовують рідко, оскільки для неї не обчислені відповідні значення надійної імовірності. Згідно з теорією випадкових похибок, тільки при виконанні десяти й більше дослідів випадкова похибка не перевищує середньої арифметичної:

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i|.$$

Якщо проведено 7...8 дослідів, то $\Delta\bar{x}$ треба збільшити у два рази, щоб гарантувати належність дійсного значення вимірювальної величини інтервалу $[\bar{x} \pm 2\Delta\bar{x}]$. Якщо буде зроблено п'ять вимірювань, то $\Delta\bar{x}$ доводиться збільшувати в три рази. Потроєну середню арифметичну похибку $3\Delta\bar{x}$ ще називають межею випадкової похибки. При числі вимірювань $n < 5$ оцінити надійність одержаних результатів за допомогою середньої арифметичної похибки неможливо.

Природно постає запитання про кількість повторних вимірювань. Відповісти на нього можна лише в ході самого експерименту на основі аналізу одержаних результатів, порівняння випадкової й інструментальної похибок. Ситуація проясняється при двох-трьох повторних вимірюваннях. Якщо результати вимірювань збігаються (випадкові похибки не проявилися: вони менші інструментальної), то продовжувати вимірювання немає сенсу. Якщо ж проявляються випадкові похибки (є розкид даних), то проводять серію із п'яти - десяти повторних вимірювань.

Одноразові вимірювання не можуть дати достовірних і надійних результатів. Крім того, одиничний результат може бути промахом. Водночас слід зауважити, що в ряді лабораторних робіт із молекулярної фізики повторні вимірювання за час, відведений на виконання роботи, провести не вдається (тривале охолодження системи до початкового стану, швидка зміна температури тощо). У таких випадках доводиться обмежуватись інструментальними похибками або звертатися до графічного методу обробки результатів вимірювання. Цей метод дає змогу швидко знаходити функціональні залежності між величинами, обчислювати значення різних параметрів, графіки дають можливість легко та швидко виявляти грубі похибки. Для цього первинну графічну обробку даних слід виконувати безпосередньо під час експерименту, тоді передбачуваний хибний результат негайно перевіряється.

Більшість фізичних величин не можна визначити в лабораторних умовах *прямими вимірюваннями*. *Непрямими*, або *опосередкованими* вимірюваннями називаються такі, у яких шукана величина виражається явною функцією інших величин, які обчислюють безпосередніми

вимірюваннями.

Похибки опосередкованих вимірювань визначаються за похибками безпосередньо вимірюваних величин. Безпосередньо вимірювані величини вважатимемо аргументами, а посередньо вимірювані – функціями. Якщо опосередковано вимірювана величина є функцією багатьох аргументів

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.3)$$

то середня квадратична похибка обчислюється за загальною диференціальною формулою

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (2.4)$$

де Δx_i – величини малі й мають однакове значення надійної імовірності α .

Відносна середня квадратична похибка посереднього вимірювання

$$E = \pm \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{f} \frac{df}{dx_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (2.5)$$

Оскільки $\frac{1}{f} \frac{df}{dx_i} \Delta x_i = \pm \frac{d}{dx_i} \ln f \cdot \Delta x_i$, то

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d}{dx_i} \ln f \cdot \Delta x_i \right)^2}. \quad (2.6)$$

Отже, на практиці для обчислення E потрібно спочатку функцію прологарифмувати, а потім знайти частинні диференціали натуральних логарифмів кожного з n аргументів.

Отож формула (2.6) значно простіша за формулу (2.4), тому у випадку, коли залежність (2.3) виражена формулою, зручною для логарифмування, простіше спочатку визначити відносну похибку за

(2.6), потім із виразу $E = \pm \frac{\Delta y}{y}$ знайти абсолютну похибку. У виразах,

які не логарифмуються, простіше відразу обчислити абсолютну, а потім відносну похибки.

Оцінюючи похибки результату у випадку непрямих вимірювань, слід звертати увагу також на те, яка буде внесена систематична похибка внаслідок заокруглення табличних величин, фізичних констант, які входять у робочу формулу.

Числові значення фізичних величин, взяті з довідкових таблиць,

заокруглюють за основними правилами. Звідси випливає, що різниця між записами в таблиці й незаокругленим значенням будь-якої величини не перевищує половини одиниці останнього розряду заокругленого значення. Наприклад, якщо в таблиці вказано, що густина ртуті $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, то абсолютна похибка $\Delta\rho = 0,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Якщо в таблиці значення атмосферного тиску записано у вигляді $P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, то $\Delta P = 0,005 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Числа, які записуються в таблицю, часто містять спільний множник виду 10^n , де n – ціле додатне або від'ємне число. Для того, щоб щоразу не повторювати відповідний множник, у таблицю зручно записувати не саму величину, а зменшену (при $n > 0$) або збільшену (при $n < 0$) в 10^n разів. Наприклад, замість температурного коефіцієнта лінійного розширення алюмінію $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, у таблицю записують величину в 10^{+6} разів більшу, тобто $\alpha \cdot 10^{+6} = 23,8 \text{ К}^{-1}$.

У таблицях може бути наведено й точні значення фізичних величин. Тоді їх похибки, звичайно, дорівнюють нулю. Наприклад, значення $\sin 30^\circ = 0,5$.

1.4. Інформація про Міжнародну систему одиниць

Інтенсивний розвиток науки й техніки, розширення торговельних зв'язків між країнами стало основною причиною, яка стимулювала розвиток метрології як науки, унаслідок чого створено єдину Міжнародну систему одиниць (СИ), яка охопила всі галузі вимірювань.

Учені всього світу понад сто років працювали над створенням такої універсальної системи одиниць вимірювань, яка була б побудована з урахуванням найбільш строгих метрологічних вимог і яка була б придатна для міжнародних відносин.

Це питання розглядалося на IX (1948), X (1954) і XI (жовтень 1960 р.) Генеральних конференціях з міри і ваги. На XI Генеральній конференції з міри і ваги прийнято рішення про встановлення практичної системи одиниць вимірювань із шістьма основними одиницями, а саме: одиниця довжини – метр; одиниця маси – кілограм; одиниця часу – секунда; одиниця температури – кельвін; одиниця сили струму – ампер; одиниця сили світла – кандела. Пізніше введено ще одну основну одиницю – одиницю кількості речовини – моль.

Цю універсальну систему одиниць названо Міжнародною системою одиниць вимірювань (міжнародне позначення – SI; українське –

СИ). У СИ було введено дві додаткові одиниці: одиниця плоского кута – радіан; одиниця тілесного кута – стерадіан.

Основні одиниці СИ

Величина		Одиниця СИ		
найменування	розмір-ність	найменування	позначення	
			міжнародн е	українсь ке
Довжина	L	метр	<i>m</i>	<i>м</i>
Маса	M	кілограм	<i>kg</i>	<i>кг</i>
Час	T	секунда	<i>s</i>	<i>с</i>
Сила електричного струму	I	ампер	<i>A</i>	<i>А</i>
Термодинамічна температура	Θ	кельвін	<i>K</i>	<i>К</i>
Кількість речовини	N	моль	<i>mol</i>	<i>моль</i>
Сила світла	J	кандела	<i>cd</i>	<i>кд</i>

Означення основних одиниць СИ

Метр дорівнював 1650763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома кріптону – 86 (XI Генеральна конференція з мір та ваг, 1960 р.).

На XVII ГКМВ (1983 р.) було сформульовано і прийнято нове визначення метра, яке ґрунтується на швидкості світла з урахуванням досягнень лазерної техніки та квантової електроніки. Введення його в практику дало змогу суттєво підвищити точність лінійних вимірювань.

За цим визначенням метр дорівнював відстані, яку проходить у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за $1/299\,792\,458$ частку секунди.

Чинне (2019): Метр визначається фіксацією числового значення швидкості світла у вакуумі $c = 299\,792\,458$ в одиницях $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, де секунда визначається через частоту випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

Кілограм дорівнював масі міжнародного прототипу кілограма (I ГКМВ, 1889 р. і III ГКМВ, 1901 р.).

До 2019 р. одиниця маси, кілограм, була прив'язана до маси циліндра зі сплаву платини та іридію, який зберігався у французькому місті Севр. Однак кілька міжнародних звірянь національних копій, виготовлених з того ж матеріалу, показали що їх маси змінюються щодо головного еталону в діапазоні ± 50 мікрограмів за 100 років. У зв'язку з такою неточністю було ухвалено рішення "відв'язати" кілограм від матеріального носія-еталону. Тепер він буде визначатися через постійну Планка. Установка, за допомогою якої можна реалізувати новий еталон маси, має назву ваги Кіббла. У таких вагах еталоном є вантаж, який врівноважує силу відштовхування між постійним магнітом і котушкою, через яку пропускають струм. Так, масу об'єкта можна знайти за рахунок рівності електричної і механічної сил.



Завдяки новому визначенню кілограма, кожна країна зможе відтворювати еталонну установку самостійно в будь-який час, не вдаючись до звірення з головним еталоном.

Чинне (2019): кілограм визначається через сталу Планка h , яка точно дорівнює $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (Дж = $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$), та визначення метра і секунди.

Секунда дорівнювала 9192631770 періодів випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію – 133 за температури 0 К (XII ГКМВ, 1967 р.).

Чинне (2019): Секунда визначається прийняттям фіксованого числового значення частоти надтонкого розщеплення основного стану

атома цезію-133, що дорівнює точно 9192631770, коли вона виражена одиницею SI Гц, яка еквівалентна s^{-1} .

Ампер дорівнював силі незмінного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та нескінченно малого кругового поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1м один від одного, зумовив би на кожній ділянці провідника завдовжки 1м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н (IX ГКМВ, 1948 р.).

Чинне (2019): ампер встановлюється фіксацією числового значення елементарного електричного заряду e , коли він виражений одиницею Кл, що відповідає $A \cdot s$, де секунда визначається через частоту випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133. Тепер вчені вирішили зафіксувати числове значення електричного заряду для нового визначення ампера. Елементарний електричний заряд e дорівнюватиме точно $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ (Кл)

Кельвін дорівнював $1/273,16$ частини термодинамічної температури потрійної точки води (XIII ГКМВ, 1967 р.).

Чинне (2019): кельвін визначається через встановлення фіксованого числового значення сталого Больцмана k рівним $1,380649 \cdot 10^{-23}$ в одиницях Дж $\cdot K^{-1}$, або в основних одиницях SI: кг \cdot м² \cdot с⁻² \cdot К⁻¹, де кілограм, метр і секунда визначаються через h , c і $\Delta\nu_{Cs}$. (h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі, $\Delta\nu_{Cs}$ – частота, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями незбуреного основного стану атома цезію ^{133}Cs)

Моль дорівнював кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці – 12 масою 0,012 кг.

При застосуванні моля структурні елементи мають бути специфіковані й можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами та іншими частинками або специфікованими групами частинок (XIV ГКМВ, 1971 р.).

Чинне (2019): Один моль містить точно $6,02214076 \cdot 10^{23}$ формульних одиниць. Це число є фіксованим значенням сталої Авогадро (N_A), коли виражається в одиниці моль⁻¹ і називається числом Авогадро

Кандела дорівнює силі світла у заданому напрямку джерела, що випромінює монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц,

енергетична сила світла якого у цьому напрямку становить 1/683 Вт/ср (XVI ГКМВ, 1979 р.).

Чинне (2019): кандела визначається прийняттям фіксованого числового значення сили світла монохроматичного випромінювання частотою 540×10^{12} Гц, зі світловою віддачею K_{cd} , яка дорівнює $683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$, що є еквівалентним $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{Вт}^{-1}$ або в основних одиницях SI $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^3$, де кілограм, метр і секунда визначаються через h , c і $\Delta\nu_{Cs}$ (h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі, $\Delta\nu_{Cs}$ – частота, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями незбуреного основного стану атома цезію ^{133}Cs)

Похідні механічні одиниці *SI*, які мають спеціальні найменування

№ з/п	Величина найменування	розмірність	найменування	Одиниця		
				позначення		вираз через основні
				міжнародне	українське	
1	Частота	T^{-1}	герц	<i>Hz</i>	<i>Гц</i>	s^{-1}
2	Сила, вага	$LM T^{-2}$	ньютон	<i>N</i>	<i>Н</i>	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
3	Тиск, механічна напруга, модуль пружності	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	<i>Pa</i>	<i>Па</i>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
4	Енергія, робота, кількість теплоти	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	<i>J</i>	<i>Дж</i>	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
5	Потужність, потік енергії	$L^2 M T^{-3}$	ват	<i>W</i>	<i>Вт</i>	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
6	Плоский кут	-	радіан	<i>rad</i>	<i>рад</i>	-
7	Тілесний кут	-	стерадіан	<i>sr</i>	<i>ср</i>	-

Радіан дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

Стерадіан дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, котра дорівнює радіусу сфери.

На XX Генеральній конференції з мір і ваг (1995 р., резолюція 8) радіан і стерадіан визначено як безрозмірнісні похідні одиниці, назви й позначення яких не обов'язково мають використовуватися у вираженні інших похідних одиниць *SI*.

**Позасистемні одиниці, які допускаються до застосування
нарівні з одиницями СІ**

Величина найменування	Одиниця			співвідношення з одиницею СІ
	найменуван -ня	позначення міжн.	укр.	
Маса	тонна	<i>t</i>	<i>т</i>	10^3 кг
	атомна оди- ниця маси	<i>u</i>	<i>а.о.м.</i>	$\approx 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Час	хвилина	<i>min</i>	<i>хв</i>	60 с
	година	<i>h</i>	<i>год</i>	3600 с
	доба	<i>d</i>	<i>доба</i>	$86\,400 \text{ с}$
Плоский кут	градус	\dots°	\dots°	$\pi/180 \text{ рад} =$ $1,745329 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$
	мінута	\dots'	\dots'	$\pi/10\,800 \text{ рад}$
	секунда	\dots''	\dots''	$\pi/648\,000 \text{ рад}$
	град	<i>g(gon)</i>	<i>град</i>	$\pi/200 \text{ рад}$
Об'єм, місткість	літр	<i>l</i>	<i>л</i>	10^{-3} м^3
Температура Цельсія, різниця температур	градус Цельсія	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$t = T - T_0$, де $T_0 =$ $273,15 \text{ К}$
Відносна величина (безрозмірне відношення фізичної величини до однойменної фізичної величини, узятої за вихідну: ККД, масова частка)	відсоток	%	%	10^{-2}
	проміле	‰	‰	10^{-3}
	мільйонна частка	<i>ppm</i>	<i>млн⁻¹</i>	10^{-6}
Логарифмічна величина (логарифм безрозмірного відношення фізичної величини до однойменної фізичної величини, узятої за вихідну: рівень звукового	бел	<i>B</i>	<i>Б</i>	$1 \text{ Б} = \lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10 \cdot P_1$ (для енер- гетичних од.) $1 \text{ Б} = 2 \cdot \lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10} F_1$ (для "силових" величин: тиск, напруга, сила струму)

тиску, підсилення, послаблення)	децибел	<i>dB</i>	дБ	0,1 Б
Частотний інтервал	октава	-	<i>окт</i>	1 <i>окт</i> = $\log_2(f_2/f_1)$ при $f_2 = 2 \cdot f_1$
	декада	-	<i>дек</i>	1 <i>дек</i> = $\lg(f_2/f_1)$ при $f_2 = 10 \cdot f_1$

**Одиниці системи СГС , які мають власне найменування,
та інші одиниці, які використовуються у фізиці**

Величина найменування	Одиниця			
	найменування	позначення		Співвідношення з одиницею СІ
		міжн.	укр.	
Довжина	ангстрем	<i>Å</i>	<i>Å</i>	10^{-10} м
	мікрон	<i>μ</i>	<i>мк</i>	10^{-6} м
Сила, вага	дина	<i>dyn</i>	<i>дин</i>	10^{-5} Н
	кілограм-сила	<i>kgf</i>	<i>кгс</i>	$9,80665 \text{ Н}$
	понд	<i>p</i>	-	$9,80665 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$
Тиск	кілограм-сила на квадратний сантиметр	<i>kgf/cm²</i>	<i>кгс/см²</i>	$98066,5 \text{ Па}$
	міліметр водяного стовпа	<i>mm H₂O</i>	<i>мм вод. ст.</i>	$9,80665 \text{ Па}$
	міліметр ртутного стовпа	<i>mm Hg</i>	<i>мм рт. ст.</i>	$133,322 \text{ Па}$
	тор	<i>Torr</i>		$133,322 \text{ Па}$
	фізична атмосфера	<i>atm</i>	<i>атм</i>	101325 Па
	технічна атмосфера	<i>at</i>	<i>ат</i>	$98066,5 \text{ Па}$
Напруга (механічна)	кілограм-сила на квадратний міліметр	<i>kgf/mm²</i>	<i>кгс/мм²</i>	$9,80665 \cdot 10^6 \text{ Па}$
Робота, енергія	ерг	<i>erg</i>	<i>ерг</i>	10^{-7} Дж
Потужність	кінська сила	-	<i>к.с.</i>	$735,499 \text{ Вт}$
Динамічна в'язкість	пуаз	<i>P</i>	<i>П</i>	$0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Кінематична в'язкість	стокс	<i>St</i>	<i>Ст</i>	$10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

Десяткові кратні та частинні одиниці

Для утворення десяткових кратних і частинних одиниць використовується ряд множників, які дорівнюють 10^n , де n – ціле додатне або від’ємне число, і префіксів до найменувань одиниць, по одній для кожного множника. Цей спосіб, уперше прийнятий ще під час створення метричної системи мір, дає змогу легко переводити числові значення величин під час переходу від одиниць *СІ* до кратних і частинних від них або від одних кратних і частинних одиниць до інших.

Множники та префікси для утворення десяткових кратних і частинних одиниць, а також їх найменувань наведено в таблиці.

Префікси *СІ* для утворення десяткових кратних і частинних одиниць

Множ- ник	Префікс	Символ		Множ- ник	Префікс	Символ	
		міжн.	укр.			міжн.	укр.
10^{24}	йота	<i>Y</i>	<i>Й</i>	10^{-1}	деци	<i>d</i>	<i>д</i>
10^{21}	зета	<i>Z</i>	<i>ЗТ</i>	10^{-2}	санти	<i>c</i>	<i>с</i>
10^{18}	екса	<i>E</i>	<i>Е</i>	10^{-3}	мілі	<i>m</i>	<i>м</i>
10^{15}	пета	<i>P</i>	<i>П</i>	10^{-6}	мікро	<i>μ</i>	<i>мк</i>
10^{12}	тера	<i>T</i>	<i>Т</i>	10^{-9}	нано	<i>n</i>	<i>н</i>
10^9	гіга	<i>G</i>	<i>Г</i>	10^{-12}	піко	<i>p</i>	<i>п</i>
10^6	мега	<i>M</i>	<i>М</i>	10^{-15}	фемто	<i>f</i>	<i>ф</i>
10^3	кіло	<i>k</i>	<i>к</i>	10^{-18}	атто	<i>a</i>	<i>а</i>
10^2	гекто	<i>h</i>	<i>г</i>	10^{-21}	зепто	<i>z</i>	<i>зп</i>
10^1	дека	<i>da</i>	<i>да</i>	10^{-24}	йокто	<i>y</i>	<i>й</i>

Примітка. Одиниці часу (хвилину, годину, добу), плоского кута (градус, мінуту, секунду), астрономічну одиницю, світловий рік, діоптрію й атомну одиницю маси не допускається застосовувати з префіксами.

При утворенні десяткових кратних і частинних одиниць слід керуватися певними правилами, установленими стандартом.

1. Не допускається приєднання до найменування одиниці двох або більше префіксів підряд. Наприклад, замість найменування одиниці мікромікрофарад слід уживати пікофарад.

2. Префікс або його позначення слід писати разом із найменуванням одиниці, до якої вона приєднується, або відповідно до її позначення.

3. Якщо одиницю утворено як добуток або відношення одиниць, то префікс слід приєднувати до найменування першої одиниці, котра входить до добутку або до відношення.

Правильно: кілопаскаль-секунда на метр ($kPa \cdot s/m$; $кПа \cdot с/м$).

Неправильно: Паскаль-кілосекунда на метр ($Pa \cdot ks/m$; $Па \cdot кс/м$).

4. Допускається застосовувати префікс в другому множнику добутку або в знаменнику лише в обґрунтованих випадках, коли такі одиниці дуже поширені. Наприклад, тонна-кілометр ($t \cdot km$; $т \cdot км$); ват на квадратний сантиметр (W/cm^2 ; $Вт/см^2$); вольт на сантиметр (V/cm ; $В/см$); ампер на квадратний міліметр (A/mm^2 ; $А/мм^2$).

5. Найменування кратних і частинних одиниць від одиниці, піднесеної до степеня, слід утворювати приєднанням префікса до найменування вихідної одиниці. Наприклад, кратною або частинними одиницями від одиниці площі – квадратного метра – будуть квадратний кілометр, квадратний дециметр, квадратний сантиметр, квадратний міліметр і т. д.

6. Позначення кратних і частинних одиниць від одиниці, піднесеної до степеня, слід утворювати доданням відповідного показника степеня до позначення кратної або частинної від цієї одиниці, при цьому показник означає піднесення до степеня кратної або частинної одиниці разом із префіксом. Наприклад:

а) $5 км^2 = 5 (10^3 м)^2 = 5 \cdot 10^6 м^2$;

б) $250 см^3/с = 250 (10^{-2} м)^3/(1 с) = 250 \cdot 10^{-6} м^3/с$;

в) $0,002 см^{-1} = 0,002 (10^{-2} м)^{-1} = 0,002 \cdot 100 м^{-1} = 0,2 м^{-1}$.

7. Вибір десяткової кратної або частинної одиниці від одиниці *SI* диктується насамперед зручністю її застосування. Із різних кратних і частинних одиниць, які можуть бути утворені за допомогою префіксів, вибирають таку, щоб числові значення величини лежали в межах від 0,1 до 1000.

8. Для зменшення імовірності помилок під час обчислень десяткові кратні та частинні одиниці рекомендується підставляти тільки в кінцевий результат, а під час обчислень усі величини слід виражати в одиницях *SI*, замінюючи префікси степенями числа 10.

9. Як десяткові кратні та частинні одиниці від основних і похідних одиниць *SI* рекомендуються такі:

Одиниці СІ			Десяткові кратні та часткові від одиниць СІ
найменування	позначення		позначення
	міжнародн	українське	міжнародні/українські
Метр	<i>m</i>	<i>м</i>	<i>km; cm; mm; μm; nm; pm; fm</i>
			<i>км; см; мм; мкм; нм; пм; фм</i>
Кілограм	<i>kg</i>	<i>кг</i>	<i>g; mg; μg</i>
			<i>г; мг; мкг</i>
Секунда	<i>s</i>	<i>с</i>	<i>ks; ms; μs; ns</i>
			<i>кс; мс; мкс; нс</i>
Ампер	<i>A</i>	<i>А</i>	<i>kA; mA; μA; nA</i>
			<i>кА; мА; мкА; нА</i>
Кельвін	<i>K</i>	<i>К</i>	<i>MK; kK; mK; μK</i>
			<i>МК; кК; мК; мкК</i>
Моль	<i>mol</i>	<i>моль</i>	<i>kmol; mmol; μmol</i>
			<i>кмоль; ммоль; мкмоль</i>
Кандела	<i>cd</i>	<i>кд</i>	
Радіан	<i>rad</i>	<i>рад</i>	<i>mrad; μrad</i>
			<i>мрад; мкрад</i>

РОЗДІЛ II. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторна робота № 1

Вимірювання лінійних величин

Мета роботи: навчитися робити вимірювання лінійних величин з допомогою штангенциркуля та мікрометра з необхідною точністю.

Прилади й матеріали: лінійка, штангенциркулі з різними ноніусами, мікрометри, штангенглибиномір, індикатор годинникового типу, набір вимірювальних тіл.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.

2. Вивчити конструкцію та технічні характеристики пропонованих вимірювальних приладів.

3. Здійснити необхідні вимірювання.

Теоретичні відомості й опис приладів

Для вимірювання лінійних величин застосовують найрізноманітніші способи, вибір яких визначається заданою точністю за умовами експерименту.

Для безпосередніх вимірювань довжини широко використовуються міри, як масштабна лінійка, металеві вимірювальні лінійки, рулетки без стабілізуючої основи. Точність вимірювання довжини цими мірами невисока. Ціна поділки, наприклад, масштабної лінійки становить 1 мм. Отже, точність вимірювання масштабною лінійкою не перевищує половини ціни поділки і дорівнює 0,5 мм.

Для більш точних вимірювань користуються приладами з

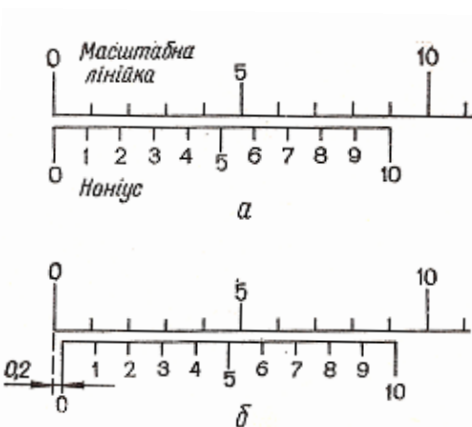


Рис. 1

ноніусом, який побудовано за принципом методу збігів. Ноніуси (у такому вигляді, як вони застосовуються тепер) винайшов у 1631 році у Франції директор Монетного двору Ц. Верньє. Тому їх правильно було б назвати верньєрами, як в геодезії. У фізиці та техніці їх прийнято називати за ім'ям португальця П. Нуніша (Nunes, латинізоване ім'я Nonius), який у 1542 році винайшов подібне, але менш зручне пристосування, що нині не

застосовується.

Метод лінійного ноніуса. Ноніусом називається невелика

додаткова шкала до звичайного масштабу, яка дає змогу підвищити точність вимірювання в 10 – 20 разів. Ноніус переміщується по основній шкалі. Розглянемо лінійний ноніус штангенциркуля. Ноніус для вимірювання з точністю до 0,1 мм являє собою шкалу певної довжини (закінчується на 9) , наприклад, 19 мм, поділену на 10 рівних частин (рис. 1,а). Тому одна поділка ноніуса дорівнює 1,9 мм. Коли нульова мітка (штрих) шкали ноніуса буде між певними мітками основної шкали штангенциркуля (рис. 1,б), то це означатиме, що до цілого числа міліметрів треба додати певне число x десятих часток міліметра. Будова ноніуса ґрунтується на тому, що людське око легко розрізняє, чи є два штрихи продовженням один одного, чи вони дещо зсунуті.

Для визначення числа x знаходимо мітку шкали ноніуса, яка збігається з якоюсь міткою основної шкали (на рис. 1,б це друга відмітка ноніуса). Нехай такою міткою буде n -на по порядку мітка шкали ноніуса. Оскільки вимірювана дробова частина міліметра дорівнює різниці між цілим числом міліметрів за основною шкалою штангенциркуля (n мм) і відстанню по шкалі ноніуса від нульової до мітки, що збігається (0,9 мм), можна записати $0,1x = n - 0,9n$, тобто $x = n$.

Отже, порядковий номер збіжної мітки ноніуса безпосередньо дає число десятих часток міліметра.

Шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,05 мм має 20 однакових поділок на довжині 19 мм, а шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,02 мм має 50 однакових поділок на довжині 49 мм. Мітка цих ноніусів, яка збігається з штрихом основної шкали, показує відповідно числа двадцятих або п'ятдесятих часток міліметра.

Отже, поділки на основній шкалі і шкалі ноніуса наносять так, що $n - 1$ поділка основної шкали дорівнює за довжиною поділкам ноніуса.

Якщо $\Delta\alpha_N$ і $\Delta\alpha_M$ відповідно ціни поділок ноніуса і основної шкали, то

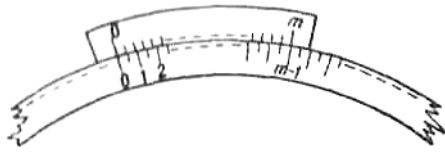
$$n\Delta\alpha_N = (n-1)\Delta\alpha_M,$$

звідки різниця цих поділок (тобто точність ноніуса)

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_M - \Delta\alpha_N = \frac{\Delta\alpha_M}{n}.$$

Точністю ноніуса називають величину $\frac{\Delta\alpha_M}{n}$ яка дорівнює відношенню ціни найменшої поділки основної шкали до числа поділок

ноніуса. Під точністю відліку за ноніусом розуміють ціну його поділки.

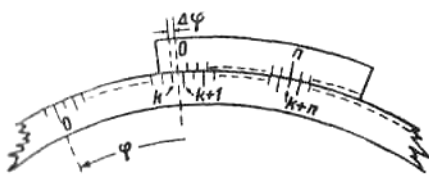


Круговий ноніус в принципі нічим не відрізняється від лінійного. Він є невеликою дуговою лінійкою, що ковзає уздовж круга (лімба), розділеного на градуси або на ще дрібніші ділення (рис.). На лінійці нанесені поділки також в кількості m , загальна довжина яких дорівнює $(m - 1)$ діленням лімба, тобто

$$m\alpha = (m - 1)\beta$$

де α і β – виражені в градусах або хвилинах ціни поділок ноніуса (α) і найменшої поділки лімба (β). Точність кругового ноніуса виражатиметься формулою

$$\Delta\alpha = \frac{\beta}{m}$$



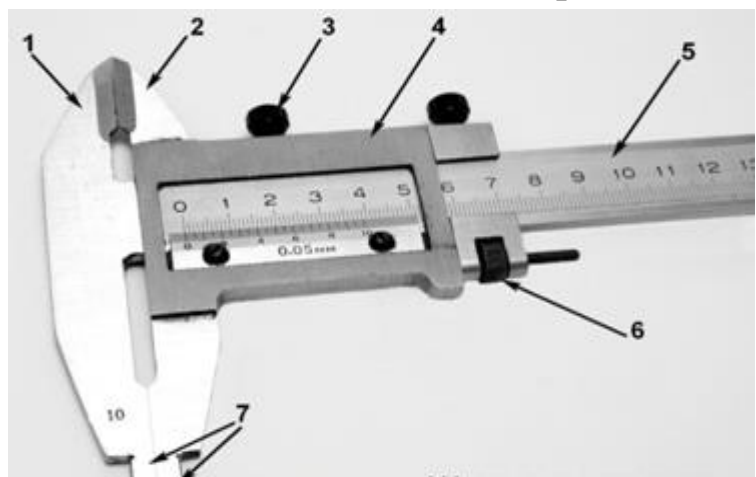
Відлічувані від нуля лімба кути (мал.) обчислюватимуться за формулою:

$$\varphi = k\beta + n\Delta\alpha$$

Часто кругові ноніуси в приладах, в яких необхідно відлічувати кути в обох напрямках (за годинниковою стрілкою і проти неї), складаються з двох абсолютно однакових шкал, розташованих по обидві сторони нуля. Зауважимо, що при відліках слід завжди користуватися тією шкалою, яка йде вперед по напрямку відліків. З числа кругових ноніусів, що найчастіше зустрічаються, вкажемо наступні:

β	1°	1°	30'	15'	15'	10'
m	12	30	30	15	30	20
$\Delta\alpha$	5'	2'	1'	1'	30"	30"

Точніші ноніуси застосовуються лише в особливо прецизійних приладах, зокрема в астрономічних. Інколи, але досить рідко, застосовуються ноніуси, які вказують десяткові долі градуса. У багатьох випадках для полегшення відліку ноніуси (обох видів) забезпечуються лупами, скріплені з ними, за



відсутності ж таких рекомендується користуватися для відліку звичайними ручними лупами.

Штангенциркуль (рис. 2) – це прилад для вимірювання лінійних розмірів з точністю від 0,1 до 0,02 мм. Штангенциркуль складається із сталюї лінійки (штанги) 5 з міліметровими поділками, відносно якої переміщується рамка 4 з ноніусом, і двох пар губок (ніжок) – нерухомих 1 і рухомих 2. При зімкнутих губках відлік за ноніусом дорівнює нулю. Між губками затискають вимірювану деталь. Щоб точно визначити розмір деталі, рухома губку штангенциркуля переміщують у момент дотику її до деталі за допомогою мікрометричного пристрою 6, щоб запобігти надмірному натисканню губок на деталь.

Закріплюють рухома губку на штанзі стопорним гвинтом 3 (при відповідних навичках роботи з штангенциркулем



гвинт 3 можна не закріплювати) і роблять відлік за ноніусом. Для вимірювання внутрішніх розмірів деталі є калібровані губки 7. Загальна ширина їх

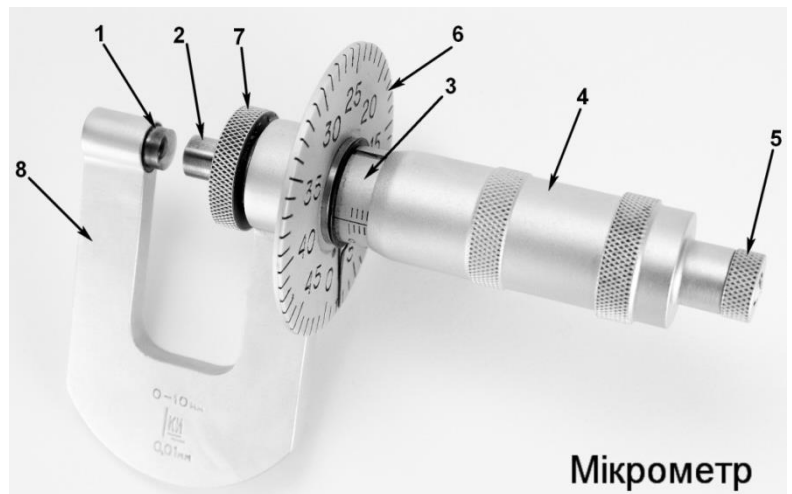
при зведених губках найчастіше дорівнює 10 мм; цей розмір треба додавати до відліку за шкалою. Деякі штангенциркулі мають також висувні лінійки для вимірювання глибини не наскрізних отворів.

Штангенглибиномір (рис. 3) побудований подібно до штангенциркуля, але пристосований для вимірювання глибини отворів і висоти виступів деталей. У штангенглибиномірі рамка 3 з ноніусом має опорну площину 2, якщо прилад спирається на край отвору, а штанга 1 опускається в отвір. Глибину отвору вимірюють по основній шкалі на штанзі і по ноніусу рамки так само, як і штангенциркулем.

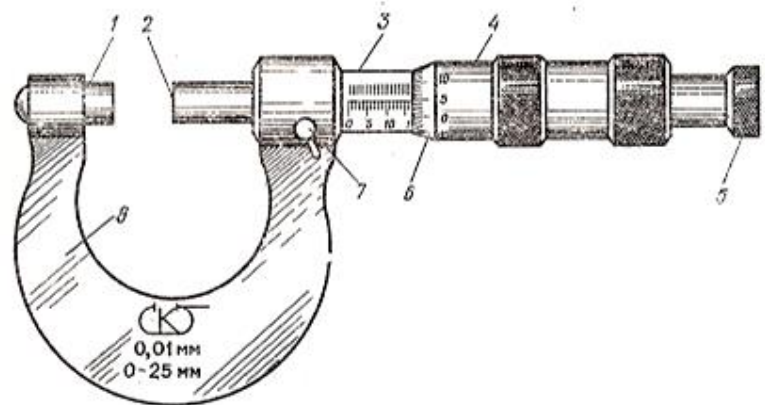
Мікрометр (рис. 4) – це інструмент для вимірювання лінійних розмірів з точністю до 0,01 мм. Він складається із сталюї скоби 8, що має нерухома опорну п'яту 1, стебла 3, мікрометричного гвинта 2 і

стопорного гвинта 7.

Мікрометричний гвинт переміщується всередині спеціальної гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі 3. Крок гвинта 0,5 – 1,0 мм. На зовнішній поверхні стебла нанесено дві поздовжні шкали, зсунуті одна відносно одної на 0,5 мм. Зовні стебло охоплює барабан 4, з'єднаний з мікрометричним гвинтом. Таким чином, при обертанні барабана обертається і гвинт; при цьому переміщується його



вимірювальна поверхня 2. Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступальне переміщення, пропорційне куту повороту. Скошений обід 6 барабана поділено на 50 (або 100) однакових поділок. На правому кінці барабана є особливий фрикційний пристрій – тріскачка 5. При вимірюванні слід обертати барабан тільки за головку тріскачки. Деталь при вимірюванні затискається між п'ятою і мікрометричним гвинтом. Після того, як досягнуто певного ступеня натиску на деталь (5–6 Н), фрикційна головка починає проковзувати, даючи характерний тріск. Завдяки цьому затиснута деталь деформується порівняно мало (її розміри не спотворюються) і, крім того, це запобігає псуванню мікрометричного гвинта.



Для відлічування показів мікрометра по шкалі стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. Для відлічування сотих часток міліметра користуються поділками на барабані (крок мікрометричного гвинта визначається заздалегідь).

Порядок виконання роботи

Вивчити конструкцію та технічні характеристики пропонованих вимірювальних приладів.

Виміряти лінійні розміри пропонованих тіл.

Вказати похибки отриманих вимірів.

Похибки прямих вимірювань.

Прямим (безпосереднім) називають вимірювання фізичних величин для яких створені еталони та вимірювальні прилади.

При прямих вимірюваннях точність виміру не перевищує точності використовуваного вимірювального приладу. За точністю вимірювальні прилади поділяють на 10 класів: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Клас точності приладу – це допустима відносна похибка (у відсотках) від межі вимірювання. Якщо про це не сказано спеціально, похибка прямого виміру дорівнює цінні поділки шкали (ноніуса) вимірювального приладу.

Як правило, абсолютну похибку записують однією значущою цифрою. Значущі цифри результату повинні закінчуватись у тому ж розряді десяткового числа, в якому лежить значуща цифра похибки. Виконується один варіант, який визначає викладач:

I. Вимірювання виконати штангенциркулем з точністю 0,05 мм (тіло №1).



Варіант 1. a – виміряти три рази; b, c, d – по разу.

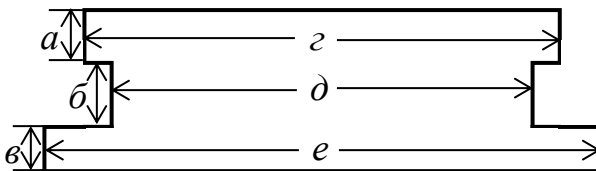
Варіант 2. b – виміряти три рази; a, c, d – по разу.

Варіант 3. c – виміряти три рази; a, b, d – по разу.

Варіант 4. d – виміряти три рази; a, b, c – по разу.

Варіант 5. d – виміряти три рази; a, b, c – по разу.

II. Виміри виконати штангенциркулем з точністю 0,1 мм (тіло №2).



Варіант 1. a – виміряти три рази; b, c, d, e – по разу.

Варіант 2. b – виміряти три рази; a, c, d, e – по разу.

Варіант 3. c – виміряти три рази; a, b, d, e – по разу.

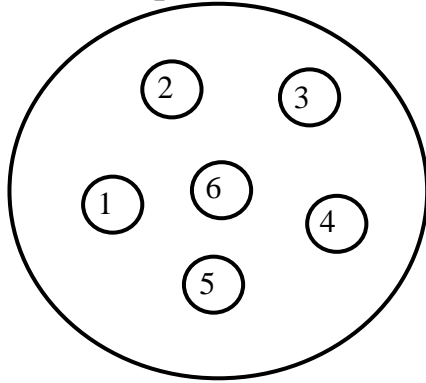
Варіант 4. d – виміряти три рази; a, b, c, e – по разу.

Варіант 5. δ – виміряти три рази; a, b, v, z, e – по разу.

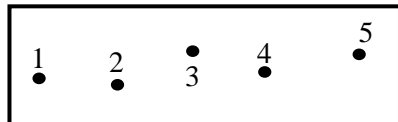
Варіант 6. e – виміряти три рази; a, b, v, z, δ – по разу.

III. Виміри виконати штангенглибиноміром з точністю 0,02 мм (тіло №3).

Один варіант для всіх.



IV. Вимірювання виконати мікрометром з точністю 0,01 мм (тіло №4).



Виміри зробити в п'яти точках (a, b, v, z, δ).

Один варіант для всіх.

Контрольні запитання та завдання

1. Назвати одиниці вимірювання довжин.
2. Назвати прилади для вимірювання довжин.
3. Яка будова штангенциркуля?
4. Яка ціна поділки основної шкали штангенциркуля та мікрометра?
5. Яка будова і призначення ноніусної шкали?
6. В чому суть методу збігів?
7. Якою може бути довжина ноніусної шкали?
8. Який зв'язок між точністю ноніусної шкали і кількістю її поділок?
9. Яка будова мікрометра?
10. Яка ціна поділки шкали барабана?
11. Яка основна одиниця довжини міжнародної системи і її означення?

Лабораторна робота № 2

Визначення прискорення сили земного тяжіння за допомогою математичного маятника та падаючого циліндра

Мета роботи: навчитись визначати на практиці величину прискорення сили земного тяжіння.

Прилади й матеріали: математичний маятник, прилад для визначення прискорення вільного падаючого тіла ЦП, автотрансформатор, штангенциркуль, рулетка, секундомір.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Визначити прискорення сили земного тяжіння за вимірними значеннями довжини і періоду коливань математичного маятника.
3. Визначити прискорення вільно падаючого тіла за допомогою спеціального приладу.

Теоретичні відомості та опис приладів

Для роботи необхідно: математичний маятник, секундомір.

Із елементарного курсу фізики відомо, що при малих кутах відхилення які не перевищують 4^0 , період повного коливання маятника виражається формулою

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1)$$

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

Як бачимо з формули, період коливань маятника залежить не від кута відхилення при $\varphi < 4^0$ і маси маятника, а від довжини маятника і прискорення сили земного тяжіння.

Для визначення прискорення земного тяжіння користуються даною формулою, розв'язавши її відносно g , тобто

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

Завдання 1. Визначення прискорення сили земного тяжіння за допомогою математичного маятника

Величина прискорення вільного падіння g змінюється в залежності від географічної широти і висоти над рівнем моря. Крім того, іноді, спостерігається і місцеві аномалії цієї величини. Напря-

прискорення вільного падіння з достатньою точністю збігається з напрямом нитки математичного маятника в положенні рівноваги. Хоча виготовити ідеальний математичний маятник неможливо, проте на практиці завжди можна одержати маятник, близький до ідеального математичного. Для цього на тонкій міцній дротині підвішують важку металеву кулю. Якщо маса дроту дуже мала в порівнянні з масою кулі, то нею можна знехтувати, а за довжину маятника взяти віддаль від верхньої точки закріплення дротини до центра кулі (центр кулі збігається з центром коливання маятника).

$$\text{Тоді довжина маятника } l = L + r = L + \frac{D}{2},$$

де L – довжина дротини, на якій підвішена куля;

D – діаметр кулі.

Підставляючи значення з цієї формули у формулу (2), одержуємо

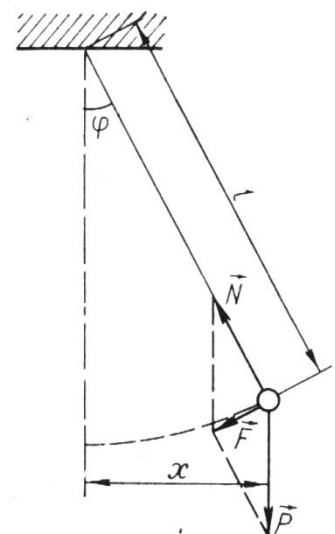
$$g = \frac{4\pi^2(L + \frac{D}{2})}{T^2} \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

1. За допомогою розсувної лінійки або рулетки знаходять довжину дротини, на якій підвішена металева кулька, з точністю до 1 см. Вимірюють діаметр кулі в різних напрямках з необхідною точністю, користуючись кронциркулем, масштабною лінійкою або штангенциркулем.

2. Обережно відхиляють металеву кулю на невеликий кут φ до 4° і відпускають, коливання повинні відбуватися в одній вертикальній площині.

3. Пропускають декілька коливань і включають секундомір у момент проходження маятника положення рівноваги. Для точного визначення положення рівноваги маятника під час коливання на стінці за маятником і перед ним закріплюють на рівні ока рамки з натягнутими посередині вертикальними нитками. При рівновазі маятника і дротина і нитки в рамках повинні лежати в одній вертикальній площині. Перед початком відліку коливань око має бути проти ниток рамок. Тоді при проходженні маятника через положення рівноваги його дротина зливається з дротинами рамок. Останній відлік коливань маятника треба робити при тому ж самому положенні ока.



4. Відлічивши сто повних коливань, зупиняють секундомір і обчислюють проміжок часу протягом якого вони відбулися. Потім знаходять період повного коливання

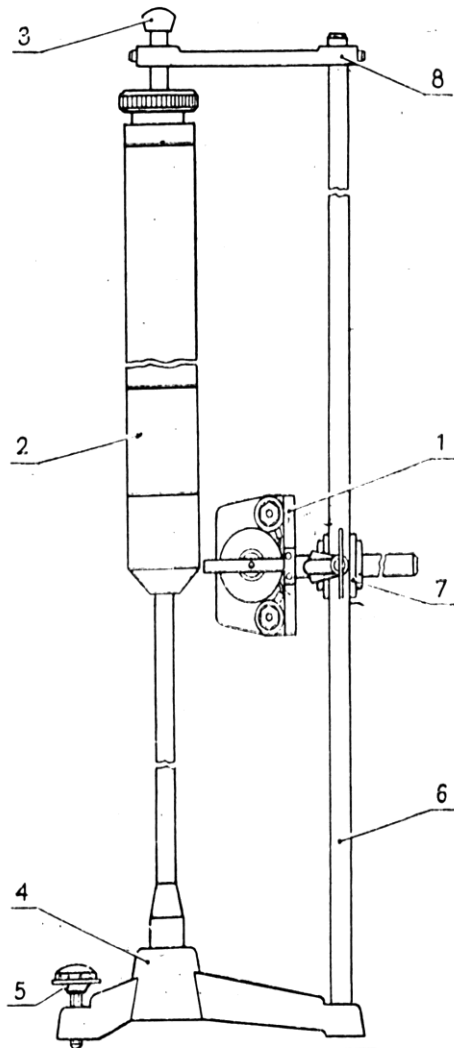
$$T = \frac{t}{n} \text{ (с).}$$

Дуже важливо точно визначити період T . Адже, як показує формула (3), g залежить від T^2 , і при обчисленні похибки g похибка T подвоюється.

5. Величини L , D та t вимірюють не менше 3-5 разів, підставляючи їх у

формулу:
$$g = \frac{4\pi^2 n^2 (L + \frac{D}{2})}{t^2} \quad (4)$$

обчислюють g .



Завдання 2. Визначення прискорення земного тяжіння за допомогою падаючого циліндра

Для роботи потрібні прилад для визначення прискорення вільного падіння падаючого тіла, регулятор напруги, вазелін.

Прилад складається (мал.1) із вібратора 1, металевого циліндра 2, пристрою для пуску циліндра 3, основи 4 з регульовальним гвинтом 5, штанги 6, хрестоподібної муфти 7 і кронштейна 8.

Циліндр може вільно рухатись вздовж вертикально встановленої трубки. На його поверхні знаходяться три кільцеві риски з розмірами 3, 12, і 27 см від нижнього торця циліндра. В нижній частині циліндра закріплений гумовий корок. Циліндр утримується на трубці у верхньому положенні за допомогою пристрою для пуску циліндра.

При натискуванні кнопки пускового пристрою, циліндр звільняється і падає вниз вздовж трубки під дією сили тяжіння (тертям нехтуємо). На трубці біля підставки закріплена конусна втулка, на яку опускається циліндр. В кінці падіння циліндра при дотику конусної втулки з гумовим корком циліндра, за рахунок її деформації, відбувається пом'якшення удару.

Для жорсткості конструкції трубка і штанга з'єднані кронштейном.

Запис міток часу у вигляді синусоїди на поверхні циліндра, змазаної вазеліном, здійснюється вібратором. Вібратор складається із катушки з сердечником, яка закріплена на металевій скобі, сталевій пружинній пластинці з якорем і „пером” із жилки. „Перо” кріпиться на сталевій пружинній пластинці смужкою із тонкої шерсті. Довжина вільного кінця „пера” 5–7 мм. Вібратор встановлюється у вихідне положення і кріпиться на штанзі через хрестоподібну муфту.

Порядок виконання роботи

1. Піднімають циліндр вздовж трубчастого стояка до упору.
2. З допомогою хрестоподібної муфти встановлюють і закріплюють вібратор на штанзі так, щоб „перо” було підведено безпосередньо до поверхні циліндра і заходило під циліндричну частину на 1,5–2 мм.
3. Прилад, з допомогою регульовального гвинта, встановлюють строго вертикально. Для контролю використовують висок, який закріплюють на кронштейні.
4. На поверхні циліндра ватним тампоном наносять тонкий шар вазеліну.
5. Вібратор під'єднують до джерела змінного струму частотою 50 Гц, напругою (36 ± 2) В.
6. Після натискування кнопки пускового пристрою, на поверхні падаючого циліндра від „пера” залишається слід у вигляді синусоїди. Дослід повторюють 3–4 рази, повертаючи циліндр так, щоб із декількох записів коливань вибрати кращий.
7. Отримавши синусоїди, необхідно вимкнути напругу живлення. Забороняється подавати на вібратор напругу довше, ніж це потрібно для запису часових міток.
8. За отриманими синусоїдами підраховують кількість записаних періодів. Риски, які нанесені на циліндрі з розмірами 3, 12, 27 см від нижнього кінця ділять довжину циліндра на три інтервали (3 см, 9 см, 15 см) у відношенні 1:3:5. Так як запис руху вільно падаючого циліндра починається з моменту, коли його швидкість рівна нулю, то проміжки часу падіння циліндра у відмічених інтервалах однакові. Тому число періодів, які записані на кожному інтервалі повинне бути також однакове. Підрахунок числа періодів на першому інтервалі утруднений. Тому для визначення часу падіння циліндра з висоти 27 см чинять так:

підраховують число хвиль на другому та третьому інтервалах, ділять його на 2, множать на 3 і на період T коливання якоря вібратора. Тобто

$$t = \frac{3}{2}n \cdot T, \quad \text{де } n - \text{число періодів на двох інтервалах.}$$

Вібратор працює від змінного струму частотою 50 Гц. Якір вібратора реагує на кожен імпульс струму, тому його період коливань $T=0,01$ с. Знаючи висоту h та час t падіння циліндра, визначають прискорення вільного падіння за формулою

$$g = \frac{2h}{t^2}, \quad \text{де } h - \text{const.}$$

9. Результати дослідів записують в таблицю і знаходять середнє значення

$$g_{\text{сер}} = \frac{g_1 + g_2 + \dots + g_n}{n_0} \quad \text{м/с}^2,$$

де n_0 – кількість дослідів.

Найбільша похибка дослідів пов'язана із визначенням числа хвиль. Якщо остання хвиля не поміщається повністю на третьому інтервалі, то відлік проводять з точністю до десятих частин.

Контрольні запитання та завдання

1. Що називаємо математичним маятником?
2. Що таке період коливань маятника?
3. Що таке частота коливання?
4. Чи залежить період коливань математичного маятника від амплітуди?
5. Як можна встановити напрям прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника?
6. Як залежить прискорення сили земного тяжіння від широти місцевості?
7. Чому рівний період коливань математичного маятника в космічному кораблі, який рухається з прискоренням до Землі?

Лабораторна робота № 3
Вивчення законів кінематики і динаміки
поступального руху на машині Атвуда

Мета роботи: вивчити закони кінематики та динаміки Ньютона, перевіривши закони шляху та швидкості.

Прилади й матеріали: машина Атвуда, секундомір, джерело живлення (BC4–12), комутаційний ключ.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Перевірити закон шляху.
3. Перевірити закон швидкості.
4. Перевірити другий закон Ньютона.

Теоретичні відомості та опис приладів

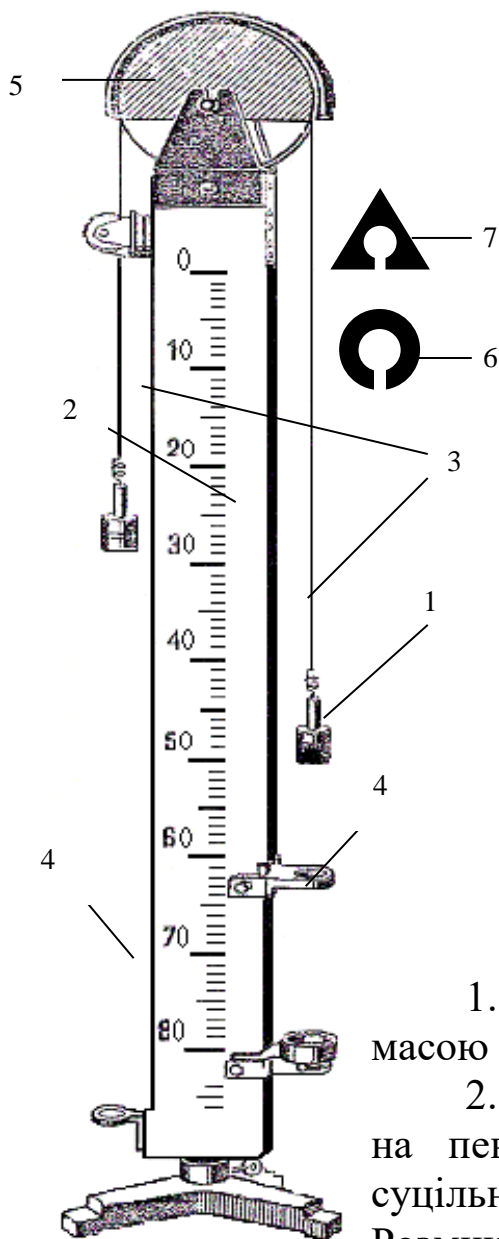
Машина Атвуда (рис. 1, інструкція додається) дає змогу одержати рівномірний та рівноприскорений рухи тягарців, а також виміряти проміжки часу, протягом яких тягарці проходять задані відстані в рівномірному та рівноприскореному рухах.

Машина Атвуда (рис.1) складається з вертикального стояка 2, на верхньому кінці якого закріплено легкий блок, що обертається з малим тертям навколо горизонтальної осі. Через блок перекинута тоненька нитка з прикріпленими до її кінців вантажами 3 однакової маси M (маса їх відома; її повідомляє лаборант). Вантажі можуть спиратися на підставки 4. На стояку нанесено сантиметрові поділки. Для фіксації обох вантажів у певному положенні і для звільнення їх на стояку закріплено електромагніт 5. Підставки 4 суцільні, а підставка 1 має отвір, крізь який вільно проходить вантаж. Крім вантажів 3 в комплекті установки є додаткові тягарці 6 і 7, якими користуються для приведення системи в рівноприскорений рух.

Розглянемо рух системи, що складається з пробних тіл (вантажів), маса кожного з них m і блока радіуса r з моментом інерції I . Нехай на правий вантаж покладемо тягарець масою m , тоді система тіл масою $2M + m$ пройде відстань s . За законом збереження енергії

$$(mg - F)s = \frac{(2M + m)}{2}v^2 + \frac{I\omega^2}{2}. \quad (1)$$

Коли нитка не ковзає по блоку, швидкість v руху нитки – швидкість руху системи тіл $2M + m$ – дорівнює лінійній швидкості точок обода блока ωr , тобто



$$v = \omega r \quad (2), \quad a = v^2 = 2as \quad (3).$$

Нехтуючи силою тертя F і моментом інерції блока при умові, що $I/r^2 \ll 2M$, з (1), (2), (3) для величини прискорення системи матимемо:

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

З (4) видно, що система рухається з прискоренням, меншим ніж прискорення вільного падіння. Збільшуючи масу додаткового тягарця, можна збільшити і прискорення системи. Відстані S , які проходить система тіл, вимірюють від суцільної підставки (приймний столик) до висоти підняття правого вантажу.

Завдання 1. Перевірка закону шляху

$$s = \frac{at^2}{2}$$

Порядок виконання роботи

1. На правий вантаж покласти тягарець 7 з масою m .
2. Нижню основу правого вантажу встановити на певній відстані S (задану викладачем) від суцільної підставки 5, замкнути коло електромагніту. Розмикаючи коло, одночасно запусниться секундомір. Секундомір зупиниться в момент удару правого вантажу об підставку 4 і його покази відповідають часу t_1 руху вантажу.

3. При однаковій масі тягарця перевантаження при заданій відстані s , виміряти (t_1), які в усіх випадках взяти як середнє з трьох вимірювань, при фіксованих у кожному випадку s . Дослід повторити не менше трьох разів при різних s . Прискорення системи буде сталим. Повинно бути співвідношення (наближено)

$$a = \frac{2s_1}{t_1^2} = \frac{2s_2}{t_2^2} = \dots = \frac{2s_n}{t_n^2}.$$

Завдання 2. Перевірка закону швидкості $v = at$

Порядок виконання роботи

1. Встановити кільцеву підставку 1 на (заданій викладачем) відстані s' над суцільною підставкою 4.

2. На правий вантаж покласти тягарець 7. Встановлювати його на відстанях заданих s першого досліду і замкнути коло електромагніту. За допомогою підставки 6 замкнути коло секундоміра.

3. Розімкнути коло електромагніту. Секундомір запуститься і покаже час t' рівномірного руху від моменту зняття тягарця до моменту удару вантажу об суцільну підставку. Знаючи відстань s' між підставками і час t' проходження вантажем цієї відстані, визначити швидкість рівномірного руху між підставками ($v_1 = \frac{s}{t'}$). Ця швидкість дорівнює миттєвій швидкості рівноприскореного руху в момент часу t_1, \dots, t_n відповідно (для заданих s першого досліду).

4. Із зміною відстані між правим вантажем і кільцевою підставкою змінюватиметься і швидкість рівномірного руху. При однаковій масі тягарця прискорення системи буде сталим, тому матимемо співвідношення (наближено): $a = \frac{v_1}{t_1} = \frac{v_2}{t_2} = \dots = \frac{v_n}{t_n}$, яке треба перевірити.

Завдання 3. Перевірка II закону Ньютона $F = ma$

Порядок виконання роботи

1. Поклавши на правий вантаж тягарці 6, 7 виконати пункт 2 з I досліду.

2. Переклавши тягарець 6 з правого вантажу на лівий, змінюємо результуючу зовнішню силу, прикладену до системи і разом з цим прискорення руху системи. Маса системи при цьому залишається сталою. Виконати пункт 2 з I досліду. Для двох різних випадків маємо:

$$F_1 = Ma_1; \quad F_2 = Ma_2 \quad (5)$$

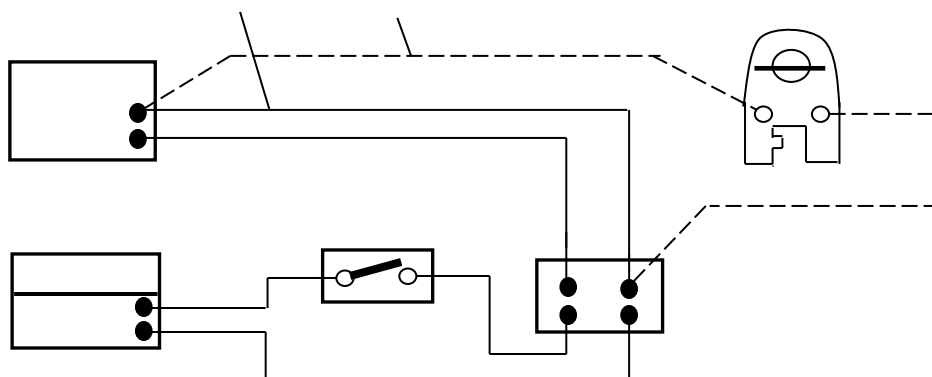
$$\text{і} \quad s_1 = \frac{1}{2} \cdot a_1 t_1^2, \quad s_2 = \frac{1}{2} \cdot a_2 t_2^2 \quad (6)$$

Поділивши перші рівняння (5) і (6) на другі матимемо

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2} \quad \text{і} \quad \frac{s_1}{s_2} = \frac{a_1 t_1^2}{a_2 t_2^2}$$

$$\text{Звідки} \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{s_1 t_2^2}{s_2 t_1^2} \quad (7)$$

Це співвідношення і треба перевірити.



Блок-схема з'єднання приладу.

Контрольні запитання та завдання

1. Який рух називають рівномірним, рівноприскореним?
2. Що таке миттєва швидкість?
3. Який закон зміни координати та швидкості для рівномірного руху?
4. Дайте означення миттєвого прискорення.
5. Який закон зміни координати та швидкості для рівноприскореного руху?
6. Сформулюйте I та II закони Ньютона.
7. Від чого залежить прискорення руху системи вантажів?
8. Де використовується, враховується I закон Ньютона при проведенні досліду?

Увага: *Вмикати живлення дозволяється лише з дозволу викладача.*

Лабораторна робота № 4

Визначення швидкості кулі за допомогою балістичного маятника

Мета роботи: навчитись на практиці визначати швидкість кулі за допомогою балістичного маятника.

Прилади й матеріали: пружинна гармата, балістичний маятник, терези з важками, штангенциркуль.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Визначити швидкість польоту кулі.

Теоретичні відомості й опис приладів

Балістичний маятник – це циліндр, заповнений пластиліном і підвішений на чотирьох довгих нитках (біфілярний підвіс). Відхилення циліндра від положення рівноваги відлічується по шкалі, розміщеній внизу. Стиснувши пружину пружинного пістолета, заряджаємо кулю, стріляємо так, щоб куля влучила в пластилін і застрягла в ньому. Розглянемо теорію методу, який дозволяє визначити швидкість кулі.

Нехай на довгій нитці підвішене тіло масою M , яке знаходиться в стані спокою. Нехай куля масою m влучає в це тіло і застряє в ньому (удар вважаємо абсолютно непружним). Розглянемо стан системи зразу ж після удару, коли ще кут відхилення $\alpha = 0$.

Оскільки в цей момент часу на систему діють вертикально спрямовано сили \vec{F}_n , $M\vec{g}$, $m\vec{g}$, то така система буде замкнутою в горизонтальному напрямку. Іншими словами проекція імпульсу системи на вісь x буде постійною

$$P_x = \text{const},$$

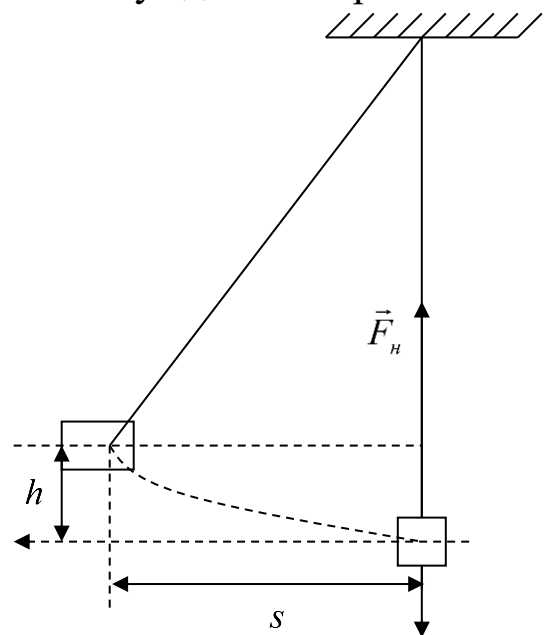
або

$$P_{x_1} = P_{x_2}, \quad mv = (m+M)v_0 \quad (1)$$

де v – швидкість кулі до удару

v_0 – швидкість тіла і кулі відразу ж після удару.

Під час руху циліндра вгору на тіла системи діють тільки сили тяжіння пружності, тобто потенціальні сили. Застосуємо закон збереження механічної енергії.



$$\frac{1}{2}(M+m)v_0^2 = (m+M)gh \quad (2)$$

де h – висота підйому тіла разом з кулею
із (1) і (2) отримаємо

$$v = \frac{m+M}{m}v_0 = \frac{m+M}{m}\sqrt{2gh} \quad (3)$$

із рисунка видно, що

$$h = l - l \cos \alpha = l(1 - \cos \alpha) = 2l \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

для малих кутів відхилення нитки підвісу

$$\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}, s = l\alpha, h = \frac{1}{2} \frac{s^2}{l}$$

Отримаємо
$$v = \frac{m+M}{m} s \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (4)$$

Формула (4) є робочою формулою

Порядок виконання роботи

Відлічуємо по шкалі положення нерухомого циліндра.

Стискуємо пружину пістолета і заряджаємо кулю.

Натискуємо спусковий пристрій пістолета і відлічуємо положення стрілки для максимального відхилення циліндра.

Знаходимо відхилення циліндра $S = n - n_0$

Дослід виконуємо не менше 5 разів для даної кулі. При повторних дослідах обов'язково стріляти по нерухомому циліндру.

По формулі (4) визначити швидкість кулі, а також відносну і абсолютну похибки.

Збільшити масу циліндра і для тої ж кулі виконати пункти 1–6.

Повторити пункти 1–7 для інших куль.

Дані і результати занести в таблицю.

Маси куль, циліндра, довжина підвісу задані в інструкції до лабораторної роботи.

№	n_0	n	S	ΔS
п/п				

Дані установки

Довжина підвісу $l = (173 \pm 0,5)$ см

Маса циліндра $M = (0,919 \pm 0,001)$ кг

Маси куль: 25,800 г; 19,700 г; 15,750 г; 10,350 г.

Контрольні запитання та завдання

1. Що називають ударом тіл?
2. Що відбувається у першому періоді удару?
3. Від чого залежать процеси, що відбуваються при ударі?
4. Який удар називають абсолютно пружним?
5. Який удар спостерігаємо при виконанні лабораторної роботи?
6. Що називають лінією удару?
7. Який удар називають центральним?
8. Сформулюйте і запишіть закони збереження імпульсу та механічної енергії.
9. При яких взаємодіях можна використовувати в механіці закони збереження енергії та імпульсу?
10. Чому в роботі рекомендується стріляти тільки по нерухомому циліндру?

Лабораторна робота № 5
Вимірювання потенціальної та кінетичної енергії
падаючого тіла

Мета роботи: навчитись на практиці вимірювати потенціальну та кінетичну енергії.

Прилади й матеріали: прилад Грімзеля, масштабна лінійка, стальна кулька, довгі смужки білого паперу, калька.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Визначити величину кінетичної і потенціальної енергії.
3. Порівняти одержані значення кінетичної і потенціальної енергії.

Теоретичні відомості та опис приладів

Вимірювання кінетичної та потенціальної енергії тіла, що падає здійснюється в даній роботі за допомогою приладу Грімзеля. Будова цього приладу така.

На горизонтальній дошці закріплена вертикальна рамка N , в якій є дві горизонтальні перекладки n і n' . На цій же дошці кріпиться ще одна рамка, по верхній дугоподібній частині якої може переміщатися електромагніт E_M . До рами N з допомогою стержня підвішена стальна кулька. Якщо стержень із кулькою відхилити в положення A і ввімкнути струм, то електромагніт E_M втримуватиме кульку в цьому положенні. При розмиканні струму кулька почне рухатися по траєкторії ABC . Рухаючи електромагніт по дузі, можна змінювати висоту падіння кульки. Якщо прийняти, що в точці C потенціальна енергія кульки дорівнює нулю, то в точках A і B потенціальна енергія відповідно дорівнює $E_{nA} = mgh_1$; $E_{nB} = mgh_2$

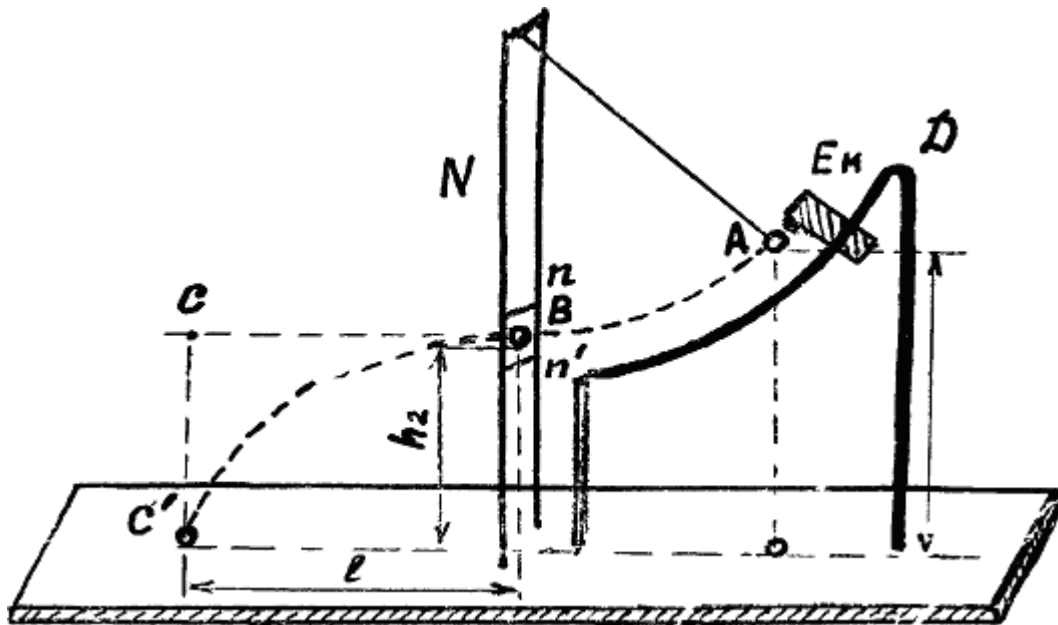
На ділянці траєкторії AB відбулася зміна потенціальної енергії

$$\Delta E_n = E_{nA} - E_{nB} = mg(h_1 - h_2) \quad (1)$$

Одночасно кулька набула кінетичної енергії

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

де v – швидкість кульки в точці B .



Швидкість кульки в точці *B* визначається експериментально. Для цього на дошку кладеться листок паперу із калькою. Таким чином визначається дальність польоту кульки $l = BC$. Оскільки рух в горизонтальному напрямі відбувається із постійною швидкістю, то

$$v = \frac{l}{t}.$$

Час руху визначимо використавши закон вільного падіння

$$t = \sqrt{\frac{2h_2}{g}}.$$

Тоді
$$v = l \sqrt{\frac{g}{2h_2}} \quad (3)$$

Із (2) і (3)

$$E_k = \frac{mgl^2}{4h_2} \quad (4)$$

За законом збереження механічної енергії кінетична енергія кульки в точці *B* повинна дорівнювати зміні потенціальної енергії при русі від точки *A* до точки *B*.

$$E_k = \Delta E_n$$

Отже метою даної роботи є визначення кінетичної та зміни потенціальної енергії на досліді і їх порівняння, тобто експериментальна перевірка закону збереження механічної енергії.

Порядок виконання роботи

1. Кладуть чистий листок паперу з калькою на дошку.
2. Відхиляють кульку в точку A і вмикають електромагніт ключем, вимірюючи при цьому висоти h_1 і h_2 .
3. Розмикають ключ і вимірюють відстань l по сліду від кульки на папері.
4. Обчислюють кінетичну і зміну потенціальної енергії кульки за формулами (1) і (4).
5. Дослід виконують не менше 5 разів.
6. Порівнюють значення E_k і ΔE_n і роблять висновки.
7. Дані заносять в таблицю.

№№ п/п	h_1	h_2	l	E_k	ΔE_n	$\Delta E = E_k - E_n$
1						
2						
3						
4						
5						
Сер з-ня						

$$m_{\text{кульки}} = 65\text{г } 220\text{ мг}$$

$$m_{\text{стержня}} = 3\text{г } 800\text{ мг}$$

Контрольні запитання та завдання

1. Дайте визначення енергії.
2. Що називають кінетичною енергією тіла?
3. Чим відрізняються консервативні сили від неконсервативних?
4. Що називають потенціальною енергією.
5. Напишіть вираз для потенціальної енергії тіла піднятого над поверхнею Землі і потенціальної енергії стиснутої пружини.
6. Напишіть вираз для зміни потенціальної енергії тіла піднятого над поверхнею Землі.
7. Сформулюйте закон збереження повної механічної енергії. Назвіть умови виконання цього закону.

Лабораторна робота № 6

Вивчення обертового руху за допомогою маятника Обербека

Мета роботи: вивчити обертовий рух, його параметри за допомогою маятника Обербека.

Прилади й матеріали: маятник Обербека з вертикальною шкалою, секундомір, штангенциркуль, лінійка з міліметровими поділками, важки, ключ.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Перевірка прямо пропорційної залежності кутового прискорення від моменту сили, що діє на обертальну систему.
3. Визначення моменту інерції регулюючого циліндрика і порівняння його з розрахованим за формулою де циліндрик приймається за матеріальну точку

Увага! Зверніть особливу увагу на надійність кріплення маятника Обербека на стояках та на закріпленнях циліндрів на шпигцях маятника.

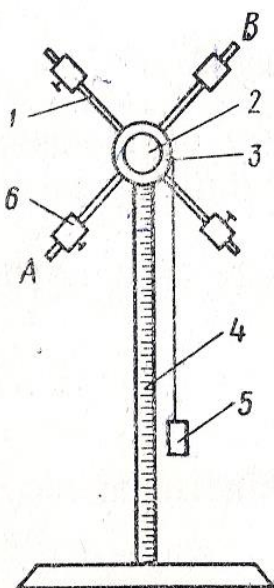
Категорично забороняється знаходитись в площині маятника, який обертається.

Теоретичні відомості та опис приладів

$$m_{\text{стержня}} = (216 \pm 1) \text{ г}; m_{\text{маягарця}} = (339 \pm 1) \text{ г}; d_{\text{шківка}} = (30 \pm 1) \text{ мм}; d_{\text{шківка}} = (45 \pm 1) \text{ мм};$$

$$d_{\text{втулки}} = (89 \pm 1) \text{ мм}.$$

Рівняння руху обертового тіла $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$ для випадку обертання



твердого тіла навколо нерухомої осі Ox , що проходить через точку O , має вигляд

$$M_x = I_x \varepsilon, \quad (1)$$

де L і M - моменти імпульсу тіла і зовнішніх сил відносно довільної точки O ; M_x - проекція моменту зовнішніх сил на вісь Ox ; I_x - момент інерції тіла відносно осі Ox ; ε - кутове прискорення.

Обертальний момент $M_x = F \cdot r$. Якщо до твердого тіла, момент інерції якого залишається сталою величиною, прикладено різні обертальні моменти, то

$$\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = const. \quad (2)$$

Рівність (2) дає змогу перевірити основний закон динаміки обертального руху твердого тіла, залежність кутового прискорення від зміни обертального моменту та моменту інерції можна вивчити за допомогою хрестоподібного маятника Обербека (рис.1).

Маятник Обербека складається з чотирьох однорідних стержнів 1, вгвинчених у втулку 2. Втулка з шківом 3 обертається навколо нерухомої горизонтальної осі. Стержні, які мають поділки, розміщені взаємно перпендикулярно, утворюючи хрестовину. Вісь закріплюється звичайно в стіну так, щоб хрестовина оберталась в площині, паралельній площині стіни. До осі по центру шківа прикріплено вертикальну шкалу 4 завдовжки близько 2 м міліметровими поділками. На шків намотують нитку певної довжини. Один кінець нитки прикріплюють до шківа, а до другого кріплять важки 5. На стержнях хрестовини закріплюють тягарці 6 однакової маси. Під дією ваги важків нитка розмотується, вантаж опускається з прискоренням і приводить в обертальний рух маятника. Натяг нитки визначають із рівняння

$$F = m_1 g - m_1 a,$$

де m_1 - маса важків. Сила, під дією якої маятник приводиться в обертання, дорівнює натягу нитки F , а момент її

$$M = m_1 r (g - a),$$

де r - радіус шківа. Прискорення a можна визначити, якщо відомий час t , протягом якого вантаж опустився на відстань h :

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Обертальний момент, що діє на нашу систему, визначається рівністю

$$M = m_1 r \left(g - \frac{2h}{t^2} \right).$$

Кутове прискорення маятника обчислюють з формули

$$\varepsilon = \frac{2h}{rt^2}.$$

Момент інерції хрестовини маятника визначають з формули

$$I_0 = 2 \cdot \frac{1}{12} m_0 l^2,$$

де m_0 – маса стержня; l – довжина частини АВ хрестовини. Момент інерції маятника дорівнює сумі моментів інерції хрестовини і тягарців, маса яких m_2 :

$$I = I_0 + 4m_2R^2,$$

якщо розміри тягарців $l_0 \ll R$, де R – відстань від осі обертання до центра маси тягарців.

Завдання 1. Перевірка прямо пропорційної залежності кутового прискорення від моменту сили, що діє на обертальну систему

Порядок виконання роботи

1. Знімають металеві циліндрики із стержнів маятника.
2. Кронциркулем і лінійкою з міліметровими поділками визначають радіуси r_1 і r_2 обох шківів.
3. Беруть тягарець, на технічних терезах визначають його масу m_0 .
4. Намотують нитку на один із шківів маятника і до її вільного кінця підвішують цей тягарець. Відпускають його і в той же момент включають секундомір. Коли тягарець доторкнеться підлоги, секундомір виключають. Таким чином визначається час t падіння тягарця. Висоту його падіння знаходять по вертикальній шкалі, прикріпленій до стіни.
5. Дослід повторюють декілька разів без будь-яких змін і, користуючись формулами:

$$\varepsilon_0 = \frac{2h}{rt^2}; \quad M_0 = mr \left(g - \frac{2h}{t^2} \right); \quad I_0 = \frac{M_0}{\varepsilon_0}$$

визначають середні значення величин M_0 і ε_0 для даного тягарця. Індокси “Нуль” відносяться до тих випадків, коли обертальна система позбавлена регулюючих циліндриків.

1. Таким же чином знаходять M_{0x} і ε_{0x} в наступних дослідах в яких використовують другий шків і решту тягарців.
2. Для кожного тягарця розраховують відношення:

$$\frac{M_{01}}{\varepsilon_{01}}; \quad \frac{M_{02}}{\varepsilon_{02}}; \dots \quad \frac{M_{0n}}{\varepsilon_{0n}};$$

і порівнюють їх між собою. Рівність цих відношень між собою і буде свідчити про прямо пропорційну залежність між M_0 і ε_0 , тобто про вірність формули $\frac{M_{01}}{\varepsilon_{01}} = \frac{M_{02}}{\varepsilon_{02}}$. Тому, що коефіцієнт пропорційності

залишається постійним, можна зробити висновок, що він залежить лише від обертальної системи і характеризує її. Таким чином підтверджується пропорційність між моментом сили і кутовим прискоренням, тобто рівність $M_{0n} = I_0 \varepsilon_{0n}$.

Завдання 2. Визначення моменту інерції регулюючого циліндрика і порівняння його з розрахунком за формулою де циліндрик приймається за матеріальну точку

Порядок виконання роботи

1. Насаджують на спиці маятника регулюючі циліндрики так, щоб вони були на однаковій віддалі від осі обертання. Правильність насадки перевіряють таким чином. Повертають маятник, щоб два його стержні розмістилися в горизонтальній площині. Якщо при цьому не виникає обертання маятника, можна вважати, що циліндрики розміщені вірно. Аналогічно перевіряють вірність установки і двох інших циліндриків.

2. Користуючись лише одним тягарцем P і одним із шківів визначають середнє значення моменту інерції системи I .

3. Використовуючи виміри попереднього завдання, розраховують момент інерції I_0 маятника без циліндриків за формулою:

$$I_0 = \frac{m_0 r^2 (gt^2 - 2h)}{2h} = m_0 r^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right).$$

4. Визначають момент інерції циліндрика за формулою

$$I_y = \frac{I - I_0}{4}.$$

5. Лінійкою з міліметровими поділками вимірюють віддаль між серединами двох діаметрально протилежних циліндриків і обчислюють $R = \frac{L}{2}$.

6. Приймавши циліндрик за матеріальну точку, визначають його момент інерції за формулою

$$I_y = mR^2.$$

Значення маси m вказано на регулюючих циліндриках.

Порівнюють I_y та I'_y і роблять висновок про те, чи можливо в дослідах з маятником Обербека вважати циліндрики за матеріальні точки.

Контрольні питання та завдання

1. Сформулюйте основне рівняння динаміки для обертального руху.
2. Дайте означення моменту сили, моменту інерції, кутової швидкості, кутового прискорення, моменту імпульсу тіла.
3. Як з допомогою маятника Обербека можна визначити момент інерції циліндра?
4. В яких одиницях вимірюють кутову швидкість і кутове прискорення?
5. Як встановити напрям кутової швидкості та кутового прискорення?

Лабораторна робота №7

Вивчення руху тіл по похилій площині

Мета роботи: вивчити рух тіл по похилій площині.

Прилади й матеріали: похила площина, набір тіл правильної форми, копіювальний папір, папір, лінійка, штангенциркуль.

Завдання:

- 1 Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
- 2 Визначити значення швидкості тіла теоретично.
- 3 Визначити значення швидкості тіла експериментально.
- 4 Порівняти значення швидкостей для кожного тіла, пояснити причини не співпадання теоретичного та експериментального значень.

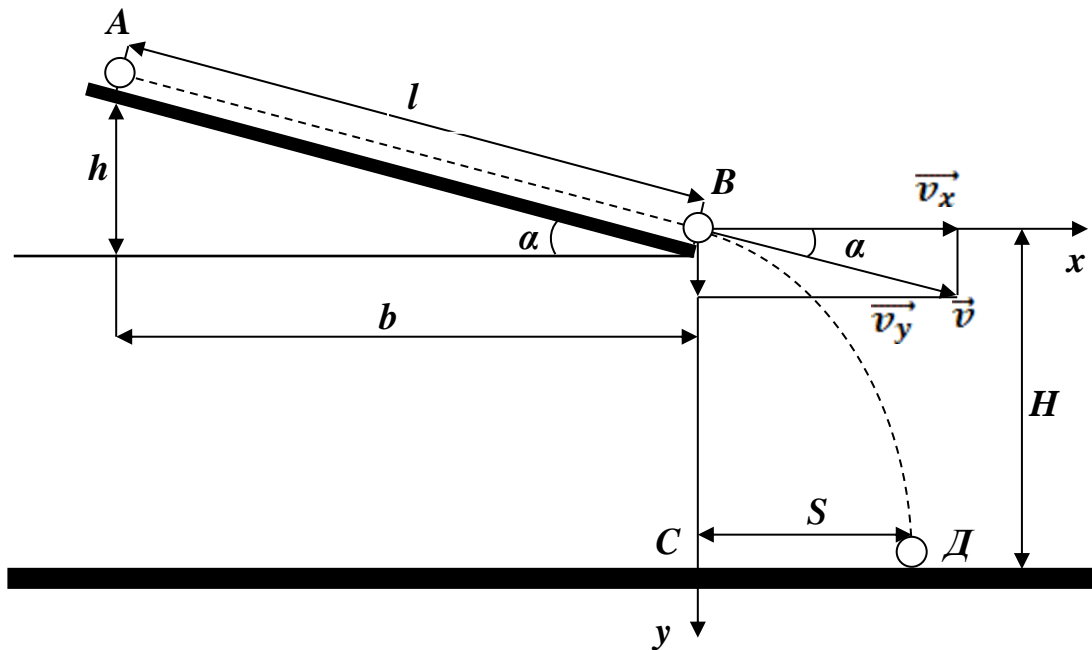
Теоретичні відомості та опис приладів

Тіло правильної геометричної форми (куля, суцільний циліндр, тонкостінний циліндр) із точки A скочується вниз по похилій площині і в точці B матиме швидкість v . Метою роботи є визначення цієї швидкості теоретичним та експериментальним методами.

Завдання 1. Визначення швидкості тіла теоретичним методом

В точці A тіло має потенціальну енергію mgh , яка при русі тіла в точку B перетворилася в кінетичну енергію поступального руху $\frac{mv^2}{2}$ і кінетичну енергію обертального руху $\frac{I\omega^2}{2}$. На основі закону збереження механічної енергії, нехтуючи силами тертя

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$$



Оскільки $\omega = \frac{v}{R}$, де R – радіус тіла, то

$$mgh = \frac{1}{2}v^2 \left(m + \frac{I}{R^2} \right).$$

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

де
$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I}{mR^2}}} \quad (3)$$

Отже, вимірюючи на досліді висоту h похилої площини, можна обчислити теоретичне значення швидкості в точці B за формулою (2). Числове значення коефіцієнта $k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I}{mR^2}}}$ залежить від моменту інерції тіла, яке скочується із похилої площини.

Моменти інерції для різних тіл дорівнюють:

кулі:
$$I = \frac{2}{5}mR^2$$

тонкостінної сфери
$$I = \frac{2}{3}mR^2$$

суцільного циліндра
$$I = \frac{1}{2}mR^2$$

тонкостінного циліндра
$$I = mR^2.$$

Наприклад для тонкостінного циліндра $k = \frac{1}{\sqrt{2}}$, а швидкість $v = \sqrt{gh}$.

Отже, теоретичне значення швидкості не залежить ні від маси, ні від

радіуса запропонованих тіл.

Завдання 2. Експериментальне визначення швидкості тіла

Вимірявши експериментально дальність s і висоту падіння тіла H можна знайти швидкість в точці B іншим методом.

Розкладемо швидкості в точці B на складові:

$$v_x = v \cos \alpha; \quad v_y = v \sin \alpha;$$

Закон руху від точки B до точки C матиме вигляд

$$x = v_x t; \quad y = v_y t + \frac{gt^2}{2}.$$

Або
$$y = x \frac{v_y}{v_x} + \frac{gt^2}{2} = xt \operatorname{tg} \alpha + \frac{gt^2}{2}$$

Звідки
$$t = \sqrt{\frac{2}{g}} \sqrt{y - xt \operatorname{tg} \alpha}$$

Але
$$x = v_x t = v \cos \alpha \cdot t \quad v = \frac{x}{t \cos \alpha}$$

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

Оскільки координати точки D : $x = S$; $y = H$, то

$$v = \frac{S \sqrt{g}}{\sqrt{2(H - St \operatorname{tg} \alpha) \cdot \cos \alpha}} \quad (4)$$

$$t = \sqrt{\frac{2}{g}} \sqrt{H - St \operatorname{tg} \alpha} \quad (5)$$

Отже, вимірявши на досліді величини S , H , α знаходимо експериментальним шляхом значення швидкості тіла в точці B , а також час руху тіла від точки B до точки D .

Порядок виконання роботи

1. Вимірюють довжину l і висоту h похилої площини, а також відстань b по горизонталі.
2. Обчислюють $\cos \alpha$, $\operatorname{tg} \alpha$.
3. Відпускають тіло з точки A похилої площини без поштовху.
4. Вимірюють відстані $s = CD$ і $H = CB$.
5. За формулою (2) обчислюють теоретичне значення швидкості, а за формулою (4) експериментальне. Знаходять за формулою (5) час руху тіла.
6. Для кожного тіла дослід виконують не менше 5 разів.
7. Досліди виконати для трьох різних висот h похилої площини.
8. Досліди виконати для трьох різних тіл (кулі, тонкостінного циліндра, суцільного циліндра).
9. Обчислити відносну і абсолютну похибку.

10. Дані записати в таблицю.

№	$l, \text{м}$	$b, \text{м}$	$h, \text{м}$	$S, \text{м}$	$\cos \alpha$	$\text{tg } \alpha$	$\varepsilon_e,$	$\Delta \varepsilon_e,$	$\varepsilon, \%$	$t, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$\varepsilon, \%$	$\varepsilon_t,$
1													
2													
3													
4													
5													
сєр.													

Контрольні запитання та завдання

1. Записати формулу потенціальної енергії у полі земного тяжіння.

2. Записати формулу кінетичної енергії поступального руху тіла.

3. Записати формулу кінетичної енергії обертального руху тіла.

4. Яка формула для моменту інерції кулі?

5. Яка формула для моменту інерції суцільного циліндра?

6. Записати формулу закону збереження закону збереження енергії для тіла, яке котиться по похилій площині.

7. Від чого залежить теоретичне значення швидкості тіла, яке скочується із похилої площини?

8. Записати кінематичні формули для тіла, яке котиться по похилій площині.

Зверніть особливу увагу на надійність закріплення похилої площини на опорі.

Лабораторна робота №8

Визначення коефіцієнтів тертя ковзання та кочення

Мета роботи: навчитися визначати коефіцієнти тертя ковзання та кочення.

Прилади й матеріали: трибометр з набором брусків, установка для визначення коефіцієнта тертя кочення, масштабна лінійка.

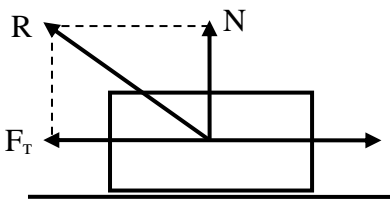
Завдання:

1. При підготовці до роботи опрацювати теоретичний матеріал, розміщений в пунктах [1],[2] літератури.
2. Визначити коефіцієнт тертя дерева об дерево з допомогою похилої площини.
3. Перевірити, що коефіцієнт тертя не залежить від площі тертьових поверхонь.
4. Визначити коефіцієнт тертя кочення для різних пар матеріалів: сталь-сталь, сталь-скло, сталь-дерево.

Примітка: Завдання 3 виконати лише для одного роду тертьових поверхонь.

Теоретичні відомості й опис приладів

Тертя – це механічний опір, що виникає при відносному переміщенні двох стичних тіл у площині дотику. *Тертя* – це складний дисипативний необоротний процес, який супроводжується виділенням тепла, електризацією тіл, їх руйнуванням і т.д. Тертя поділяють на *сухе* та *в'язке*. В свою чергу сухе тертя ділять на *статичне* (тертя спокою) та *кінематичне* (тертя кочення і ковзання).



Сила тертя ковзання визначається наближеним законом Амонтона - Кулона: сила тертя ковзання пропорційна притискуючій силі, залежить від типу тертьових поверхонь і не залежить від площі стичних поверхонь

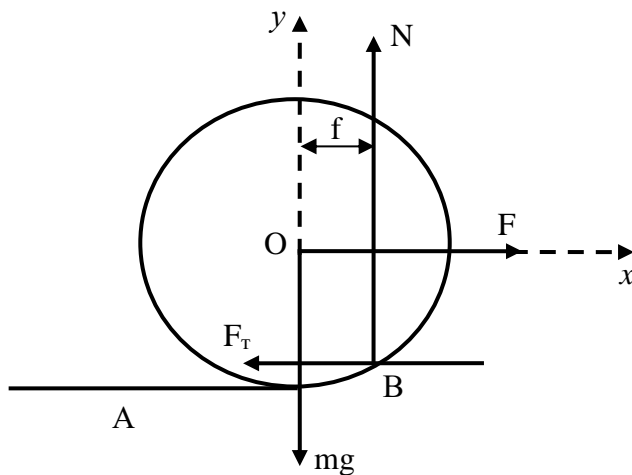
$$F_T = \mu N \quad (1)$$

Сила тертя ковзання приблизно дорівнює максимальній силі тертя спокою. Сила тертя \vec{F}_T і сила нормальної реакції \vec{N} є складовим сили реакції поверхні, що діє на тіло. Отже, сила тертя, це тангенціальна сила реакції поверхні.

При русі циліндра чи кулі по поверхні іншого тіла виникає опір, який називається *тертям коченням*. Сила тертя кочення зв'язана із

залишковими деформаціями поверхні і циліндра в зоні їх контакту. Тобто сила тертя кочення, так як і сила тертя ковзання належить до класу електромагнітних сил.

Розглянемо циліндр радіуса R , що лежить на горизонтальній площині. Для спрощення припустимо, що деформується тільки площина. Прикладемо до циліндра деяку силу \vec{F} спрямовану горизонтально. Оскільки існує сила тертя спокою, то циліндр буде знаходитися в стані під дією сил $m\vec{g}, \vec{F}, \vec{N}, \vec{F}_T$.



Сила нормальної реакції площини не проходить через точку O , тому що під дією сили \vec{F} інтенсивність тиску в зоні контакту AB циліндра з площиною інтенсивність тиску в точці B буде більша ніж в точці A . А в той момент, коли циліндр почне рухатися точка

прикладання сили співпаде з точкою B .

Рівняння рівноваги циліндра (рівняння моментів відносно точки O) в припущенні, що деформації площини незначні матиме вигляд:

$$Nf - F_T R = 0 \quad (2)$$

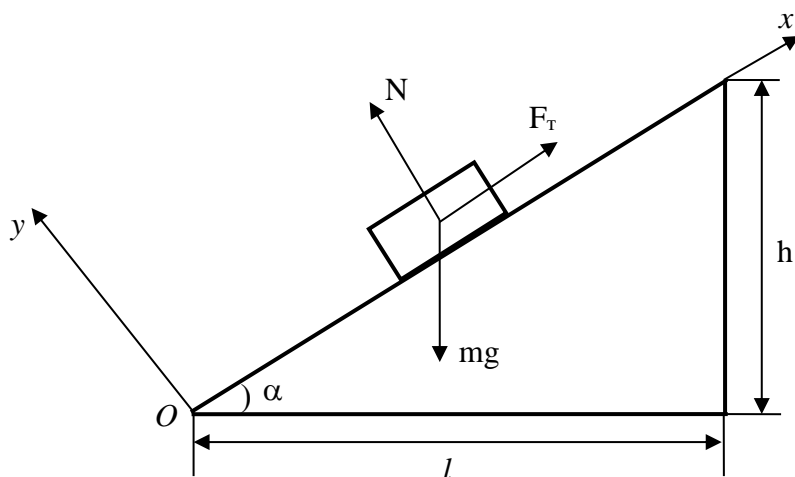
Звідки
$$F_T = \frac{f}{R} N \quad (3)$$

Величина f , яка характеризує зміщення нормальної реакції площини відносно вертикальної осі, що проходить через точку O , називається *коефіцієнтом тертя кочення* і має розмірність довжини.

Завдання 1. Визначення коефіцієнта тертя ковзання

Розглянемо тіло, що знаходиться на похилій площині у стані спокою під дією сил $m\vec{g}, \vec{N}, \vec{F}_T$. Тоді $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_T = 0$. В проекціях на осі O_x і O_y :

$$\left. \begin{aligned} -mg \sin \alpha + F_T &= 0 \\ -mg \cos \alpha + N &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



Збільшуючи кут α до деякого граничного значення $\alpha = \alpha_{cp}$, при якому починається рух тіла для сили тертя маємо:

$$F_T = \mu N$$

Тоді із (4) отримаємо

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha_{cp} \quad (5)$$

Отже, коефіцієнт тертя ковзання дорівнює тангенсу граничного кута нахилу, при якому тіло починає ковзати по похилій площині.

Враховуючи, що $\operatorname{tg} \alpha_{cp} = \frac{h}{l}$, маємо робочу формулу

$$\mu = \frac{h}{l} \quad (6)$$

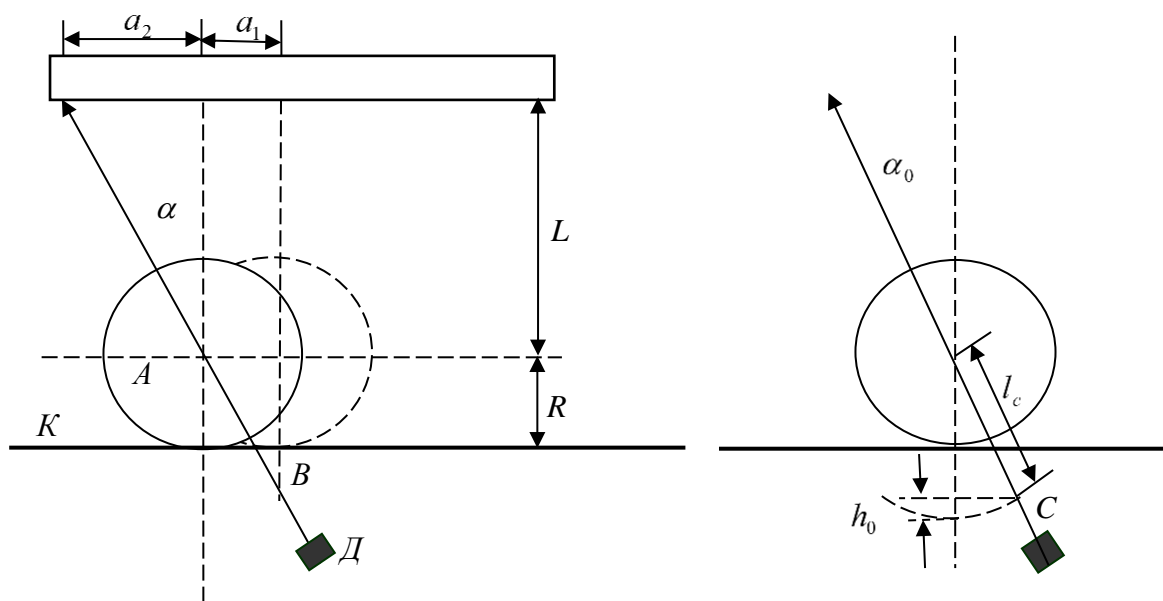
Порядок виконання роботи

1. Встановити основу трибометра горизонтально за допомогою рівня.
2. Покласти на трибометр один із брусків.
3. Збільшувати кут нахилу похилої площини доти, поки брусок не почне рухатися.
4. Зафіксувати положення похилої площини і виміряти висоту h і довжину l її основи.
5. Дослід виконати не менше 5 разів. Обчислити коефіцієнт тертя ковзання за формулою (6).
6. Дані занести в таблицю:
7. Поклавши той же брусок на похилу площину іншою гранню, виконати пункти 1-7.
8. Виконати пункти 1-7 для іншого бруска.
9. Обчислити відносну і абсолютну похибки.

Типи тертьових поверхонь	№ п/п	h (м)	Δh (м)	l (м)	Δl (м)	μ	$\Delta\mu$	$\varepsilon = \frac{\Delta\mu}{\mu}$
	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	сер. зн-ня							

Завдання 2. *Визначення коефіцієнта тертя кочення*

В роботі для визначення коефіцієнта тертя кочення використовується установка, що складається із сталюого циліндра A , до якого прикріплений стержень B . Верхній кінець стержня закінчується стрілкою, а до нижнього прикріплена кулька D . Циліндр знаходиться на горизонтально розміщеній плиті K . Рухому частину установки можна назвати маятником, який здійснює нелінійні затухаючі коливання.



Нехай маятник відхилився із положення, зображеного штриховою лінією в деяке інше. Тоді відхилення стрілки по шкалі буде дорівнювати сумі двох відхилень

$$S = a_1 + a_2,$$

де $a_1 = R\alpha$ – відхилення стрілки, зв'язане із поворотом циліндра на кут α при його коченні по плиті; $a_2 = Ltg\alpha$ – відхилення стрілки, зв'язане із поворотом циліндра відносно його осі на той же кут α . Тоді

$$S = R\alpha + Ltg\alpha$$

Будемо розглядати малі коливання. Тоді $\sin \alpha \approx tg\alpha \approx \alpha$, $S = \alpha(R+L)$.
Для початкового відхилення і відхилення після n повних коливань

$$\alpha_0 = \frac{S_0}{R+L}; \quad \alpha_n = \frac{S_n}{R+L} \quad (7)$$

При початковому відхиленні маятника на кут α_0 його потенціальна енергія дорівнює

$$E_0 = mgh_0, \quad \text{де } h_0 - \text{зміна ординати } C \text{ центра мас}$$

маятника.

Якщо l_c – відстань від центра мас маятника до осі циліндра, то

$$h_0 = l_c - l_c \cos \alpha_0 = l_c (1 - \cos \alpha_0) = 2l_c \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}.$$

Отже

$$E_0 = 2mgl_c \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}.$$

Через один повний період внаслідок затухання коливань кут відхилення дорівнюватиме α_1 . Аналогічно потенціальна енергія

$$E_1 = 2mgl_c \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}.$$

Зміна потенціальної енергії маятника за один повний період

$$\Delta E = E_0 - E_1 = 2mgl_c \left(\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} \right).$$

Для малих коливань $\sin^2 \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha^2}{4}$

$$\Delta E = 0,5mgl_c (\alpha_0^2 - \alpha_1^2) \quad (8)$$

Зменшення потенціальної енергії на величину ΔE , якщо знехтувати силами опору повітря, викликане роботою сил тертя кочення. За один повний період коливань робота сил тертя кочення дорівнює

$$A = M\alpha \quad (9)$$

де $M = fN = fmg$ – момент сили тертя кочення; α – кут повороту циліндра за один повний період; f – коефіцієнт тертя кочення, що має розмірність довжини.

Якщо початкове відхилення α_0 , то за першу чверть періоду кут повороту циліндра дорівнює α_0 , за другу – α' , за третю α' і за четверту α_1 . Якщо $\Delta\alpha$ зменшення кута за чверть періоду, то

$$\alpha' = \alpha_0 - \Delta\alpha, \quad \alpha_1 = \alpha' - \Delta\alpha \quad i$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha' + \alpha' + \alpha_1 = \alpha_0 + (\alpha_0 - \Delta\alpha) + (\alpha_1 + \Delta\alpha) + \alpha_1 = 2(\alpha_0 + \alpha_1).$$

Підставляючи в (9) отримаємо

$$A = 2fmg(\alpha_0 + \alpha_1) \quad (10)$$

Прирівнюючи (8) і (10), маємо

$$0,5mgl_c(\alpha_0^2 - \alpha_1^2) = 2fmg(\alpha_0 + \alpha_1)$$

$$f = \frac{1}{4}l_c(\alpha_0 - \alpha_1).$$

Вимірювання будуть набагато точнішими, якщо взяти не одне повне коливання, а n

$$f = \frac{l_c}{4n}(\alpha_0 - \alpha_n).$$

Використовуючи (7), отримаємо робочу формулу.

$$f = \frac{l_c}{4n} \cdot \frac{S_0 - S_n}{L + R} \quad (11)$$

Порядок виконання роботи

1. Закріпити кульку D на стержні.
2. Зафіксувати по шкалі початкове відхилення маятника S_0 . Кут відхилення стержня повинен бути невеликий, щоб виконувалися співвідношення $\sin \alpha \approx \text{tg} \alpha \approx \alpha$ ($\alpha < 10^\circ$).
3. Виміряти відхилення маятника S_n після n повних коливань.
4. Вимірювання виконати не менше 5 разів.
5. За заданими масами кульки, стержня, циліндра та заданими величинами L і R , знайти положення центра мас і відстань l_c .
6. За формулою (11) обчислити коефіцієнт тертя кочення.
7. Обчислити відносну і абсолютну похибки вимірювань.
8. Остаточний результат записати у вигляді $f = f_{\text{сер}} \pm \Delta f$; $E = \Delta f / f$.
9. Визначити коефіцієнт тертя кочення для пари сталь-сталь, сталь-скло, сталь-дерево, а також при іншій масі кульки D .
10. Дані вимірювань і обчислень записати в таблицю:
11. Порівнявши сили тертя ковзання і кочення для однакових пар поверхонь зробити висновки.

Дані установки:

маса стержня – 30,1 г \pm 0,5 г;

маса кульки (тягарця) – 206,4 г \pm 0,5 г;

маса циліндра – 2 кг 91 г;

довжина стержня – 540 мм \pm 1 мм;

радіус циліндра – 28,20 \pm 0,05 мм;

відстань від осі циліндра до шкали – 275 мм \pm 1 мм.

Типи взаємодіючих поверхонь	№ пп	l_c (м)	S_0 (м)	S_n (м)	n	f (м)	$E = \frac{\Delta f}{f}$	Δf
	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	сер. зн- ня							

Зауваження: пункт з ходу роботи зручно виконувати, задавши наперед різницю $S_0 - S_n$ і підрахувавши число періодів коливань, необхідних для зменшення відхилення по шкалі від S_0 до S_n .

Контрольні запитання та завдання

1. Як класифікуються основні види тертя?
2. Що розуміють під силою тертя?
3. Як напрямлена сила тертя спокою?
4. Як напрямлена сила тертя ковзання?
5. Сформулюйте закон Амонтона – Кулона.
6. Наведіть емпіричну формулу для сили тертя кочення.
7. Який фізичний зміст коефіцієнта тертя кочення.
8. Покажіть, що при рівномірному русі бруска по похилій площині коефіцієнт тертя ковзання дорівнює тангенсу кута нахилу похилої площини.

Лабораторна робота №9

Визначення модуля Юнга за деформацією розтягу та методом деформації прогину

Мета роботи: навчитись на практиці визначати модуль Юнга за деформацією розтягу та прогину.

Прилади і матеріали: Машина МР-0,05, набір дротин, установка для визначення модуля Юнга методом деформації прогину, стержні прямокутного перерізу, прилад індикатор на штативі, мікрометр, штангенциркуль, лінійка або рулетка.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Визначити модуль Юнга для трьох різних брусків.
3. Побудувати залежність відносного видовження алюмінієвої дротини від механічної напруги.
4. Знайти межу міцності для алюмінію.

Увага! Перед виконанням роботи з машиною МР-0,05 необхідно ознайомитись з правилами техніки безпеки згідно інструкції.

Машину МР-0,05 дозволяється вмикати лише з дозволу викладача або лаборанта.

Теоретичні відомості

Завдання. Визначення модуля Юнга методом згину та розтягу стержнів

Сила, прикладена до тіла може деформувати його, зміщувати частинки, з яких складається тіло, одну відносно іншої. При цьому у відповідності з третім законом Ньютона всередині деформованого тіла виникає протидіюча сила, рівна за модулем деформуючій силі, яку і називають *силою пружності*. Сили пружності зумовлені взаємодією між частинками (молекулами і атомами), з яких складаються тіла. З досвіду відомо, що пружна сила, яка виникає при малих деформаціях будь-якого виду, пропорційна значенню абсолютної деформації (зміщенню) Δx :

$$F = -k\Delta x \quad (1)$$

де k – жорсткість.

Вираз (1) і є законом Гука для пружних деформацій. Знак „-” вказує на протилежність напрямів пружної сили і зміщення.

Деформація називається *пружною*, якщо після припинення дії деформуючої сили пружності сили повністю відновлюють початкову

форму і розміри тіла. Закон Гука можна сформулювати і з допомогою відносної деформації $\Delta x/x$,

де x – розміри тіла до його деформації (довжина, об’єм і ін.);

Δx – зміна цих розмірів в результаті деформації (абсолютна деформація).

Замість сили в такому розгляді користуються механічною напругою (у випадку рівномірного розподілу сили на площі S):

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Закон Гука в цьому випадку можна записати у вигляді:

$$\sigma = k_1 \frac{\Delta x}{x} \quad (2)$$

Величина k_1 тепер називається модулем пружності, якщо $x = V$ – об’єм $\Delta x = \Delta V$ то

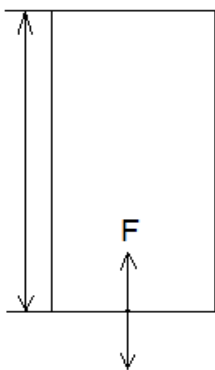
$$\sigma = k_2 \frac{\Delta V}{V}, \quad k_2 \text{ – тепер – модуль об’ємної пружності.}$$

Якщо $x = l$ – довжина тіла $\Delta x = \Delta l$ і

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

де E – модуль розтягу (стиску), тобто модуль першого роду або модуль Юнга.

На рис.1 \vec{F}' – деформуюча сила; \vec{F} – сила пружності, рівна за розміром деформуючій силі. Якщо сила F (і як наслідок F') рівномірно розподілена по перерізу бруса, то:



$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (4)$$

$$\text{Тоді згідно попереднього} \quad \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

$$\text{Якщо} \quad \frac{\Delta l}{l} = 1 \text{ тобто} \quad \Delta l = l \text{ і} \quad E = \frac{F}{S} = \sigma.$$

Таким чином, модуль Юнга чисельно рівний напрузі, при якій відносне видовження тіла рівне одиниці.

Оскільки $\Delta l/l$ – безрозмірнісне число, то розмірність модуля Юнга співпадає з розмірністю відношення F/S , тобто має розмірність тиску (в СІ – $\text{Н}/\text{м}^2$ – Па).

Інші види деформації (кручення, зсув, згин і т.д.) можуть бути зведені до деформації одностороннього розтягу і стиску. Наприклад, згину стержня, який лежить на двох опорах, зводиться до деформації

одностороннього розтягу нижньої частини стержня і одночасного одностороннього стиску верхньої частини стержня.

В даній роботі вимагається визначити модуль Юнга з використанням деформації згину.

Деформація згину характеризується так званою стрілкою прогину (рис.2). Загальну формулу для підрахунку стрілки прогину дає теорія пружності, яка вивчається у технічній механіці і вона рівна:

$$\lambda = \frac{kFL^3}{12qE}, \quad (6)$$

де E – модуль Юнга, q – момент інерції перерізу.

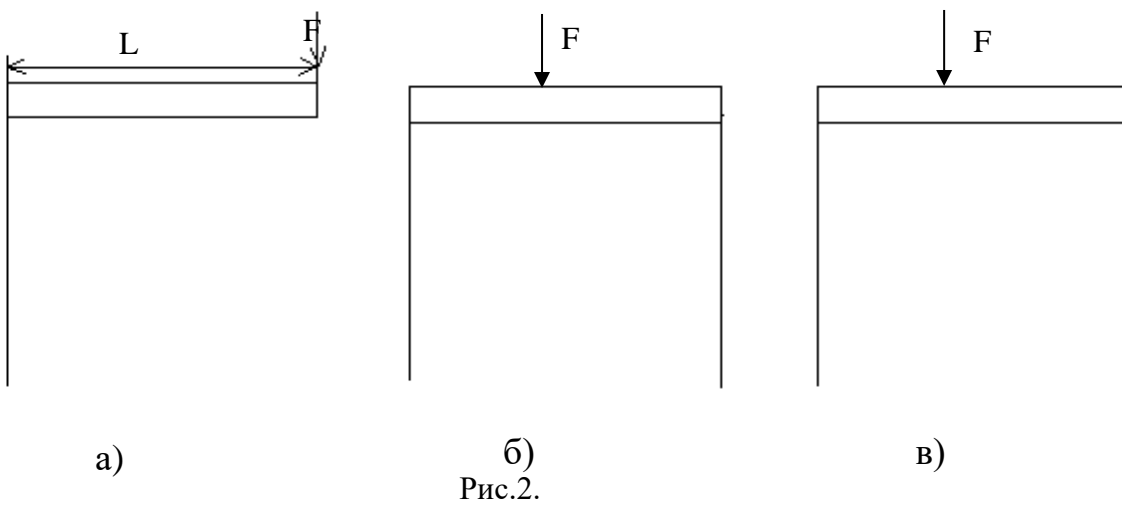


Рис.2.

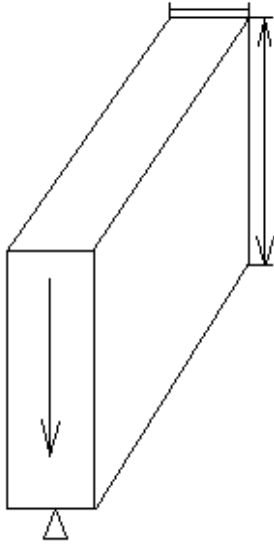
Для прогину, зображеного на рис. 2а: $k = 4$. Для згину на рис. 2б, де кінці стержня на опорах не закріплюються, $k = \frac{1}{4}$, а для прогину рис.2в, де кінці стержня закріплені на опорах, $k = \frac{1}{16}$.

Для циліндричних зразків $q = \pi r^4/4$, де r – радіус поперечного перерізу цього зразка, L – довжина стержня, на рис. 2а, довжина від опори до вільного кінця, на рис. 2б – між опорами.

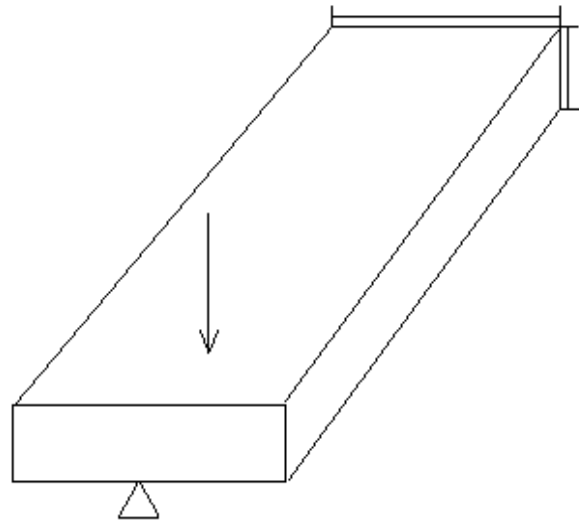
Для зразків у формі бруса:

$$q = \frac{ab^3}{12} \text{ – для деформації типу 3а;}$$

$$q = \frac{ba^3}{12} \text{ – для деформації типу 3б.}$$



a)



б)

Рис.3

В даній роботі використовуються зразки у формі бруска (рис.3а), лежать на опорах не закріплюються. Для них $q = a^3b/12$, а $k = \frac{1}{4}$. Отже, для стрілки прогину (б) одержимо формулу

$$\lambda = \frac{\frac{1}{4}FL^3}{12 \frac{a^3b}{12} E} = \frac{FL^3}{4a^3bE}.$$

Звідки слідує:

$$E = \frac{FL^3}{4a^3b\lambda} \quad (7)$$

Формула (7) є робочою для визначення модуля Юнга методом прогину.

Опис приладів

Прилад (рис.4) для визначення модуля Юнга методом прогину стержнів, складається з платформи, на якій закріплені дві підставки з опорами і на якій кладеться досліджуваний стержень 2. На середину стержня одягається рамка 3, до якої кріпиться чашка для важків 4. Для вимірювання стрілки прогину застосовується індикатор довжини, в якому лінійне переміщення стержня цього приладу перетворюється в кутове переміщення стрілки зубчатою передачею. Вимірювальний індикатор має ціну поділки 0,01 мм.

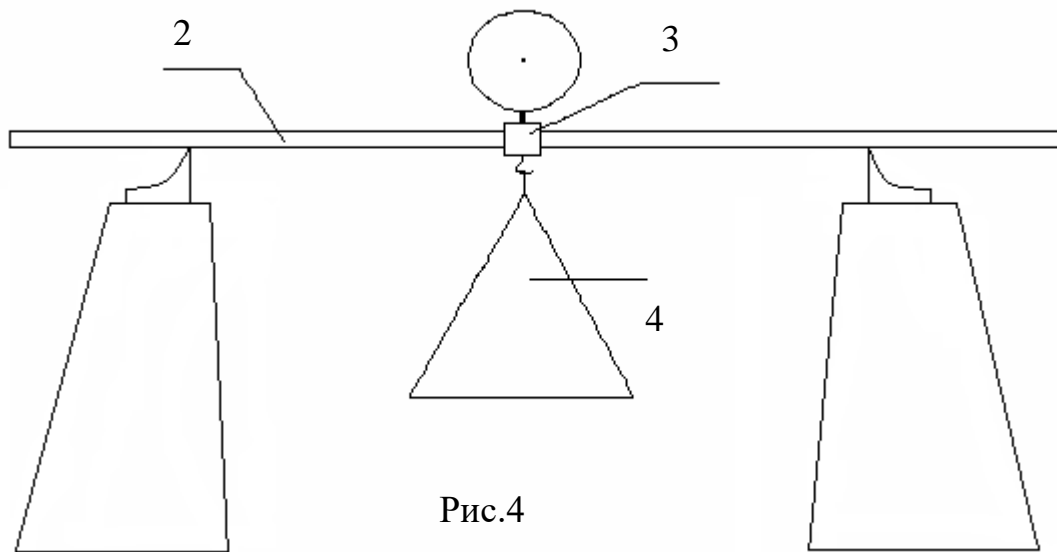


Рис.4

Таким чином, здійснивши прогин стержня з досліджуваного матеріалу і вимірявши всі величини, які входять в праву частину рівності (7), можна визначити модуль пружності цього матеріалу.

Порядок виконання роботи

1. Встановити рамку з чашкою на середину бруска з досліджуваного матеріалу, який спирається обома кінцями на призми підставок.

2. Привести стержень 5 індикатора в контакт з центром площадки рамки так, щоб його стрілка зробила не менше 4 обертів і встановити „0” індикатора на стрілку.

3. Навантажити чашку важком 200 г і зафіксувати нове положення стрілки. Збільшуючи навантаження необхідно відмічати відповідні положення стрілки на шкалі індикатора. Потім зробити такі ж виміри, зменшуючи навантаження до нуля.

4. Різниця між показами індикатора при відсутності вантажу і показами, коли підвішений вантаж, дає значення стрілки прогину, яка відповідає даному вантажу. Дані заносяться в таблицю.

5. Лінійкою виміряти довжину L стержня між ребрами призми. Виміряти в 4-6 місцях ширину „а” і товщину „в” стержня штангенциркулем або мікрометром.

6. Побудувати графік $\lambda = f(F)$.

7. Врахувати за формулою (7) модуль Юнга для кожного значення стрілки прогину і з одержаних значень знайти його середнє значення.

8. Визначити відносну похибку за формулою:

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta a}{a}\right)^2}.$$

9. Дослід провести при довжинах заданих викладачем.

10. Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю.

11. Побудувати залежність $\frac{\Delta l}{l} = f(\sigma)$ за результатами вимірювань,

виконаних на машині МПЦ-0,5.

Контрольні запитання та завдання

1. Дайте означення механічної напруги.
2. Що називають відносним видовженням?
3. Сформулюйте закон Гука для деформації розтягу.
4. Який фізичний зміст модуля Юнга?
5. Що називають стрілкою прогину?
6. Що називають межею пружності?
7. Що називають межею міцності?
8. Що називають запасом міцності?

Лабораторна робота № 10

Визначення моменту інерції махового колеса і сили тертя в опорі

Мета роботи: вивчити поняття моменту інерції, навчитись на практиці визначати момент інерції махового колеса та силу тертя в опорі.

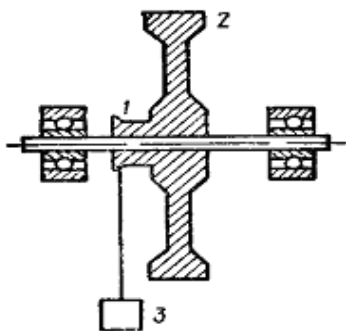
Прилади й матеріали: махове колесо $m = (10,33 \pm 0,01)$ кг, вертикальна шкала, масштабна лінійка, штангенциркуль, секундомір, набір вантажів, $d_{1шківця} = 70,40 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$, $d_{2шківця} = 40,49 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Виміряти висоту h_1 піднімання тягарця при обертанні колеса за інерцією.
3. Обчислити момент інерції махового колеса.
4. Вивести формули для обчислення відносної і абсолютної похибок і визначити їх.

Увага! Забороняється під час експерименту знаходитись в площині обертання махового колеса. Про це слід повідомити студентів, які працюють поруч. Будьте обережні на випадок розриву шнура, на якому кріпляться вантажі.

Теоретичні відомості й опис приладів



Момент інерції махового колеса визначають на установці, яка складається з махового колеса 2 з шківом 1, насадженого на вал AB , лінійки і тягарця 3 (рис.1). Вал закріплений у двох підшипниках. На шків 1 намотується нитка. До її кінця прикріплюють тягарець 3 масою m . Під дією тягарця шків разом з валом і маховим колесом

рівноприскорено обертається. На характер обертального руху впливає значення моменту інерції махового колеса, моменту інерції шківа, моменту інерції вала та сили тертя в підшипниках.

Вал і шків вибирають такими, щоб вони мінімально впливали на характер обертального руху і не вносили істотних змін в його характер. При падінні тягарця P його потенціальна енергія mgh , де h – висота підняття тягарця, перетворюється в кінетичну енергію поступального руху тягарця, в кінетичну енергію обертального руху махового колеса і витрачається на виконання роботи подолання сил тертя. Кінетична енергія поступального руху тягарця визначається за формулою

$$W_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Кінетична енергія обертального руху махового колеса визначається за формулою

$$W_{k\text{об}} = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Робота подолання сил тертя дорівнює An_1 , де A – робота, виконана за один оберт; n_1 – кількість обертів маховика. Отже,

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + An_1. \quad (1)$$

В момент, коли тягарець повністю опустився, нитка спадає з шківа і колесо робить n_2 обертів до повної зупинки. За n_2 обертів виконується робота подолання сил тертя, яка дорівнює An_2 . Ця робота виконується за рахунок кінетичної енергії обертального руху колеса, яку воно мало в момент спадання нитки:

$$An_2 = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (2)$$

Робота подолання сил тертя в підшипниках за один оберт з рівняння (2)

$$A = \frac{I\omega^2}{2n_2}.$$

Підставивши (3) в (1), матимемо:

$$I = \frac{mgh - \frac{m\nu^2}{2}}{\frac{\omega^2}{2} \left(1 + \frac{n_1}{n_2}\right)};$$

визначимо ω і ν через висоту падіння тягарця h і час його руху t :

$$\omega = \frac{2h}{rt}, \quad \nu = \frac{2h}{t}, \text{ де } r - \text{ радіус шківів. Тоді формула моменту інерції}$$

махового колеса матиме такий вигляд:

$$I = \frac{mr^2(gt^2 - 2h)}{2h\left(1 + \frac{n_1}{n_2}\right)} = \frac{md^2\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right)n_2}{4(n_2 + n_1)}. \quad (4)$$

Якщо нитка одним кінцем прикріплена до вала махового колеса, то за законом збереження і перетворення енергії маємо:

$$mgh = \frac{m\nu^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + A, \quad (5)$$

де $A = Fh$ - робота подолання сил тертя; F - сила тертя. Силу тертя визначимо з таких міркувань. Обертаючись за інерцією, махове колесо підніме тягарець на висоту $h_1 < h$, система матиме потенціальну енергію $W'_n = mgh_1$. Різниця потенціальних енергій $W_n - W'_n = mgh - mgh_1$ дорівнюватиме роботі подолання сил тертя: $mgh - mgh_1 = F(h_1 + h)$, звідки

$$F = \frac{mg(h - h_1)}{h + h_1}.$$

Підставивши вирази для ν , ω , F в рівняння (5), матимемо формулу для визначення моменту інерції махового колеса для цього випадку:

$$I = mr^2 \left(gt^2 \frac{h_1}{h(h + h_1)} - 1 \right). \quad (6)$$

Порядок виконання роботи

1. Визначити на технічних терезах масу тягарця. Виміряти діаметр шківа штангенциркулем.

2. Намотати на шків нитку. Прикріпити тягарець до другого кінця нитки.

3. Наклеїти на маховик кольоровий папірець, щоб легше було визначити кількість обертів маховика. Виміряти відстань h від нижньої основи тягарця до площадки, на яку опускається тягарець.

4. Виміряти час, протягом якого тягарець пройшов відстань h . Обчислити кількість обертів n махового колеса від початку руху до повної його зупинки.

5. Визначити кількість обертів колеса під дією тягарця P за формулою $n_1 = \frac{h}{2\pi r}$, де h – шлях, який пройшов тягарець, діючи на шків: r – радіус шківа. Кількість обертів махового колеса від моменту припинення дії тягарця (від моменту удару тягарця об площадку) і до повної зупинки його дорівнює різниці між кількістю обертів від початку руху колеса до повної зупинки і кількістю обертів колеса під дією тягарця, тобто $n_2 = n - n_1$. Добуті експериментально значення величин n, n_2, h, t підставити в формулу (4) і обчислити момент інерції махового колеса. Щоб результат був задовільний, треба повторити вимірювання 7 – 10 разів.

6. Закріпити один кінець нитки завдовжки h на шківі і намотати її на нього. До другого кінця нитки прикріпити тягарець.

7. Виміряти висоту тягарця над основою штатива.

8. Одночасно включити секундомір і відпустити тягарець. Визначити час опускання тягарця t (час від початку руху колеса до моменту дотику тягарця до площадки).

9. Виміряти висоту h_1 піднімання тягарця при обертанні колеса за інерцією. За формулою (6) обчислити момент інерції махового колеса. Порівняти значення I , знайдені з формул (4) і (6). Вивести формули для обчислення відносної і абсолютної похибок і визначити їх.

Контрольні запитання та запитання

1. Сформулюйте закон збереження і перетворення механічної енергії.
2. Дайте означення механічної роботи.
3. Запишіть співвідношення між лінійною і кутовою швидкостями.
4. Сформулювати означення моменту інерції матеріальної точки.

5. Яка формула для моменту інерції суцільного циліндра?
6. Запишіть формулу для кінетичної енергії тіла, яке обертається.

Лабораторна робота №11

Визначення моменту інерції тіла довільної форми та перевірка теореми Штейнера методом крутильних коливань

Мета роботи: навчитись на практиці визначати момент інерції тіл довільної форми та перевірити теорему Штейнера методом крутильних коливань.

Прилади й матеріали: трифілярний підвіс (маса платформи $M = (0,220 \pm 0,001) \text{ кг}$; $r = (5,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $R_0 = (12,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $L = (2,05 \pm 0,01) \text{ м}$; $m_y = (0,420 \pm 0,001) \text{ кг}$, секундомір, штангенциркуль, набір тіл, момент інерції яких потрібно визначити.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [2] і теоретичні відомості цього посібника.
2. Обчислити момент інерції не навантаженої системи.
3. Визначити масу тіла та період коливання системи з тілом. Порівняти результат з теоретичним.
4. Вивести формулу для обчислення відносної та абсолютної похибок і визначити їх для моменту інерції тіла.
5. Перевірити теорему Штейнера на двох однакових циліндричних тіл. Обчислити момент інерції системи, врахувавши загальну масу системи.

Теоретичні відомості та опис приладів

Момент інерції тіла довільної форми можна виміряти методом трифілярного підвісу. Трифілярний підвіс являє собою круглу плоску платформу у вигляді диска, підвішену на трьох симетрично розміщених по вершинах рівнобічного трикутника металевих нитках (рис. 1). Радіус платформи R_0 . Верхні кінці ниток прикріплені до невеликого диска радіуса r_0 . Трифілярний підвіс кріпиться до спеціального кронштейна, вмонтованого в стіну. Платформа може здійснювати крутильні коливання навколо вертикальної осі, яка перпендикулярна до її площини і проходить через її центр. Обертальний імпульс для початку крутильних коливань реалізується поворотом верхнього диска за допомогою спеціального пристрою (на ньому кріплять горизонтальну шайбу, від якої відходить шнур, перекинутий через блок) навколо

вертикальної осі без маятникоподібних коливань (вони дуже утруднюють вимірювання).

При крутильних коливаннях платформи її центр мас переміщується вздовж осі обертання, набуваючи найвищого положення (h_{\max}) при максимальному відхиленні платформи від положення рівноваги та найнижчого при проходженні положення рівноваги.

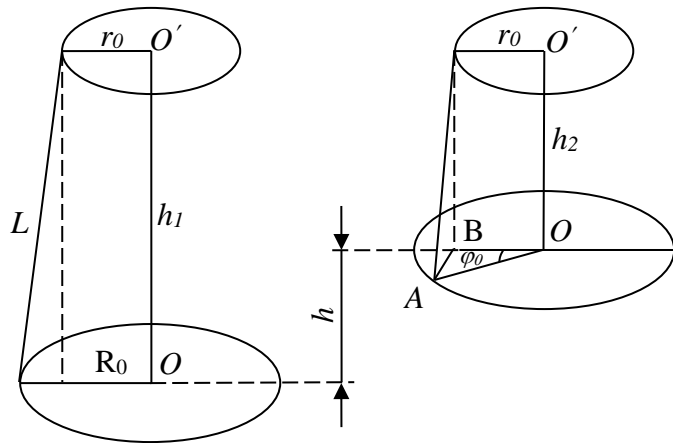


Рис. 1

При відсутності зовнішніх сил, які діють на трифілярний підвіс, і малих кутах відхилення від рівноважного положення платформа коливається за гармонічним законом:

$$\varphi = \varphi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (1)$$

Якщо знехтувати роботою сил тертя, то за законом збереження енергії маємо

$$\frac{1}{2} I_z \omega_{\max}^2 = mgh_{\max}, \quad (2)$$

де I_z і m – момент інерції платформи відносно осі обертання і її маса; ω_{\max} – кутова швидкість при проходженні платформою положення рівноваги; g – прискорення вільного падіння. Продиференціювавши рівняння коливань диска (1) знаходимо максимальне значення кутової швидкості

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi\varphi_0}{T}.$$

Висота h_{\max} , на яку підніметься диск при повороті на кут φ_0 ,

$$h_{\max} = h_1 - h_2, \text{ або } h_{\max} = \frac{h_1^2 - h_2^2}{h_1 + h_2}. \quad (3)$$

З рис. 1 $h_1^2 = L^2 - (R_0 - r_0)^2$; $h_2^2 = L^2 - AB^2 = L^2 - (R_0^2 + r_0^2 - 2R_0r_0 \cos \varphi_0)$.

Можна вважати, що $h_1 + h_2 \approx 2L$, тоді, підставивши в (3) значення h_1 і h_2 , матимемо:

$$h_{\max} = \frac{4R_0 r_0 \sin^2 \frac{\varphi_0}{2}}{2L}.$$

Через те що кут φ_0 дуже малий, $\sin^2 \frac{\varphi_0}{2} \approx \frac{\varphi_0^2}{4}$; отже,

$$h_{\max} = \frac{R_0 r_0 \varphi_0^2}{2L}.$$

Підставивши значення ω_{\max} і h_{\max} в (2), матимемо робочу формулу для визначення моменту інерції платформи:

$$I_z = \frac{mgR_0 r_0}{4\pi^2 L} T^2. \quad (4)$$

Порядок виконання роботи

1. Повернути верхній диск на деякий кут і за допомогою секундоміра визначити період коливання системи. При цьому слід виміряти час 20 – 30 повних коливань.

2. За формулою (4) обчислити момент інерції не навантаженої системи I_z , знаючи наперед R_0, r_0, m і L .

3. Покласти на нижній диск тіло, момент інерції якого треба визначити. Визначити масу m_1 тіла та період коливання T_1 системи з тілом.

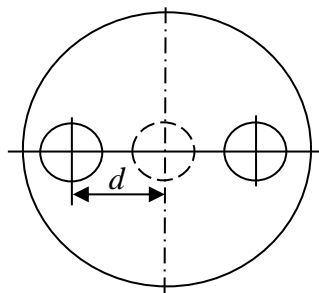


Рис. 2.

За формулою (4) обчислити момент інерції всієї системи, врахувавши, що її маса дорівнюватиме $m + m_1$. Момент інерції – величина адитивна, тому $I = I_1 + I_z$ і момент інерції досліджуваного тіла $I_1 = I - I_z$. Порівняти результат з теоретичним.

4. Вивести формулу для обчислення відносної та абсолютної похибок і визначити їх для моменту інерції тіла.

5. Перевірити теорему Штейнера на двох однакових циліндричних тілах з масами m_2 . Спочатку за п.3 визначити момент інерції одного тіла I_2 , поклавши його на платформу так, щоб вісь обертання проходила через його центр мас.

Потім розмістити обидва тіла симетрично вздовж діаметра платформи (рис. 2). За формулою (4) обчислити момент інерції системи, врахувавши загальну масу системи $m + 2m_2$.

Тоді $I_3 = I_z + 2I_4$ і $I_4 = \frac{I_3 - I_z}{2}$.

Порівняти експериментально визначену величину I_4 з обчисленою за теоремою Штейнера: $I_4 = I_2 + m_2 d^2$ (відстань d виміряти штангенциркулем).

Контрольні запитання та завдання

1. Дайте означення моменту інерції.
2. Від чого залежить момент інерції тіла?
3. Які моменти інерції називають головними моментами інерції?
4. Чому дорівнює момент інерції суцільного циліндра?
5. Під впливом якої сили трифілярний підвіс здійснює крутильні коливання?
6. Чому при крутильних коливаннях платформи її центр мас переміщується по осі обертання?
7. Сформулюйте теорему Штейнера.
8. Виведіть формули для обчислення моменту інерції диска відносно осей: перпендикулярної до площини диска, яка проходить через центр мас, і осі, яка збігається з діаметром.

Лабораторна робота № 12

Визначення швидкості звуку в повітрі методом резонансу

Мета роботи: навчитись на практиці визначати швидкість звуку в повітрі для різних частот хвиль.

Прилади й матеріали: установка для визначення швидкості звуку в повітрі, звуковий генератор, гучномовець.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу і теоретичні відомості інструкції.
2. Визначити швидкість поширення звуку в повітрі за резонансом для звукових хвиль трьох різних частот.
3. Користуючись залежністю швидкості звуку від температури, обчислити швидкість звуку в повітрі при температурі 0°C .

Увага! Приступити до виконання лабораторної роботи лише з дозволу викладача.

Теоретичні відомості й опис приладів

Коливання і хвилі, що поширюються у різних середовищах і тілах, частоти яких лежать у границях сприймання органом слуху людини, тобто приблизно від 20 до 20 000 Гц, називаються *звуком*. Коливання і хвилі з частотами меншими, ніж частоти нижньої межі слуху, називаються *інфразвуком*, а з частотами більшими від верхньої межі слуху *ультразвуком*. Слід розрізняти дві сторони одного й того самого явища: звук як фізичний процес, що являє собою окремий випадок коливного та хвильового руху: і звук як певне психофізіологічне явище. Характеризуючи фізичну сторону явища, ми говоримо про інтенсивність (силу) звуку, його склад і частоту. Маючи на увазі звукові відчуття говоримо про гучність, тембр, висоту звуку. У твердих тілах звук може поширюватись як у вигляді поздовжніх, так і поперечних хвиль. Оскільки в рідинах і газах не існує деформації зсуву, то в цих середовищах звук поширюється тільки у вигляді поздовжніх хвиль. Взагалі кажучи, найповніше вивченні звукові явища в повітрі та воді, оскільки перше середовище являє собою великий інтерес з точки зору слухового сприймання, а друге – з погляду ультразвукової акустики. У рідинах і газах звукові хвилі являють собою згущення і розрідження середовища, що чергуються між собою і віддаляються від джерела звуку з певною метою, характерною для кожного середовища, швидкістю. Як показує теорія, швидкістю поширення поздовжніх звукових хвиль

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

а швидкість поширення поперечних звукових хвиль

$$v_{\perp} = \sqrt{\frac{N}{\rho}},$$

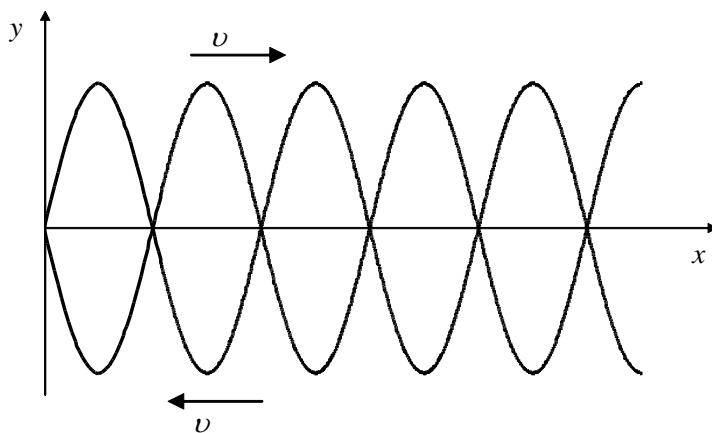
де ρ - густина даного середовища;

E – модуль Юнга;

N – модуль зсуву.

При поширенні звуку в повітрі значну роль відіграють неоднорідність середовища, температура та вологість повітря.

Звукові хвилі, що виходять з різних джерел, перекриваючись в деякій ділянці, можуть накладатися, тобто інтерферувати. Окремий випадок інтерференції звуку становить інтерференція двох зустрічних хвиль з однаковими частотами і амплітудами. Тоді утворюються так звані стоячі хвилі.



Утворення стоячих звукових хвиль можна одержати при відбиванні звуку (рис. 1). У певних точках амплітуда стоячої хвилі дорівнює сумі амплітуд обох коливань, в інших певних точках – результуюча амплітуда дорівнює їх різниці. Перші точки називаються *пучностями*, другі – *вузлами* стоячої хвилі.

Явище звукового резонансу має місце тільки тоді, коли біля вільного краю повітряної порожнини є пучність, а в місці відбивання падаюча і відбита хвилі утворюють вузол. Таким чином, віддаль між відкритим кінцем порожнини і дном дорівнює непарному числу чвертей довжини хвилі, тобто

$$l_n = (2n - 1) \frac{\lambda}{4} \quad (1),$$

де λ – довжина звукової хвилі; $n = 1, 2, 3, \dots$

Отже, якщо висота стовпа повітря l в порожнині дорівнює $\frac{1}{4}; \frac{3}{4}; \frac{5}{4}$; і т.д. довжини звукової хвилі, то має місце максимуму звукового ефекту – звуковий резонанс. Якщо тільки ця висота зміниться, то порушується співвідношення (1), і явище резонансу зникне, тобто звучання стане слабким.

Швидкість поширення коливань зв'язана з довжиною хвилі λ та частотою ν таким співвідношенням: $v = \lambda \cdot \nu$

Підставивши в останню формулу замість λ його значення з рівняння (1), одержимо

$$v = \frac{4l_n \nu}{2n - 1}, \quad (2)$$

де v – швидкість поширення звуку в повітрі при температурі досліду t .

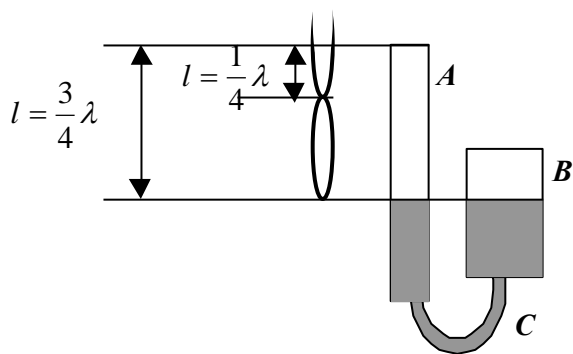
Щоб привести формулу для визначення швидкості звуку до 0°C користуються формулою

$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1 + 0,004t^\circ}} \quad (3)$$

Завдання. Визначення швидкості звуку в повітрі методом резонансу

Для роботи необхідні: прилад для визначення довжини звукової хвилі; телефон; звуковий генератор.

Прилад для визначення швидкості звуку в повітрі (рис.2) складається із сполучених гумовою трубкою С посудин А і В. Посудина А звичайно являє собою скляну циліндричну трубку довжиною



близько 1 м і діаметром 4–5 см, посудина В – широка циліндрична посудина. Піднімаючи або опускаючи посудину В, можна легко змінювати висоту стовпа повітря в трубці А. Ця висота вимірюється по шкалі, нанесеній на самій трубці А.

Якщо висота стовпа повітря в трубці А відповідає співвідношенню (1), то матиме місце явище резонансу, тобто спільне звучання джерела звуку і стовпа повітря. Джерелом звуку служить телефон, сполучений із звуковим генератором. Застосування звукового генератора має ті переваги, що дає можливість вимірювати швидкість звуку в повітрі за резонансом звукових хвиль різноманітної частоти.

Порядок виконання роботи

1. Встановлюють генератор на задану викладачем частоту.
2. Повільно опускаючи рівень води в посудині А, відмічають положення, коли звук досягає максимальної сили. Віддаль від краю трубки до відміченого положення рівня води дорівнює довжині резонуючого стовпа повітря, тобто,

$$l_1 = \frac{1}{4} \lambda.$$

Одержане значення відповідає першому звуковому максимуму. Відліки проводяться з точністю до 0,5 см.

3. Знаючи частоту ν і довжину резонуючого стовпа повітря l , за формулою (2) визначають швидкість поширення звуку в повітрі.
4. Аналогічно знаходять значення довжин резонуючого стовпа повітря при другому, третьому і т.д. звукових максимумах і на їх підставі роблять потрібні обчислення.
5. Проводять ті ж вимірювання при інших частотах ν .
6. Визначають температуру повітря в кімнаті з точністю до 1⁰С і приводять швидкість звуку до температури 0⁰С.

Контрольні питання та завдання

1. Який механізм виникнення стоячих хвиль?
2. При якій умові в повітряному стовпі буде існувати стояча хвиля?
3. Звукові хвилі яких частот сприймаються органами слуху людини?
4. Запишіть формулу стоячої хвилі та проаналізуйте її.
5. Що називається пучністю стоячої хвилі?
6. Що називається вузлом стоячої хвилі?
7. Яка відстань між сусідніми пучностями стоячої хвилі?
8. Який зв'язок між частотою і довжиною хвилі?

ДОДАТОК

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

n	α								
	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
25	0,13	0,26	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
30	0,13	0,26	0,53	0,85	1,31	1,70	2,05	2,56	2,75
35	0,13	0,26	0,53	0,85	1,31	1,69	2,04	2,45	2,73
40	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
45	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,68	2,02	2,41	2,69
50	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,68	2,01	2,40	2,68
60	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,67	2,00	2,39	2,67
70	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,67	1,99	2,38	2,66
80	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,67	1,99	2,37	2,65

Таблиця 2. Значення прискорення сили тяжіння для різних широт (на висоті рівня моря)

φ^0	$g, \text{ см/с}^2$	φ^0	$g, \text{ см/с}^2$
0	978,05	50	980,98
10	978,20	60	981,92
20	978,65	70	982,61
30	979,34	80	983,06
40	980,18	90	983,22

Таблиця № 3. Граничні абсолютні похибки деяких мір

№ з/п	Назва міри	Значення міри, діапазон вимірювання	Ціна поділки шкали	Межа похибки засобу вимірювання або гранична абсолютна похибка
1	Лінійки: а) металеві; б) дерев'яні; в) пластмасові з накатаними под. шк.	500, 1000 мм 300, 400, 500, 750 мм 250, 300 мм	1 мм 1 мм 1 мм	0,2 мм 0,5 мм 1 мм
2	Рулетки й міри кравецькі (Рулетки вим. неметалеві, ГОСТ 11900-66).	1 м 1,5 м; 2 м	5 мм 5 мм	1 мм 3 мм
3	Комплект гир ГОСТ 7328	10 мг 20 мг 50 мг 100 мг 200 мг 500 мг 1 г 2 г 5 г 10 г 20 г 50 г 100 г		0,25 мг 0,3 мг 0,4 мг 0,5 мг 0,6 мг 0,8 мг 1,0 мг 1,2 мг 1,5 мг 2,0 мг 2,5 мг 3,0 мг 5,0 мг
4	Набір тягарців із двома гачками	100 г	-	2 г
5	Мензурки 2-го класу, ГОСТ 1770-64	100, 250, 500, 1000 мл	10 мл 25 мл 25 мл 50 мл	5,00 мл 5,00 мл 12,50 мл 25,00 мл
6	Циліндри мірні (наливні) 2-го класу, ГОСТ 1770-64	100 мл 250 мл 500 мл 1000 мл	1 мл 5 мл 5 мл 10 мл	0,25 мл 1,25 мл 2,50 мл 5, 00 мл
7	Набір резисторів (шкільний)	1, 2, 5 Ом	-	3 % номінального значення
8	Магазин опорів штепсельний (шкільний)	10, 20, 50 Ом	-	1,5 % номінального значення

**Таблиця № 4. Граничні абсолютні похибки деяких
вимірювальних приладів**

№ з/п	Назва вимірювального приладу	Діапазон вимірювання	Ціна поділки шкали	Межа похибки засобу вимірювання або гранична абсолютна похибка
1	Штангенциркулі, ГОСТ 166-63	0 ...125, 0...200, 0...320 мм	0,1 мм або 0,05 мм (за ноніусом)	Одне значення ціни поділки по ноніусу
2	Терези рівноплечі, ручні, ГОСТ 359-54	1,00 ...20 г 5,00...100 г	-	20 мг при 20 г (6 мг при 2 г) 50 мг при 100 г (10 мг при 10 г)
3	Терези шкільні	10...200 г	-	50 мг при 10 г (20 мг при 200 г)
4	Термометри скляні рідинні (не ртутні) ГОСТ 9177-74	-20 °С 100 °С -35 °С 100 °С	0,2 °С; 0,5 °С; 1 °С, 2 °С, 5 °С	1 ціна поділки шкали, якщо вона рівна 1 °С, 2 °С, 5 °С і 2 ціни поділки, якщо вона дорівнює 0,2 °С; 0,5 °С.
5	Термометри ртутні скляні, ГОСТ 2045-71	-35 °С 0 °С 0 °С 100°С 100 °С 200 °С -35 °С 200 °С -35 °С 100 °С 100 °С 200 °С -35°С 200 °С -35 °С 200 °С	0,1 °С; 0,2 °С 0,2 °С 0,2 °С 0,5 °С 1 °С 1 °С 1 °С 2 °С 2 °С 5 і 10 °С	0,3 °С, 0,3 °С 0,2 °С 0,4 °С 1 °С 1 °С 1 °С 2 °С 2 °С 5 °С
6	Динамометр навчальний	0...4 Н	0,1 Н	0,05 Н
7	Секундоміри механічні	30... 60 с	-	1,5 ціни поділки шкали за один оберт секундної стрілки
8	Секундоміри електричні	30 с	-	0,5 ціни поділки шкали за один оберт секундної стрілки
9	Амперметр шкільний	0...2 А	0,1 А	0,05 А
10	Вольтметр шкільний	0...6 В	0,2 В	0,15 В

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Архангельский М.М. Курс физики. Механика. М: Просвещение, 1975. 424 с.
2. Бушок Г. Ф., Венгер Є. Ф. Курс фізики : у 3 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка : навч. посіб. К. : Вища шк., 2002. 375 с.
3. Дущенко В. П., Кучерук І. М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. К. : Вища шк., 1987. 431 с.
4. Загальна фізика: Лабораторний практикум. : Навч. посібник /В. М. Барановський, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук та ін.; За заг. ред. І. Т.Горбачука.– К. : Вища шк., 1992.– 509 с.: іл.
5. Сивухин Д. В. Механика: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1990. . 592 с.
6. Физический практикум / под ред. В. И. Ивероновой. М. : Госиздат физ.-мат. лит., 1962. 956 с.

Навчально-методичне видання

**Кобель Григорій Петрович
Головіна Ніна Анатоліївна
Мартинюк Олександр Семенович
Савош Валентин Олексійович**

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З МЕХАНІКИ

(Практикум)

Друкується в авторській редакції

Підп. до друку 16.06.2016. Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір офс. Гарн. Таймс. Друк цифровий.
Обсяг 4,4 ум. друк. арк., 4,3 обл.-вид. арк. Наклад 100 пр. Зам.
Видавець і виготовлювач – Вежа-Друк (м. Луцьк, вул. Бойка,1, тел. 29-90-65).
Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України.
ДК № 4039 від 08.04.2011 р.