

Міністерство освіти і науки України
Мукачівський державний університет
Кафедра інженерії, технологій та професійної освіти



ФІЗИКА: ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Частина 1

Механіка. Молекулярна фізика. Термодинаміка

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної форми навчання спеціальностей

131 «Прикладна механіка»,
182 «Технології легкої промисловості»,
014.15 «Середня освіта (Природничі науки)»

УДК 53:539.19:534:536(072)(076.5)

*Розглянуто та рекомендовано до друку
науково-методичною радою Мукачівського державного
університету протокол № 6 від 30 січня.2025р.*

*Розглянуто та схвалено на засіданні кафедри інженерії, технологій
та професійної освіти протокол № 5 від 26 грудня 2024р.*

Укладачі: Кабацій В.М., Варга В.Д.

Рецензент: Жигуц Ю.Ю., д.т. н., професор кафедри технології
машинобудування ДВНЗ «Ужгородський національний
університет»

Ф 48

Фізика: Лабораторний практикум. Ч. 1. «Механіка. Молекулярна фізика. Термодинаміка» / для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 182 «Технології легкої промисловості», 014.15 «Середня освіта (Природничі науки)» / В.М. Кабацій, В.Д. Варга – Мукачево: МДУ, 2025. – 48 с. (1,23 др. арк.)

Видання містить методичні рекомендації та завдання до виконання лабораторних робіт, вимоги щодо оформлення звіту, питання для самоаналізу та тестові завдання. Призначено для здобувачів денної форми навчання спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 182 «Технології легкої промисловості», 014.15 «Середня освіта (Природничі науки)», а також для студентів та інженерно-технічних фахівців інших спеціальностей.

© В.М. Кабацій, 2025
© В.Д. Варга, 2025
© Мукачівський державний
університет, 2025

ЗМІСТ

I. Вступ	3
II. Вимірювання фізичних величин.....	5
III. Похибки вимірювань фізичних величин.....	6
IV. Правила роботи у фізичній лабораторії та вимоги по техніці безпеки при виконанні лабораторних робіт.....	11
V. Загальні методичні вказівки до проведення лабораторних занять.....	12
VI. Лабораторні роботи.....	15
6.1. <i>Лабораторна робота № 1.</i> Вивчення вимірювальних приладів і визначення густини тіл правильної геометричної форми.....	15
6.2. <i>Лабораторна робота № 2.</i> Вивчення законів динаміки на машині Атвуда.....	18
6.3. <i>Лабораторна робота № 3.</i> Вивчення законів обертового руху.....	21
6.4. <i>Лабораторна робота № 4.</i> Визначення моменту інерції махового колеса.....	24
6.5. <i>Лабораторна робота № 5.</i> Визначення середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул повітря.....	29
6.6. <i>Лабораторна робота № 6.</i> Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідин методом падаючої кульки. (Метод Стокса).....	31
6.7. <i>Лабораторна робота № 7.</i> Вивчення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом підняття рідини в капілярах.....	34
6.8. <i>Лабораторна робота № 8.</i> Визначення питомої теплоємності рідин.....	36
VII. Тестові завдання.....	39
VIII. Рекомендована література	45

Вступ

У вищому навчальному закладі курс «Фізика» є одним із основних і визначальних як для всього процесу навчання, так і подальшої практичної діяльності фахівця. Він є необхідним для успішного засвоєння спеціальних дисциплін.

Проведення лабораторних робіт з курсу «Фізика» має на меті ознайомити здобувачів з основами фізики, які є необхідними для розв'язання теоретичних і практичних задач; виробити навички фізичного дослідження прикладних завдань; розвивати логічне мислення та вміння вибирати та використовувати обчислювальні методи та засоби, таблиці й довідники; експериментально перевіряти основні закономірності фізичних явищ, правильно вибирати методiku експерименту, вимірювальні прилади та вміти їх правильно використовувати, застосовувати та використовувати теорію явищ, які вивчаються.

Виконання лабораторних робіт з курсу забезпечить формування у здобувачів системи компетентностей, які є критеріями оцінки якості знань.

Загальні компетентності:

ЗК1. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

ЗК4. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК9. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

ЗК12. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

Спеціальні компетентності:

ФК4. Здатність здійснювати оптимальний вибір технологічного обладнання, комплектацію технічних комплексів, мати базові уявлення про правила їх експлуатації.

ФК10. Здатність описувати та класифікувати широке коло технічних об'єктів та процесів, що ґрунтується на глибокому знанні та розумінні основних механічних теорій та практик, а також базових знаннях суміжних наук.

Програмні результати навчання:

РН2. Використовувати знання теоретичних основ механіки рідин і газів, теплотехніки та електроніки для вирішення професійних завдань.

РН8. Знати і розуміти основи інформаційних технологій, програмування, практично використовувати прикладне програмне забезпечення для виконання інженерних розрахунків, обробки інформації та результатів експериментальних досліджень.

II. Вимірювання фізичних величин

Будь-яке явище можна вивчати з кількісної і якісної сторони. Вивчення кількісної сторони явищ привело до створення одиниць вимірювань, вимірювальних приладів й методики вимірювання тієї чи іншої величини.

Вивчення явищ потребує від експериментатора достатніх навичок для виконання спостережень та вимірювань. Ці навички можна придбати в процесі навчання. Важливим завданням фізичного практикуму є виховання у здобувачів навичок дослідної роботи, навичок кількісного та якісного вивчення фізичних явищ. У процесі виконання лабораторних робіт здобувачі навчаються виконувати точні вимірювання, більш глибоко вивчають фізичні закони та явища. Якісне вивчення фізико-технічних явищ потребує різноманітних вимірювань, які можна виконати з різною точністю.

Точність вимірювання визначається тією найменшою частиною одиниці вимірювання, до якої з певністю в правильності результату можна виконати вимірювання. Сучасна техніка потребує високої точності вимірювань, необхідних при виготовленні багатьох деталей, точних вимірювальних машин і приладів. У наш час досягнуто досить високої точності вимірювання. Так, за допомогою мікроінтерферометра можна оцінювати правильність плоских поверхонь з точністю до $2,5 \cdot 10^{-9}$ м.

Виміряти безпосередньо будь-яку фізичну величину - це значить порівняти її з іншою однорідною з нею величиною, яку приймають за одиницю вимірювання. Одержане число показує, у скільки разів вимірювана величина більша або менша за вибрану одиницю вимірювання; це число має таке саме найменування, як і вибрана одиниця вимірювання.

Вимірювання бувають **прямі** та **посередні**. **Прямі вимірювання здійснюються шляхом, безпосереднього порівняння фізичної величини з одиницями вимірювання**, як це має місце при вимірюванні довжини лінійкою, штангенциркулем, мікрометром і т. д. **При посередніх вимірюваннях, які трапляються частіше, вимірюють не шукану величину безпосередньо, а величини, функціонально зв'язані з нею.** Ця функціональна залежність, описана математичною формулою, дає змогу визначити шукану величину. Так, наприклад, площу прямокутника знаходимо за формулою $S = a \cdot b$, де a – довжина і b – ширина, які вимірюються безпосередньо.

Оскільки фізичні величини функціонально зв'язані між собою, не можна для кожної з них довільно встановити одиницю вимірювання. В науці й техніці довільно встановлено одиниці тільки для деяких величин, які прийнято називати основними. Інші одиниці виводяться на основі фізичних закономірностей, які пов'язують ці величини з основними; їх називають похідними одиницями. Сукупність основних і похідних одиниць вимірювання фізичних величин складає систему одиниць. З 1963 р. введено Міжнародну систему одиниць (СІ).

III. Похибки вимірювань фізичних величин

Абсолютно точно виміряти будь-яку фізичну величину неможливо, результат вимірювання обов'язково матиме похибку. Похибки вимірювань бувають систематичні та випадкові. Систематичні похибки зумовлені головним чином недосконалістю, несправністю або неправильною установкою приладів для вимірювання. Систематичні похибки можна виявити й усунути або звести їх до мінімуму. Випадкові похибки виникають, по-перше, тому, що нема приладів, які б дали точне значення вимірюваних величин, по-друге, тому, що експериментатор, в силу фізіологічних особливостей своїх органів відчуття, вносить у вимірювання власні похибки; третя причина випадкових, похибок – вплив навколишнього середовища. Наявність у вимірюваннях похибок, які вносить експериментатор, виявляється при повторних вимірюваннях одними і тими ж приладами однієї й тієї ж фізичної величини. Результати вимірювань відрізнятимуться останніми значущими цифрами.

Крім систематичних і випадкових похибок можуть бути ще так звані промахи. Промахи – це явно помилкові виміри й спостереження, які не слід брати до уваги при розрахунках. Промахи – наслідок недбайливого відліку на шкалі, неправильного запису результату вимірювання і т. д.

При вимірюванні фізичних величин і обробці одержаних даних будемо враховувати тільки випадкові похибки, з яких і виведемо оцінку точності вимірювання. Для більш точного визначення вимірюваної величини повторюють вимірювання кілька, разів. При великій кількості вимірювань однаково часто трапляються як додатні, так і від'ємні випадкові похибки. З декількох вимірювань якоїсь фізичної величини можна визначити її середнє арифметичне значення. Декілька вимірювань дають також можливість встановити як похибку окремих вимірювань, так і похибку кінцевого результату, тобто дають можливість встановити межі, в яких перебуває одержаний результат. При n вимірах якоїсь величини ми одержимо n різних її значень. Найбільш близьким до дійсного значення вимірюваної величини буде середнє арифметичне значення всіх вимірювань. Якщо позначити результат окремих вимірювань через A_1, A_2, \dots, A_n то середнє арифметичне значення вимірюваної величини визначається за формулою:

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$$

Похибки прямих вимірювань.

Значення окремих вимірювань відрізняються від середнього арифметичного значення A_0 такими величинами:

$$\Delta A_1 = |A_0 - A_1|$$

$$\Delta A_2 = |A_0 - A_2|$$

$$\Delta A_3 = |A_0 - A_3|$$

.....

$$\Delta A_n = |A_0 - A_n|$$

Абсолютні значення різниць $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3 \dots \Delta A_n$ між середнім арифметичним значенням вимірюваної величини окремих вимірювань називають абсолютними похибками окремих вимірювань. Середнє арифметичне абсолютних похибок усіх вимірювань, які необхідні для знаходження відносної похибки вимірювання й запису кінцевого результату, обчислюють за формулою:

$$\Delta A_{cp} = \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 + \dots + \Delta A_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_i}{n}$$

Величину ΔA_{cp} називають середньою абсолютною похибкою вимірювань.

Приймаючи тільки абсолютні значення похибок, ми тим самим свідомо одержуємо найбільшу з можливих похибок. Два знаки середньої абсолютної похибки $\pm \Delta A_{cp}$ дають можливість визначити межі, в яких перебуває шукана величина A , а саме: $(A_{cp} - \Delta A_{cp}) < A < (A_{cp} + \Delta A_{cp})$. В тих випадках, коли нема потреби підкреслювати, що маємо справу з середнім арифметичним значенням абсолютної похибки, будемо називати її абсолютною похибкою. Для більш точного встановлення меж, в яких перебуває вимірювана величина, в наукових дослідженнях користуються середньою квадратичною абсолютною або найбільш імовірною похибками.

За абсолютною похибкою можна оцінити точність вимірювання однорідних величин однакового порядку. Чим менша абсолютна похибка, одержана при вимірюванні даної величини, тим точніше виконано вимірювання.

Для визначення точності вимірювання величин різних порядків та їх найменувань вводиться поняття відносної похибки.

Відотною похибкою називається відношення абсолютної похибки ΔA_0 до вимірюваної величини A_0 . Відносну похибку зазвичай визначають у відсотках:

$$E = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%$$

Візьмемо конкретний приклад і встановимо, що точніше виміряно: товщину пластинки, для якої знайшли значення $A = (2,25 \pm 0,01) \text{ мм}$, чи швидкість світла $c = (300000 \pm 100 \text{ км/сек})$. Абсолютна похибка при вимірюванні товщини пластинки невелика ($0,01 \text{ мм}$) порівняно з абсолютною похибкою вимірювання швидкості світла (100 км/сек). Відносна похибка вимірювання товщини пластинки складає $0,4\%$, а для швидкості світла складає $0,03\%$, тобто швидкість світла в даному випадку визначено точніше.

Похибки посередніх вимірювань

Якщо шукана фізична величина не визначається безпосереднім вимірюванням, а розраховується після підстановки результатів прямих вимірювань у формулу, то її похибка залежить від величини похибок окремих вимірювань.

Розглянемо, як визначаються абсолютна й відносна похибки шуканої величини X в окремих випадках посередніх вимірювань.

Похибка суми

Припустимо, що вимірювана величина X являє собою суму двох безпосередньо вимірюваних величин A і B , тобто $X=A+B$. При вимірюванні величини A абсолютна похибка дорівнює $\pm\Delta A$, а при вимірюванні величини B дорівнює $\pm\Delta B$.

Знайдемо абсолютну похибку шуканої величини $\pm\Delta X$:

$X+\Delta X= A \pm \Delta A + B \pm \Delta B$. Віднімаючи з цього рівняння початкове, одержимо

$$\pm \Delta X = \pm (\Delta A + \Delta B) \quad (4)$$

Таким чином, **абсолютна похибка суми дорівнює сумі абсолютних похибок доданків.**

Відносна похибка суми дорівнює:

$$E = \frac{\Delta A + \Delta B}{A + B} \cdot 100\% \quad (5)$$

Похибка різниці

Нехай шукана величина є різниця двох безпосередньо вимірюваних величин A і B , тобто $X=A-B$. При вимірюванні A і B було зроблено похибки $\pm\Delta A$ і $\pm\Delta B$. Отже, **максимальну абсолютну похибку** знаходимо згідно рівняння:

$$X \pm \Delta X = A \pm \Delta A + B \pm \Delta B \quad (6)$$

Зробивши перетворення, одержимо

$$\pm \Delta X = \pm (\Delta A + \Delta B) \quad (7)$$

Відносна похибка різниці дорівнює:

$$E = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B} \cdot 100\% \quad (8)$$

Похибка добутку

Нехай шукана величина є добутком двох безпосередньо вимірюваних величин A і B , тобто $X=A \cdot B$. Тоді $X+\Delta X = (A \pm \Delta A) \cdot (B \pm \Delta B)$.

Зробивши перетворення, одержимо **максимальну абсолютну похибку**

$$\pm \Delta X = \pm (A\Delta B + B\Delta A) \quad (9)$$

Відносна похибка добутку дорівнює:

$$E = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% = \frac{A\Delta B + B\Delta A}{A \cdot B} \cdot 100\% \quad (10)$$

Похибка степеня

Нехай $X=a^n$, де n – величина стала. Цей вираз можна переписати так:

$X=A \cdot A \cdot A \cdot A \cdot \dots \cdot A$ (n разів). **Абсолютна похибка степеня дорівнює**

$$\pm \Delta X = \pm n \cdot A^{n-1} \cdot \Delta A$$

Відносна похибка степеня дорівнює

$$\frac{\Delta X}{X} = n \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\% \quad (11)$$

Абсолютна похибка степеня дорівнює добутку показника степеня на основу, піднесену до степеня, зменшеного на одиницю, і на абсолютну похибку його основи.

Похибка частки

Нехай шукана величина є часткою двох безпосередньо вимірюваних величин A і B , тобто $X=A/B$. Похибку дробу знаходимо за правилом похибки

добутку $X=A \cdot B^{-1}$. Тоді зробивши перетворення, одержимо **максимальну абсолютну похибку**

$$\pm \Delta X = \pm X \cdot \left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \right) \cdot 100\% \quad (12)$$

Відносна похибка частки дорівнює:

$$E = \left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \right) \cdot 100\% \quad (13)$$

Відносна похибка дробу дорівнює сумі відносних, похибок чисельника й знаменника.

Похибки поодиноких вимірювань і табличних величин.

Якщо в результаті вимірювань одержуємо ряд цілком однакових значень вимірюваної величини або обчислювана абсолютна похибка менша за ту, яку дає прилад, абсолютна похибка визначається за точністю приладу. Як правило, абсолютна похибка дорівнює половині найменшої поділки шкали приладу. Приклад. Якщо ціна поділки термометра $0,2^\circ$, то абсолютну похибку слід узяти рівною $0,1^\circ$; якщо найменший важок, яким можна користуватись при зважуванні 10 мг , то за абсолютну похибку слід брати 5 мг . Це ж правило зберігається у випадках, коли виконується тільки одне вимірювання.

Табличні значення фізичних величин (питома теплоємність, густина та ін.), а також деякі величини, як, наприклад k , завжди даються з певною точністю. Ці величини також мають певний вплив на точність кінцевого результату. Табличні значення фізичних величин, ж правило, мають вищу точність порівняно з вимірюваними в лабораторії. Тому при використанні табличних даних їх слід округляти так, щоб їх точність перевищувала точність вимірюваних, величин на одну значущу цифру; в цьому випадку похибку табличних величин можна не враховувати.

Правила округлень і правила наближених обчислень

В кожній лабораторній роботі при посередніх вимірюваннях спочатку виконуються прямі вимірювання величин, а потім визначається шукана величина. Точність вимірювання кожної з величин впливає на точність шуканої величини. Тому перед вимірюванням фізичних величин необхідно перш за все визначити межі точності, які можна одержати за допомогою даних приладів, з тим, щоб найбільш ретельно вимірювати ту величину, яка найбільш впливає на точність результату. Якщо окремі величини вимірюються з різкою точністю то недоцільно виходити далеко за межі точності найменш точно вимірюваної величини. Сказане розглянемо на конкретному прикладі.

Приклад. Нехай при вимірюванні в якій-небудь з калориметричних робіт користуються термометром з найменшою ціною поділки $0,2^\circ$: при визначенні різниці температур двічі відлічувалось положення стовпчика ртуті – на початку і в кінці досліду. Тому абсолютна похибка температури, на яку нагрівають тіло, буде $0,2^\circ$. При зміні температури на 10° відносна похибка дорівнює $\Delta t = 0,02^\circ$. З якою точністю необхідно зважувати тіла, якщо найменша маса в даному досліді 100г ? Щоб відповісти на це запитання, необхідно взяти до уваги похибку при визначенні температури. Відносна

похибка при визначенні температури була $0,02^0$, тому відносна похибка при вимірюванні маси повинна бути такою ж, тобто $\Delta m = 0,02$; тоді абсолютна похибка для маси $A \ m = 2 \text{ г}$. Ця величина показує, що при зважуванні абсолютна похибка не повинна перевищувати 2 г, отже зважувати тіло можна на технічній вазі з точністю до 1 г.

Точність обчислень, завжди повинна відповідати точності вимірювань. Часто надмірна точність обчислень може привести до неправильного уявлення про точність експерименту. Якщо, наприклад, середнє арифметичне значення: товщини пластинки після обчислень було $2,2543 \text{ мм}$ при середній абсолютній похибці $0,03 \text{ мм}$, то студент при цьому показав, що він не засвоїв теорії похибок. Щоб не витратити зайвого часу для одержання надмірної арифметичної точності, необхідно всі величини перед підстановкою в кінцеву формулу заокруглювати, лишаючи в них тільки на одну значущу цифру більше, ніж число цифр у найкоротшій з наближених величин. При округленні наближеного числа відкидати останні цифри, якщо перша з цифр, що відкидаються, менша за п'ять, і додавати одиницю до попередньої цифри, якщо наступна цифра більша або дорівнює п'яти. Щоб за написанням числа, яке виражає результат вимірювання або обчислення, можна було судити про ступінь точності, умовимось писати це число так, щоб усі значущі цифри в ньому, крім останньої, були вірні.

Термін «значущі цифри» не слід плутати з терміном «десяткові знаки» числа. Значущі цифри числа – це всі його цифри, крім нулів, що стоять попереду числа, і нулів, поставлених замість відкинутих цифр при округленні. Десяткові знаки числа — це всі його цифри, розміщені вправо від коми. Наприклад $25,002$ має п'ять значущих цифр, а десяткових знаків три, число $0,0034$ має дві значущі цифри, а чотири десяткових знаків, число 2300 має чотири значущі цифри, а число $2,3 \cdot 10^3$ має дві значущі цифри (в останньому записі нулі вважаються поставленими при округленні числа й вони не є значущі цифри). Якщо обчислення виконують з наближеними числами в кілька дій, то в результаті проміжних дій потрібно зберігати на одну значущу цифру більше порівняно з точністю величин, які визначаються в даному досліді (тобто дві сумнівні цифри).

При всіх арифметичних діях над наближеними числами в кінцевому результаті слід зберігати стільки десяткових знаків, скільки їх мають наближені числа з найменшим числом десяткових знаків. Як було сказано вище, абсолютна похибка результату вказує межі вимірюваної або визначуваної величини, іншими словами, вона характеризує останню значущу цифру вимірюваної або визначуваної (посередні виміри) величини. Тому в абсолютній похибці слід обмежитись однією значущою цифрою, і лише при дуже точних наукових вимірюваннях – двома залишивши одну або дві значущі цифри в абсолютній похибці, округляють і результат вимірювань, залишаючи в ньому сумнівну значущу цифру.

IV. ПРАВИЛА роботи в фізичній лабораторії та вимоги по техніці безпеки при виконанні лабораторних робіт

Перед початком роботи викладач перевіряє знання студентів по змісту роботи, яку вони виконують на даному занятті, ***Підготовленні до роботи студенти з дозволу викладача допускаються до виконання роботи, а не підготовленні - до роботи не допускаються.*** Пропущена робота виконується, здобувачами з дозволу викладача, що проводить заняття в даній підгрупі у вільний від занять час і час роботи лабораторії.

Працюючи в лабораторії, здобувачу необхідно дотримуватись наступних правил:

- до виконання лабораторної роботи слід приступати тільки після повного засвоєння її змісту;
- починати лабораторну роботу слід з ознайомлення з приладами, апаратами! обладнанням, які використовуються в даній роботі;
- на лабораторному столі (стенді) повинні знаходитися тільки предмети, необхідні для виконання даної роботи;
- розміщення апаратури на робочому столі повинне бути таким, щоб схема, з'єднань була найбільш простою, наглядною і робота з приладами була зручною;
- забороняється замінювати або брати обладнання і прилади з других робочих місць без дозволу викладача або лаборанта;
- при складанні складних схем слід спочатку з'єднати головне послідовне коло, починаючи з'єднувати від одного кінця джерела і закінчувати на другому, а потім-з'єднувати паралельні вітки;
- зібрану схему перевіряє викладач. Включати–вимикач-автомат дозволяється лише після дозволу викладача. Будь-які переключення в схемі повинні виконуватися при виключеній напрузі, причому після кожного переключення, видозміна схеми обов'язково повинна бути перевірена викладачем або лаборантом;
- необхідно бережно відноситися до апаратури, що використовується в роботі. Про всі зауваження, несправності або пошкодження здобувач повинен негайно повідомити викладача або лаборанта. Здобувачі, які порушують ці правила і у випадку псуванняними приладів і обладнання, несуть матеріальну відповідальність;
- запис показів приладів слід вносити в наперед складені таблиці у робочий зошит;

Після виконання роботи студент повинен всі записи експериментальних даних узгодити з викладачем, який підписує їх у випадку задовільних результатів.

При одержанні неправильних результатів експеримент слід повторити, а результати перевірити. Тільки після перевірки викладачем правильності результатів можна, відключивши від мережі, розібрати схему.

В лабораторії, де проходять лабораторні заняття використовуються напруги 36 В, 220 В, 380 В. Ці напруги при неправильному поводженні з струмопровідними частинами можуть бути небезпечними для життя. Тому при виконанні лабораторних робіт студенти зобов'язані строго виконувати наступні **правила техніки безпеки**:

1. Не доторкатися відкритих струмопровідних частин схеми, що знаходяться під напругою.
2. Не доторкатися до частин електричних машин, що обертаються, не знімати кришки клемних панелей і т. д.
3. Не виконувати ніяких переключень в схемі, що знаходиться під напругою.
4. Не перевантажувати апаратуру струмом більшим за його номінальне значення і не відходити від приладів і машин які знаходяться під напругою.
5. При виявленні пошкодження електрообладнання, вимірювальних приладів і проводів необхідно відключити напругу і повідомити про це викладача або лаборанта.
6. Вимірювальні прилади, реостати та інші елементи схеми потрібно розміщувати так, щоб ними було зручно керувати і проводити спостереження, не перегинаючись через машини, прилади або з'єднання між ними.
7. При складанні схеми слід запобігати пересіканню проводів, їх натягнутого стану, перекручувати їх, не пересікати проводами проходу між робочими місцями і т. д.
8. У випадку враження електричним струмом необхідно негайно звільнити потерпілого від дії струму, швидко відключити установку, повідомити викладача чи лаборанта або при необхідності викликати лікаря.

V. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

5.1. Підготовка до лабораторного заняття.

Щоб заняття проходили успішно й з користю до них необхідно готуватися, користуючись літературою, що рекомендується: підручниками з фізики й посібниками для лабораторних робіт. Готуючись до виконання даної лабораторної роботи, необхідно спочатку прочитати її опис і, не вдаючись у деталі, уяснити ідею роботи в цілому, зрозуміти її суть, продумати її і виділити головні місця для конспектування. При повторному читанні слід глибоко вивчити теоретичне обґрунтування лабораторної роботи й коротко законспектувати їх. В послідуєчому прочитати і законспектувати решту опису лабораторної роботи. Конспектувати слід в окремому зошиті, призначеному для лабораторних робіт з фізики.

Теоретичні відомості в описах лабораторних робіт викладені коротко. Тому для більш глибокого вивчення деяких питань теорії слід користуватися ще й рекомендованою літературою. Якщо й після цього деякі питання

залишаються незрозумілими, треба їх з'ясувати в керівника занять перед виконанням роботи.

В конспекті, крім стислого викладення теорії, виводу' формул, зображення схем та малюнків записуються наслідки вимірювань та обчислень. Записи в конспекті слід вести чітко й розбірливо. Треба пам'ятати, що без сумлінної підготовки ефект лабораторних занять і користь від них будуть дуже незначними.

5.2. Проведення лабораторних занять

Приступаючи до роботи в лабораторії, необхідно перевірити, чи всі прилади й приладдя, вказані, в описі роботи, стоять на лабораторному столі. Якщо чогось бракує, слід звернутися до лаборанта. Категорично забороняється переносити прилади з інших робочих місць. Далі треба ознайомитися з приладами в цілому та з їх деталями. Якщо буде виявлено якусь несправність, необхідно негайно повідомити про це керівника лабораторних занять. Після ознайомлення з приладами можна приступити до виконання завдання, додержуючись послідовності, вказаної в описі лабораторної роботи, а також використовуючи практичні поради і вказівки. Виконуючи лабораторну роботу, треба схематично зарисувати прилади й установки з натури.

Результати вимірювань, обчислень та інші величини, потрібні в роботі, разом з їх абсолютними похибками записують у таблицю.

Записи ведуть відразу ж після одержання результатів. Результат роботи залежить не тільки від точності вимірювальних приладів, але й від ретельності вимірювань та їх обробки. Після закінчення експериментальної частини роботи за формулами визначають числове значення шуканої величини.

Далі знаходять відносну похибку одержаного результату E (%), а за нею й одержаним результатом обчислюють абсолютну похибку.

Шукану величину записують у вигляді $A = A_0 \pm \Delta A_0$.

Результати всіх вимірювань, спостережень, обчислень і абсолютні похибки вимірюваних величин показують керівникові лабораторного заняття.

Робота вважається виконаною, якщо керівник дасть хорошу оцінку одержаним результатам. Після закінчення роботи всі прилади на лабораторному столі треба привести в порядок.

Якщо здобувач прийде в лабораторію непідготовленим, він до занять не допускається.

5.3. Звіт про виконану роботу.

Звіт про виконану роботу складають на тому ж занятті або не пізніше наступного. Звітом є конспект, написаний при підготовці до лабораторної роботи і при її виконанні.

Звіт про виконану лабораторну роботу має включати:

1. Титульний лист
2. Назву лабораторної роботи
3. Мету роботи.
4. Основні теоретичні відомості.

5. Опис установки.
6. Порядок виконання роботи.
7. Обробку результатів експерименту.
8. Висновки.

Безумовно, деякі роботи відрізнятимуться від указаної схеми. Так, наприклад, якщо результати роботи зображуються графічно, то абсолютні похибки визначаються по відхиленню точок від побудованої кривої. У деяких роботах спочатку визначають абсолютну похибку по середніх значеннях, вимірюваних величин, а потім відносну похибку (прямі вимірювання фізичних величин). Виразити кінцеві значення шуканих величин треба в одиницях Міжнародної системи одиниць (системи СІ).

ЗРАЗОК ЗВІТУ

Лабораторна робота № ...

Тема: Визначення густини тіла правильної геометричної форми

Мета роботи: Навчитися вимірювати густину тіл правильної геометричної форми.

Прилади і пристосування: тіла правильної геометричної форми, штангельциркуль, мікрометр, лінійка, ваги.

Короткі теоретичні відомості

Густина металевої пластинки визначається за формулою:

$$\rho = \frac{m}{l \cdot d \cdot h},$$

де m - маса пластинки, l - її довжина, d - ширина, h - висота. Масу визначали на технічній вазі, довжину та ширину пластинки вимірювали штангенциркулем, а висоту - мікрометром. Результати вимірювань наступні:

№ п/п	$m, г$	$\Delta m, г$	$l, мм$	$\Delta l, мм$	$d, мм$	$\Delta d, мм$	$h, мм$	$\Delta h, мм$
1	13	-	50,31	-	22,27	-	1,55	-
2	13	-	50,52	-	22,30	-	1,59	-
3	14	-	50,28	-	22,28	-	1,57	-
Середні значення	13	1	50,37	0,02	22,28	0,02	1,57	0,02

Абсолютні похибки Δm , Δl , Δd , Δh , які наведені на корпусі ваги, штангельциркуля або мікрометра. Вставляючи значення з таблиці у формулу густини тіла, одержимо

$$\rho = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{50,37 \cdot 10^{-3} \cdot 22,28 \cdot 10^{-3} \cdot 1,57 \cdot 10^{-3}} = 7378 \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

Відносна похибка вимірювань становить

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot 100\% = \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} \right) \cdot 100\% \text{ або}$$

$$E = \left(\frac{1}{13} + \frac{0,02}{50,37} + \frac{0,02}{22,28} + \frac{0,02}{1,57} \right) \cdot 100\% = 9\%$$

Абсолютна похибка дорівнює

$$\Delta\rho = E \cdot \frac{\rho}{100} = 9 \cdot \frac{7378}{100} = 664 \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

Шукана густина тіла

$$\rho = 7378 \pm 664 \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

Аналогічно обчислюються результати вимірювань для тіл іншої форми.

В кінці звіту приводиться зроблений самостійно кожним здобувачем висновок із виконаної лабораторної роботи.

VI. Лабораторні роботи

6.1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Тема: Вивчення вимірювальних приладів і визначення густини тіл правильної геометричної форми.

Мета роботи: Навчитися використовувати вимірні прилади та проводити вимірювання лінійних розмірів тіл різної форми та знаходити абсолютну й відносну похибки при визначенні густини тіл.

Прилади і матеріали: тіла правильної геометричної форми (паралелепіпед, циліндр, куля), технічні ваги та наважки; штангенциркуль; мікрометр, лінійка.

Основні теоретичні відомості

Густиною речовини є величина, яка вимірюється масою речовини в одиниці об'єму. Якщо маса тіла m , його об'єм V , то густина тіла

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

В системі одиниць **СИ** густину тіла вимірюють в кг/м^3 . В даній роботі розглядають тіла правильної геометричної форми. Їх об'єм знаходять за відомими формулами стереометрії:

для паралелепіпеда

$$V = a \cdot b \cdot h, \text{ де} \quad (2)$$

a, b, h – лінійні розміри прямокутного паралелепіпеда;

для циліндра

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}, \text{ де} \quad (3)$$

d – діаметр основи циліндра; h – висота циліндра.

для кулі

$$V = \frac{\pi d^3}{6}, \text{ де} \quad (4)$$

d – діаметр кулі.

Підставляючи значення, об'ємів за формулами (2)-(4) у формулу (1), одержуємо формули густини для речовин відповідних тіл:

для паралелепіпеда

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot h} \quad (5)$$

для циліндра

$$\rho = \frac{4m}{\pi \cdot d^2 \cdot h} \quad (6)$$

для кулі

$$\rho = \frac{6m}{\pi \cdot d^3} \quad (7)$$

Відносні похибки вимірювань густини знайти за формулами:
для паралелепіпеда

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot 100\% = \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h} \right) \cdot 100\% \quad (8)$$

для циліндра

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot 100\% = \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} \right) \cdot 100\% \quad (9)$$

для кулі

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot 100\% = \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{3\Delta d}{d} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

Масу тіл m знаходять зважуванням на технічних вагах, а лінійні розміри – за допомогою штангенциркуля або мікрометра.

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

1. Знайти масу m наданих тіл та їх лінійні розміри в одиницях SI . Результати записати у відповідні таблиці (таб.1–3).

Таблиця 1

Номер досліджу	Паралелепіпед							
	$m,$ 10^{-3} кг	$\Delta m,$ 10^{-3} кг	$a,$ 10^{-3} м	$\Delta a,$ 10^{-3} м	$b,$ 10^{-3} м	$\Delta b,$ 10^{-3} м	$h,$ 10^{-3} м	$\Delta h,$ 10^{-3} м
1		x		x		x		x
2		x		x		x		x
3		x		x		x		x
Середнє значення								

Таблиця 2

Номер досліду	Циліндр							
	$m,$ $10^{-3}кг$	$\Delta m,$ $10^{-3}кг$	$l,$ $10^{-3}м$	$\Delta l,$ $10^{-3}м$	$d,$ $10^{-3}м$	$\Delta d,$ $10^{-3}м$	$h,$ $10^{-3}м$	$\Delta h,$ $10^{-3}м$
1		x		x		x		x
2		x		x		x		x
3		x		x		x		x
Середнє значення								

Таблиця 3

Номер досліду	Куля							
	$m,$ $10^{-3}кг$	$\Delta m,$ $10^{-3}кг$	$l,$ $10^{-3}м$	$\Delta l,$ $10^{-3}м$	$d,$ $10^{-3}м$	$\Delta d,$ $10^{-3}м$	$h,$ $10^{-3}мм$	$\Delta h,$ $10^{-3}м$
1		x		x		x		x
2		x		x		x		x
3		x		x		x		x
Середнє значення								

2. За середніми значеннями вимірних величин та за формулами (5), (6), (7) обчислити густину наданого тіла (паралелепіпеда, циліндра, кулі).

3. За формулами (8), (9), (10) обчислити відносні похибки густини наданих тіл. Визначте абсолютні похибки обчислень густини наданих тіл за формулою

$$\Delta\rho = E \cdot \frac{\rho}{100\%}$$

4. Записати кінцевий результат у вигляді:

$$\rho = \rho_0 \pm \Delta\rho$$

5. Результати експерименту виразити у висновку.

Питання для самоаналізу

1. Що називається матерією, речовиною?
2. Основні одиниці фізичних величин СІ в механіці.
3. Що таке густина тіла? Дати визначення одиниці густини.
4. Що називається абсолютною похибкою фізичних величин?
5. Що називається відносною похибкою фізичних величин?
6. Як визначити абсолютну та відносну похибки непрямих вимірювань?
7. Як визначається точність вимірювання маси тіла?
8. Основні частини вимірювальних приладів, їх точність.

6.2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Тема: Вивчення законів динаміки на машині Атвуда

Мета роботи: Дослідити закони Ньютона на машині Атвуда.

Прилади й матеріали: машина Атвуда; секундомір; платформа; набір додаткових навантажень.

Основні теоретичні відомості

Взаємодія тіл веде до появи прискорень і деформацій. Міра такої взаємодії – сила. Основний закон динаміки для поступального руху (другий закон Ньютона) в загальному вигляді стверджує: *зміна імпульсу абсолютно твердого тіла за величиною і напрямом дорівнює векторній сумі імпульсів сил, що діють на це тіло:*

$$d(m \bar{V}) = \sum_{i=1}^n \bar{F}_i \cdot dt$$

де $m \cdot V$ – імпульс тіла; $F \cdot dt$ – імпульс сили; dt – такий малий проміжок часу, протягом якого всі сили можна вважати постійними.

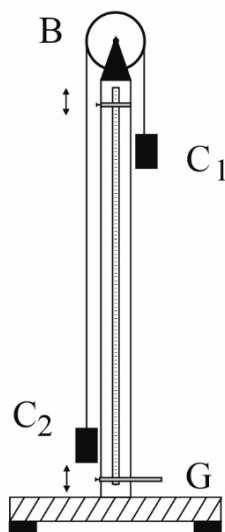
Якщо маса m тіла постійна, то з формули (1) одержується *основне рівняння динаміки поступального руху для нерелятивістського випадку:*

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \sum_{i=1}^n \bar{F}_i \quad (1)$$

Основний закон динаміки обертального руху твердого тіла

$$J \cdot \beta = M \quad (2)$$

Машина Атвуда (мал. 1) має вертикальну шкалу з поділками. На верхньому кінці шкали розміщений легкий блок B , який обертається з невеликим тертям, яке враховується в роботі. Через блок перекинута легка нитка з вантажами C_1 і C_2 однакової маси. Якщо на вантаж C_1 покласти додатковий вантаж, масою m і відпустити вантаж C_2 , що розміщений зліва, то вся система почне рухатися рівноприскорено.



Мал. 1

У початковому положенні нижній край вантажу C_1 повинен знаходитись проти вибраної позначки шкали. Вважаючи, нитку нерозтяжною і невагомою, складемо рівняння руху всіх тіл системи (розглядаємо тіло з додатковим вантажем як одне ціле):

$$\begin{aligned} T_2 - m_0 \cdot g &= m_0 \cdot a \\ (m + m_0) \cdot g - T_1 &= (m + m_0) \cdot a \\ T_1 \cdot R - T_2 \cdot R - M_{\text{тр}} &= I \cdot \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

де a - прискорення вантажів; T_1, T_2 - натяг лівої та правої частин нитки; R – радіус блока; $M_{\text{тр}}$ – момент тертя осі блока, $M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot r$; r – радіус осі; I – момент інерції блока (відносно його осі); ε – кутове прискорення.

Через те, що $M_{\text{тр}}$ - постійна величина, прискорення системи лінійно залежить від $m \cdot g$. При $a=0$ момент тертя осі блока $M_{\text{тр}}=m \cdot g \cdot R$.

Прискорення знаходимо за формулою шляху рівноприскореного руху без початкової швидкості:

$$a = \frac{2S}{t^2}$$

де S - відстань від початкового положення нижньої частини вантажу C до суцільної платформи; t - час руху за цим шляхом.

Щоб переконатись у справедливості рівнянь рухів, слід визначити a , для двох різних значень S при різних додаткових вантажах.

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

Завдання 1.

1. Встановити платформу G на відстані, не меншій від половини шкали.
2. Розмістити вантажі C_1 і C_2 у початкове положення (вантаж C_1 зліва знаходиться внизу).
3. На правий вантаж C_2 покласти додатковий вантаж E .
4. Відпустити вантаж C_1 і виміряти час руху C_2 вантажа до низу.
5. Покази секундоміра та пройдений вантажем C_2 шлях записати в табл.1.
6. Повторіть вимірювання для одного додаткового вантажу 3 рази.
7. Повторіть вимірювання не менше п'яти разів для інших додаткових вантажів.

Таблиця 1

№ П/П	$S, м$	$\Delta S, м$	$m, кг$	$\Delta m, кг$	$a, м/с^2$	$\Delta a, м/с^2$	$E, \%$
I							
...							
10							

Завдання 2

Якщо перекидати додаткові вантажі з вантажу C_1 на вантаж C_2 маса всієї системи не зміниться, але результуюча сила, що надає системі

прискорення, буде змінюватись, а разом з нею прискорення системи, Якщо додаткові вантажі з масами m_1 і m_2 покласти відповідно на вантажі C_1 та C_2 то сила, яка надає системі прискорення, буде

$$F_1 = (m_2 - m_1)g$$

Якщо ж обидва додаткових вантажі помістити на один вантаж C , то системі буде надавати прискорення сила

$$F_2 = (m_2 + m_1)g$$

Під дією цих сил система буде рухатись у першому випадку з прискоренням a_1 , у другому - з прискоренням a_2 . Для цих випадків відповідно рівняння другого закону Ньютона:

$$F_1 = ma_1; F_2 = ma_2 \quad (8)$$

де m - маса всієї системи. З рівнянь (8) виходить:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2} \quad (9)$$

Відношення прискорень може бути визначене з рівняння шляху рівноприскореного руху:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2} \quad (10)$$

Підставивши в рівняння (9) значення — (10) і значення сил F_1 і F_2 , одержимо

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} = \frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2} \quad (11)$$

Цей вираз і підлягає перевірці

1. При вимірюваннях на вантаж C_1 покладіть додатковий вантаж m_1 , а на вантаж C_2 - додатковий вантаж m_2 і знайдіть 3 рази S_1 і t_1 .
2. Перекладіть додатковий вантаж m_2 на вантаж C_1 і повторіть вимірювання.
3. Безпосередньою підстановкою вимірених величин перевірити правильність співвідношення (11).
4. Дані вимірювань занесіть у табл.2.

Таблиця 2

№ п/п	$m_1,$ 10^{-3}кг	$\Delta m_1,$ 10^{-3}кг	$m_2,$ 10^{-3}кг	$\Delta m_2,$ 10^{-3}кг	$S_1,$ м	$\Delta S_1,$ м	$S_2,$ м	$\Delta S_2,$ м	$t_1,$ с	$\Delta t_1,$ с	$t_2,$ с	$\Delta t_2,$ с
1												
2												
3												

5. За значеннями S і t , скориставшись формулою (7), порахуйте середнє значення прискорень для кожного додаткового вантажу m .
6. Визначити середню абсолютну та відносну похибки для прискорення a за формулами:

$$E = \left(\frac{\Delta S}{S} + 2 \frac{\Delta t}{t} \right) 100\% ; \Delta a = E \cdot a_{\text{ср}} / 100\%$$

Побудуйте графік залежності прискорення a від величини F , одержавши середні значення прискорення для кожного додаткового вантажу.

Примітка: Відрізок на осі абсцис від початку координат, що відсікається графіком $a(mg)$, показує значення $M_{тр}$ і $F_{тр}$ за яким визначають $M_{тр}$ і силу тертя, вважаючи її прикладеною до поверхні осі (радіус осі вказано на установці).

7. Результати експерименту виразити у висновку.

Питання для самоаналізу

1. Сформулюйте закони Ньютона.
2. Дайте поняття про інерційні та неінерційні системи відліку.
3. Сформулюйте і запишіть закон Ньютона для поступового та обертового рухів.
4. Чому відрізок осі абсцис, що відсікається графіком $a(tg)$ дорівнює $M_{тр}/R$?
5. Виведіть розрахункову формулу для другого завдання.

6.3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Тема: Вивчення законів обертового руху,

Мета роботи: Дослідити закони обертового руху з допомогою маятника Обербека.

Прилади і матеріали: прилад, який складається з шківів, чотирьох стержнів та чотирьох циліндричних вантажів, маятник Обербека, вантаж, штангельциркуль, масштабна лінійка, секундомір.

Основні теоретичні відомості

Кутова швидкість обертання змінюється у тому випадку, якщо на матеріальну точку або тіло діє **момент сили** \vec{M} , який визначається за формулою

$$M = f \cdot d = f \cdot r \cdot \cos\alpha, \text{ де} \quad (1)$$

\vec{f} – вектор сили, який діє на матеріальну точку масою m , що обертається за колом радіуса r . Величина перпендикуляра d , опущеного з точки O центру обертання на напрям сили \vec{f} , називається **плечем сили**.

Напрямок \vec{M} можна визначити за правилом буравчика: *якщо буравчик розташувати в точці O перпендикулярно до площини обертання і обертати його рукоятку у напрямі \vec{f} , то поступальний рух буравчика покаже напрям вектора моменту сили розташованого вдовж осі обертання.*

Тангенціальна складова надає матеріальній точці A тангенціальне прискорення \vec{a}_τ . Ці величини задовольняють другому закону Ньютона:

$$m \cdot a_\tau = f_\tau; \quad m \cdot a_\tau = f \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

Замінивши у (2) a_τ на кутове ε прискорення $a_\tau = \varepsilon \cdot r$, одержимо

$$m \cdot r \cdot \varepsilon = f \cdot \cos\alpha \quad (3)$$

або

$$m \cdot r^2 \cdot \varepsilon = f \cdot r \cdot \cos\alpha \quad (4)$$

Величина, що дорівнює добутку маси точки m на квадрат радіуса обертання, називається моментом інерції точки відносно центру обертання

$$J = m \cdot r^2 \quad (5)$$

Враховуючи формули (1), (4), (5), одержуємо

$$M = J \cdot \varepsilon \quad (6)$$

Ця формула являє собою основний закон динаміки обертового руху.

Вона справедлива і для твердого тіла, а не тільки для матеріальних точок. Але у випадку твердого тіла у формулі (6) вона буде моментом інерції тіла відносно осі обертання, а M - результуючим моментом усіх зовнішніх сил, що діють на нього.

Для знаходження моменту інерції тіла останнє розбивається на частини, які можна вважати матеріальними точками.

Тоді момент інерції твердого тіла можна обчислити, за формулою

$$J = \sum_{i=1}^N \Delta m_i r_i^2 \quad , \text{ де} \quad (7)$$

Δm_i – маса i -елементарної ділянки тіла.

Кінетичну енергію тіла, що обертається, можна представити як суму кінетичних енергій його елементарних ділянок:

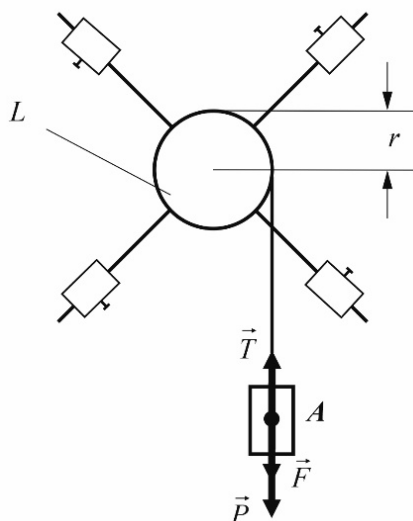
$$W_{об} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i v_i^2}{2} \quad (8)$$

Використовуючи у цій формулі зв'язок між лінійною та кутовою швидкістю

$v_i = \omega \cdot r_i$ одержуємо

$$W_{об} = \frac{\omega^2}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta m_i r_i^2 = \frac{J \omega^2}{2} \quad (9)$$

Закони обертового руху можна вивчати за допомогою хрестоподібного маятника Обербека, зображеного на мал.1.



Мал. 1

Прилад складається із шківу L радіуса r , закріпленого на осі O , чотирьох стержнів, розташованих під кутом 90° один до одного і чотирьох однакових циліндричних вантажів, які можна перемішувати вздовж стержнів та закріплювати їх на визначеній відстані R від осі.

Вантажі закріплюють симетрично так, щоб центр ваги системи збігався з віссю обертання. Прилад приводиться в обертовий рух вантажем A прикріпленим до кінця шнура, навитого на шків.

Вантаж A масою m , що утримується на висоті h , над якою-небудь поверхнею, наприклад, над підлогою, має потенціальну енергію mgh . Якщо дати можливість вантажу падати, це падіння буде відбуватися з прискоренням a . При цьому шків буде обертатися з кутовим прискоренням ε .

При паданні вантажу A його потенціальна енергія переходить в кінетичну енергію поступального руху вантажу $\frac{mV^2}{2}$ і кінетичну енергію обертового руху маятника $\frac{J\omega^2}{2}$. На основі закону збереження енергії одержимо:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (10)$$

де V – швидкість вантажу у найнижчій точці падіння; ω – кутова швидкість маятника у цей момент часу.

Як видно з мал.1, результуюча сила F , під дією якої вантаж A падав донизу, дорівнює $F = P - T$.

За другим законом Ньютона

$$P - T = m \cdot a, \quad (11)$$

де P – сила тяжіння; T – сила натягу шнура.

З (11) знаходимо силу натягу T , яка створює обертовий момент, що діє на шків:

$$T = P - m \cdot a = m \cdot (g - a) \quad (12)$$

Тоді момент сили

$$M = T \cdot r = m \cdot (g - a) \cdot r \quad (13)$$

Через те, що вантаж P_1 падав рівноприскорено без початкової швидкості, то

$$h = a \cdot t^2 / 2 \quad (14)$$

З (14) визначаємо a і підставляємо його у (13). Тоді момент сили набере наступного значення:

$$M = m \cdot \left(g - \frac{2h}{t^2} \right) \cdot r \quad (15)$$

Враховуючи формулу (14) одержимо наступний вираз для кутового прискорення:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2h}{t^2 \cdot r} \quad (16)$$

Підставляючи формули (15) та (16) у рівняння (6), одержимо наступне співвідношення:

$$m \cdot \left(g - \frac{2h}{t^2} \right) \cdot r = J \cdot \frac{2h}{t^2 \cdot r} \quad (17)$$

З рівняння (17) знаходимо формулу для обчислення моменту інерції маятника Обербека:

$$J = \frac{m \cdot r^2 \cdot t^2 \cdot \left(g - \frac{2h}{t^2}\right)}{2h} \quad (18)$$

Рівняння (18) є робочою формулою експерименту, що проводиться.

З формули (18) виходить, що для визначення моменту інерції потрібно розрахувати дослідним шляхом усі величини, які стоять у правій частині формули.

Прискорення вільного падіння будемо вважати заданим і рівним $9,8 \text{ м/с}^2$. Похибкою у визначенні g в даному досліді можна знехтувати.

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

Завдання 1. Визначення моменту інерції

1. Циліндричні рухомі вантажі закріпити на стержнях, якомога ближче до осі обертання, але так, щоб хрестовина була у байдужій рівновазі.
2. Знайти за допомогою штангенциркуля радіус r ($r = d / 2$) шківу.
3. Записати у таблицю масу m вантажу A , який закріплений на одному з кінців нитки, а інший кінець нитки закріплений на шківу.
4. Намотати на шків нитку так, щоб вантаж A знаходився у верхній частині маятника Обербека.
5. Визначити висоту h підняття вантажу.
6. Визначити секундоміром час t падіння вантажу A .
Секундомір вмикати в момент початку падіння вантажу і зупинити в момент, коли вантаж досягне нижньої точки.
7. Пункти 4-6 повторити 3 рази.
8. Результати вимірювань (**в одиницях СИ**) та обчислень записати в таблицю 1.

Циліндричні вантажі розміщені біля осі обертання. Таблиця 1.

№ п/п	$m, \text{ кг}$	$\Delta m, \text{ кг}$	$h, \text{ м}$	$\Delta h, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$\Delta t, \text{ с}$	$J, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta J, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
1	x	x		x		x		x
2	x	x		x		x		x
3	x	x		x		x		x
середнє значення								

9. Циліндричні рухомі вантажі закріпити на кінцях стержнів так, щоб хрестовина була у байдужому положенні.
10. Пункти 4-6 повторити 3 рази.
11. Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю 2.

Циліндричні вантажі розміщені на кінцях стержнів.

Таблиця 2

№ п/п	$m, \text{кг}$	$\Delta m, \text{кг}$	$h, \text{м}$	$\Delta h, \text{м}$	$t, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
1	х	х		х		х		х
2	х	х		х		х		х
3	х	х		х		х		х
середнє значення								

12. За формулою (19) і (20) обчислити відносну похибку E та абсолютну похибку ΔJ експерименту.

$$E = \frac{\Delta J_{\text{ср}}}{J_{\text{ср}}} \cdot 100\% = \left(\frac{\Delta m}{m} + 2 \cdot \frac{\Delta r}{r} + 2 \cdot \frac{\Delta t}{t} + \frac{2t \cdot \Delta h + 4h \cdot \Delta t}{t^3 \cdot \left(g - \frac{2h}{t^2}\right)} + \frac{\Delta h}{h} \right) \cdot 100\% \quad (19)$$

$$\Delta J = E \cdot J / 100\% \quad (20)$$

13. Результати експерименту виразити у висновку.

Завдання 2. Дослідження законів обертового руху

1. Розташувати циліндричні вантажі на довільній відстані l симетрично до осі обертання шківів, але так, щоб хрестовина була у байдужій рівновазі.
2. Намотати на шків нитку так, щоб вантаж масою m знаходився у верхній частині маятника Обербека.
3. Визначити висоту h підняття вантажу.
4. Визначити секундоміром час t падіння вантажу масою m . Секундомір вмикати в момент початку падіння вантажу і зупинити в момент, коли вантаж досягне нижньої точки.
5. Пункти 2-4 повторити 3 рази.
6. Значення величин радіуса r шківів та масу m вантажу A взяти з попереднього експерименту.
7. За формулами (15), (16) і (18) обчислити обертовий момент M , який діє на систему, її кутове прискорення ε та момент інерції J .
8. Результати вимірювань (**в одиницях СИ**) та обчислень записати в таблицю 3.
9. За допомогою результатів експерименту перевірити справедливість **основного закону динаміки обертового руху**.

Дослідження основного закону обертового руху Таблиця 3

№ п/п	$h, \text{м}$	$\Delta h, \text{м}$	$t, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$\varepsilon, 1/\text{с}^2$	$\Delta \varepsilon, 1/\text{с}^2$	$M, \text{Нм}$	$\Delta M, \text{Нм}$	$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
1										
2										
3										
середнє значення										

10. Результати перевірки виразити у висновку.

Питання для самоаналізу

1. Дати визначення моменту сили?- Як визначити його напрям?
2. Що називається кутовою швидкістю? Як визначається її напрям?
3. Що називається кутовим прискоренням? Як визначається його напрям?
4. Дати визначення моменту інерції точки та тіла?
5. Сформулювати основний закон динаміки обертового руху.
6. Вивести основний закон динаміки обертового руху.
7. Вивести робочу формулу експерименту із закону збереження енергії.
8. Як визначити відносну та абсолютну похибки експерименту.
9. Оцінити вплив кожного вимірювання на точність досліду.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Тема: Визначення моменту інерції махового колеса.

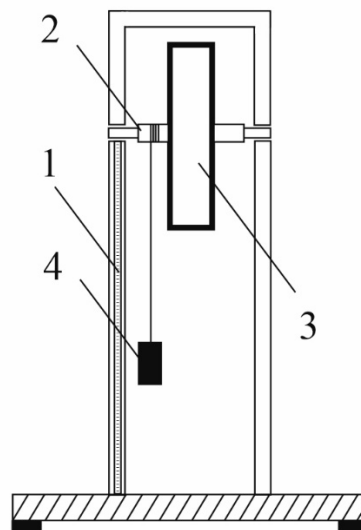
Мета роботи: Навчитись визначати момент інерції тіла експериментальним шляхом, визначити момент інерції махового колеса.

Прилади і матеріали: установка для визначення моменту інерції махового колеса; секундомір; штангенциркуль; додаткові вантажі.

Основні теоретичні відомості

Для тіл правильної геометричної форми момент інерції можна розрахувати теоретично, а для тіл складної форми його звичайно визначають експериментально. У даній роботі використовується один з методів експериментального визначення моменту інерції махового колеса.

Прилад для визначення моменту інерції махового колеса (мал.1) складається з підставки з лінійкою 1 і вал, що обертається, на який насаджені шків 2 та махове колесо 3, момент інерції якого потрібно знайти. До шківів прикріплений шнур з вантажем 4, який приводить до руху вказану систему.



Мал. 1

Вантаж масою m , піднятий на висоту h , має потенціальну енергію mgh . Піднятий та відпущений вантаж буде опускатися, приводячи махове колесо до рівноприскореного обертового руху. При падінні вантажу його потенційна енергія mgh зменшується, перетворюючись у кінетичну енергію $\frac{mV^2}{2}$ поступального руху вантажу, кінетичну енергію обертового руху $\frac{J\omega^2}{2}$ махового колеса та в роботу по подоланню сили тертя $f \cdot h$.

При досягненні вантажем найнижчого положення, згідно із законом збереження енергії, одержимо наступне рівняння:

$$mgh_1 = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + fh_1 \quad (1)$$

Вантаж, піднятий на висоту h_1 і вільно падає, в найбільш низькому положенні має максимальну кінетичну енергію і не зупиняється, а знову піднімається на деяку висоту h_2 . У цьому положенні він буде мати потенційну енергію mgh_2 . Зменшення потенційної енергії при піднятті вантажу на висоту h_2 дорівнює роботі по подоланню сили тертя на шляху $h_1 + h_2$, тобто

$$mgh_1 - mgh_2 = f \cdot (h_1 + h_2)$$

Звідси сила тертя

$$f = mg \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \quad (2)$$

Лінійну швидкість руху точок на поверхні можна виразити через висоту підняття вантажу h_1 і час опускання вантажу t з цієї висоти. Через те що рух рівноприскорений, $V=at$ і $h_1 = at^2/2$, тоді

$$V = 2h_1/t \quad (3)$$

Кутова швидкість шківів, а значить, і махового колеса $\omega = V/r$, де r - радіус шківів. Оскільки лінійна швидкість точок шківів дорівнює швидкості поступального руху вантажу, то

$$\omega = 2h_1/rt \quad (4)$$

Підставивши (2), (3) і (4) у (1), після перетворень одержимо остаточний вираз для моменту інерції махового колеса:

$$J = mr^2 \left(gt^2 \cdot \frac{h_2}{h_1 \cdot (h_1 + h_2)} - 1 \right) \quad (5)$$

Вимірювання зводяться до знаходження r , h_1 , h_2 , t . Якщо не враховувати похибки, обумовленої тертям, і прийняти, що $h_1 = h_2$, то вираз (5) буде спрощено:

$$J = mr^2 \left(\frac{gt^2}{h_1 + h_2} - 1 \right) \quad (6)$$

Середнє значення моменту інерції махового колеса знаходимо за формулою

$$J_{\text{ср}} = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{3} \quad (7)$$

Істинне значення моменту інерції махового колеса записуємо у вигляді

$$J = J_{\text{ср}} \pm \Delta J_{\text{ср}} \quad (8)$$

Середню абсолютну похибку експерименту при знаходженні моменту інерції

махового колеса знаходимо з формули:

$$\Delta J_{cp} = \frac{|\Delta J_1| + |\Delta J_2| + |\Delta J_3|}{3}, \text{ де} \quad (9)$$

$$\Delta J_1 = J_1 - J_{cp}; \quad \Delta J_2 = J_2 - J_{cp}; \quad \Delta J_3 = J_3 - J_{cp}$$

Відносну похибку вимірювань знаходимо за формулою

$$\Delta J_{cp} = E \cdot J_{cp} / 100\% \quad (10)$$

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

1. Знайти за допомогою штангенциркуля радіус шківу r ($r = d / 2$).
2. Записати у таблицю масу m вантажу, який закріплений на одному з кінців нитки, а інший кінець нитки закріплений на шківу.
3. Визначити, проти якої позначки шкали знаходиться основа вантажу в самому низькому положенні.
4. Намотати на шків нитку так, щоб вантаж масою m знаходився у верхній частині пристрою.
5. Визначити висоту h_1 на яку встановили вантаж.
6. Визначити секундоміром час t падіння вантажу.
Секундомір вмикати в момент початку падіння вантажу і зупинити в момент, коли вантаж досягне своє нижнє положення.
7. Продовжувати спостереження за підняттям вантажу та встановити найвище положення на яку піддалась основа вантажу.
8. Визначити, проти якої позначки шкали знаходиться основа вантажу в піднятому положенні.
9. Визначити висоту h_2 на яку піднявся вантаж.
10. Пункти 3-8 повторити 3 рази.
11. Визначити за формулою (5) моменті інерції махового колеса для кожного експерименту і знайти середнє значення.
12. Обчислити середню абсолютну похибку для моменту інерції махового колеса і записати істиннє значення його моменту інерції.
13. Результати вимірювань записати (*в одиницях СИ*) у таблицю 1.

Таблиця 1.

№ п/п	m, кг	Δm, кг	r, м	Δr, м	t, с	Δt, с	h ₁ , м	Δh ₁ , м	h ₂ , м	Δh ₂ , м
1										
2										
3										
Середнє значення										

14. Результати обчислень моменту інерції махового колеса виразити у висновках.

Питання для самоаналізу

1. Який закон покладений в основу розрахункової формули для моменту інерції?
2. Сформулювати закон збереженню енергії стосовно умов даної роботи.
3. Вивести основний закон для обертового руху.
4. Що називається моментом інерції?
5. В яких одиницях вимірюється момент інерції?
6. Від чого залежить момент інерції тіла?
7. Яку роль він відіграє момент інерції тіла в його обертовому русі?
8. В чому труднощі теоретичного розрахунку моменту інерції тіл складної геометричної форми?
9. Який буде характер руху махового колеса при відсутності тертя?

6.5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Тема: Визначення середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул повітря

Мета роботи: Освоїти метод непрямого вимірювання при визначенні середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметру молекул повітря.

Прилади і матеріали: установка, змонтована на штативі; секундомір; склянка з поділками; вага; термометр; барометр.

Основні теоретичні відомості

Молекулярно-кінетична теорія дозволила одержати формули, які зв'язують макроскопічні параметри газу (*тиск, об'єм, температуру*) з його мікроскопічними параметрами (*розмірами і масою молекул, їх швидкістю, середньою довжиною вільного пробігу*). Користуючись цими формулами, можна на основі вимірних макропараметрів газу знайти його мікроскопічні параметри. Для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул газу, λ , використовують формулу, яка виражає залежність коефіцієнта внутрішнього тертя (*в'язкості*) η від $\bar{\lambda}$ і \bar{u} :

$$\eta = 0.5 \cdot \rho \cdot \bar{\lambda} \cdot \bar{u}, \quad (1)$$

де ρ – густина газу; \bar{u} – середня арифметична швидкість молекул газу.

Підставляючи в формулу (1) значення ρ і \bar{u} із формул $PV = \frac{m}{\mu} RT$ – рівняння Менделєєва – Клапейрона або $P\mu = \rho RT$; $\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ – середня арифметична швидкість, одержують

$$\eta = 0.5 \cdot \frac{\mu P}{RT} \cdot \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (2)$$

В даній роботі використано залежність коефіцієнта в'язкості η від

параметрів трубки l (мал. 1), через яку проходить газ, і різниці тисків Δp , яка виникає на кінцях трубки. Ця залежність виражається формулою Пуазойля:

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8vl} \cdot \Delta p \cdot \tau, \text{ де} \quad (3)$$

V – об'єм газу, у даному випадку повітря, яке проходить через трубку довжиною l і радіусом r ; за час τ ; Δp – різниця тисків на кінцях трубки C .

Із формул (2) і (3) середня довжина вільного пробігу молекул повітря дорівнює:

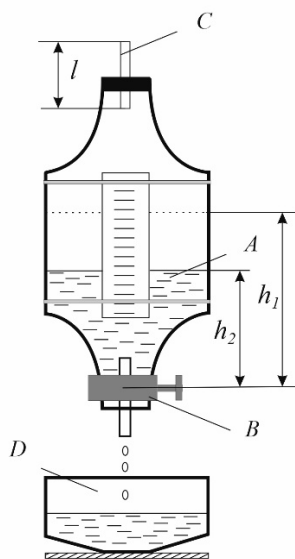
$$\bar{\lambda} = \frac{\pi r^4}{8lp} \cdot \frac{\Delta p \tau}{V} \cdot \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}} \quad (4)$$

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

1. Наповнити скляну трубку A на три чверті водою і відмітити рівень води.
2. Відкрити кран B і, дочекавшись, коли вода почне витікати з трубки краплями у посудину D , ввімкнути секундомір.
3. Коли в склянці буде приблизно 50...60 см³ води, закрити кран B і одночасно зупинити секундомір.
4. Наповнити скляну трубку A новим рівнем води.
5. За поділками на склянці визначте об'єм води, який одночасно буде і об'ємом повітря, яке ввійшло в скляну трубку A через капіляр C .
6. За формулою (4) обчислити середню довжину $\bar{\lambda}$ вільного пробігу молекул повітря.
7. Різницю тисків ΔP обчислити за формулою:

$$\Delta P = \rho_0 \cdot g \cdot \frac{h_1 + h_2}{2}, \text{ де} \quad (5)$$

ρ_0 – густина води при температурі експерименту ($\rho_0 = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$); $\frac{h_1 + h_2}{2}$ – висота стовпа води в трубці A ; $\mu_{\text{повітря}} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$.



Мал. 1.

8. Ефективний діаметр молекули повітря визначити за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{TP_0}{1.4\pi n_0 PT_0 \bar{\lambda}}}, \text{ де} \quad (6)$$

T і p – відповідно температура і тиск, при яких протікає експеримент (взяти із показів термометра і барометра, які знаходяться в лабораторії); p_0 і T_0 – відповідно тиск і температура при нормальних умовах; n_0 – число Лошмідта ($n_0 = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$); $\bar{\lambda}_0$ - середня величина із трьох значень, обчислених за формулою (4).

9. Результати вимірювань і обчислень занести в таблицю 1.

Таблиця 1 .

№ п/п	τ , с	$\Delta\tau$, с	h_1 , м	Δh_1 , м	h_2 , м	Δh_2 , м	ΔP , Па	V , м ³	$\bar{\lambda}$, м	$\Delta\bar{\lambda}$, м	d , м	E , %
1												
2												
3												
середнє значення												

10. Зробити висновки з проведеного експерименту.

Питання для самоаналізу

1. Що таке середня довжина вільного пробігу молекул?
2. Вивести формулу для довжини вільного пробігу молекул.
3. Сформулювати основні положення молекулярно-кінетичної теорії газів.
4. Вивести основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів.
5. Які явища відносяться до явищ перенесення?
6. Вивести рівняння для дифузії, теплопровідності, в'язкості.

6.6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Тема: Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом падаючої кульки (методом Стокса).

Мета роботи: Навчитись визначати коефіцієнт внутрішнього тертя рідини методом падаючої кульки.

Прилади і матеріали: скляний циліндр на підставці; секундомір; пінцет; кульки різного діаметру та виготовлені з різного матеріалу.

Основні теоретичні відомості

Коефіцієнт в'язкості може бути визначений методом падаючої кульки у в'язкому середовищі (метод Стокса). Розглянемо вільне падіння тіла (кульки) у в'язкій нерухомій рідині. На кульку, яка вільно падає в такій рідині, діють:

Сила тяжіння

$$P = mg = \frac{3}{4}\pi r^3 \rho_2 g, \text{ де} \quad (1)$$

r – радіус кульки; ρ_2 – густина кульки; g – прискорення вільного падіння.

Сила виштовхування (згідно із законом Архімеда)

$$F_1 = \frac{3}{4}\pi r^3 \rho_1 g, \text{ де } \rho_1 \text{ – густина рідини.} \quad (2)$$

Сила Стокса (сила опору рухові кульки, що обумовлена силами внутрішнього тертя між шарами рідини)

$$F = 6\pi\eta rV, \text{ де} \quad (3)$$

η – коефіцієнт в'язкості рідини; V – швидкість шару рідини.

Підкреслимо, що в даному випадку мають справу не з тертям між кулькою і рідиною, а з тертям сусідніх шарів рідини між собою, через те, що при зіткненні твердого тіла з рідиною до поверхні тіла одразу прилипають молекули рідини. Тіло покривається шарами рідини і зв'язано з ними міжмолекулярними силами. Шар безпосередньо прилеглий до тіла, рухається разом з тілом із швидкістю руху тіла

Цей шар захоплює при русі сусідні шари рідини, які деякий час здійснюють спокійний безвихровий рух, якщо кульки невеликі. Напрями цих сил показані на мал. 1.

Результуюча сила R всіх сил, які діють на кульку $R = P - (F_1 + F)$. В початковий момент часу швидкість руху кульки буде зростати, що спричинить також зростання сили тертя між шарами рідини. Коли сила тяжіння P буде зрівноважена сумою сил F_1 і F , то результуюча сила буде дорівнювати нулю

$$P = (F_1 + F) \quad (4)$$

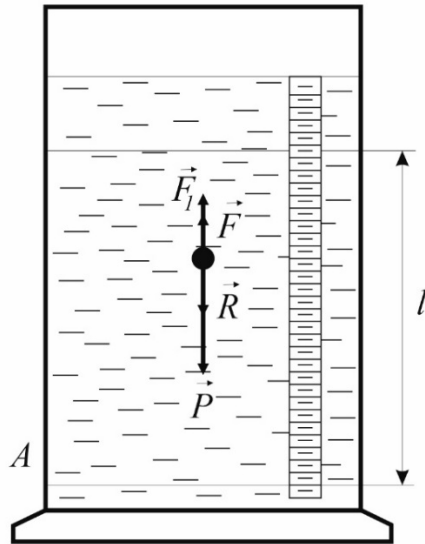
З цього моменту рух кульки стає рівномірним з деякою сталою швидкістю $V = V_0$.

Підставляючи в (4) відповідні значення P , F_1 і F одержимо для формулу для визначення коефіцієнта в'язкості рідини

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot \frac{gr^2}{V_0} \quad (5)$$

Експериментальна установка складається з скляного циліндра A наповненого досліджуваною рідиною мал. 1.

На циліндрі зроблені дві горизонтальні позначки, які розміщені одна від одної на віддалі l (верхня позначка повинна бути нижче рівня рідини на 5–6 см).



Мал. 1

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

1. Виміряти діаметри кульок за допомогою мікрометра.
 2. Опускати кульки (по одній) в рідину необхідно як можна ближче до осі скляного циліндра. (Око спостерігача повинно знаходитись проти верхньої позначки так, щоб вона зливалася в одну пряму).
 3. Ввімкнути секундомір коли кульки будуть проходити верхню позначку скляного циліндра.
 4. Вимкнути секундомір у момент проходження кульками нижньої позначки.
 5. Знайти час t за який кульки проходять шлях l .
- Через те, що швидкості руху кульок досить значні, перш ніж робити експеримент корисно провести пробні вимірювання часу t руху відомих за розміром інших кульок.
6. За допомогою масштабної лінійки знайти відстань l , між позначками.
 7. Одержані результати експерименту та розрахунків занести у таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	$r, м$	$\Delta r, м$	$t, с$	$\Delta t, с$	$l, м$	$\Delta l, м$	$V_0, м/с$	$\Delta V_0, м/с$	$\eta, Па\cdot с$	$\Delta \eta, Па\cdot с$	$E, \%$
1											
2											
.....											
7											
середнє значення											

8. Експеримент повторити 3-7 разів.
9. Знайти абсолютну та відносну похибки експерименту, як для прямих вимірювань фізичних величин.
10. Результати експерименту виразити у висновку.

Питання для самоаналізу

1. Що таке в'язкість? Одиниці коефіцієнта в'язкості.
2. Які сили діють на кульку, яка падає в рідині?
3. Чому з деякого моменту кулька рухається рівномірно?
4. За яких умов опір рухові змінюється пропорційно швидкості?
5. Як змінюється швидкість руху кульки із збільшенням її діаметра?
6. Чому циліндр з досліджуваною рідиною беруть більшого діаметра і ставлять його вертикально, а кульки підбирають малого діаметра?
7. Для чого на циліндр наносять кільцеві відзначки?
8. Як пояснити зміну в'язкості із зміною температури?
9. Чому внутрішнє тертя або в'язкість відносяться до явищ перенесення?
10. Який зв'язок між динамічною і кінематичною в'язкістю?

6.7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

Тема: Визначення питомої теплоємності рідин.

Мета роботи: Навчитись визначати питому теплоємність рідин методом порівняння температур при однаковій потужності нагрівачів, що нагрівають рідину з відомою теплоємністю та рідину з невідомою теплоємністю.

Прилади і матеріали: Установка для визначення теплоємності рідин, джерело живлення, нагрівачі, два калориметри, амперметр, термометри.

Основні теоретичні відомості

Установка для визначення теплоємності рідин, мал. 1, складається з двох калориметрів A і B , в яких поміщені спіралі з однаковими опорами R , Спіралі з'єднані послідовно. Кількість теплоти, відданої кожною спіраллю при проходженні струму I за час t згідно із законом Джоуля - Ленца, дорівнює

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

В калориметрі A знаходиться рідина з відомою питомою теплоємністю c (наприклад вода), а в калориметрі B – досліджувана рідина.

Кількість теплоти, одержаної калориметром A з водою за час τ

$$Q_1 = (c m + c_1 m_1) \cdot (\theta_1 - t_1), \quad (2)$$

де c і m – відповідно питома теплоємність і маса води в калориметрі A ; c_1 і m_1 – питома теплоємність і маса калориметра A ; t_1 і θ_1 – початкова і кінцева температура води.

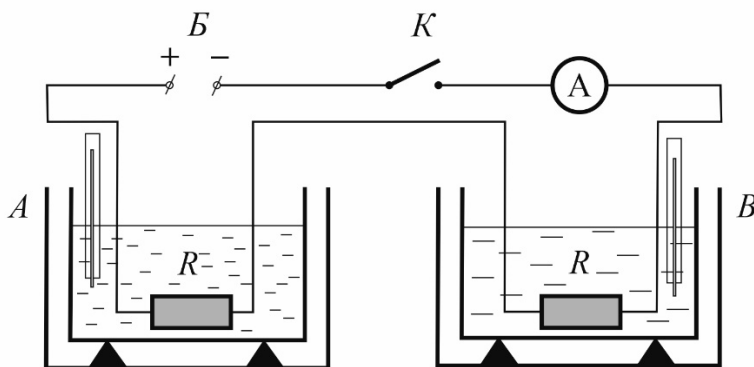
Кількість теплоти, яка виділилась в калориметр B з досліджуваною рідиною рівна,

$$Q_2 = (c_x m_2 + c_3 m_3) - (\theta_2 - t_2) \quad (3)$$

де c_x і m_2 – питома теплоємність і маса досліджуваної рідини; c_3 і m_3 – питома теплоємність і маса калориметра B ; t_2 і θ_2 – початкова і кінцева

температури досліджуваної рідини. Оскільки $Q_1 = Q_2$ то порівнюючи (2) і (3), одержимо

$$c_x = \frac{1}{m_2} \cdot \left((cm + c_1 m_1) \cdot \frac{\theta_1 - t_1}{\theta_2 - t_2} - c_3 m_3 \right) \quad (4)$$



Мал. 1

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

1. Визначити масу m_1 внутрішньої посудини калориметра A .
2. Налити воду у внутрішню посудину калориметра A на $2/3$ її об'єму.
3. Визначити масу води m .
4. Виміряти початкову температуру води t_1 і досліджуваної рідини t_2 .
5. Вимкнути джерело живлення установки, коли температура досліджуваної рідини підвищиться на $3 \div 4$ °С.
6. Неперервно перемішувати рідини відповідними мішалками.
7. Виміряти кінцеву температуру води θ_1 і досліджуваної рідини θ_2 .
8. Одержані результати експерименту та розрахунків занести у таблицю 1.
9. Експеримент повторити 3-7 разів.

Таблиця 1.

№ п/п	m , кг	m_1 , кг	m_2 , кг	m_3 , кг	t_1 , °С	t_2 , °С	θ_1 , °С	θ_2 , °С	c , кДж/кг·К	c_1 , кДж/кг·К	c_2 , кДж/кг·К	c_3 , кДж/кг·К	Δc , кДж/кг·К	E , %
1														
2														
3														
середнє значення														

10. Абсолютну та відносну похибки знайти з відомих формул, як для непрямих вимірювань.

11. Результати експерименту виразити у висновку.

Питання для самоаналізу

1. Що таке калориметр?
2. Сформулювати і записати закон Джоуля – Ленца.
3. Що таке калорія і чому вона чисельно рівна?
4. Записати рівняння теплового балансу для даного експерименту.

6.8. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

Тема: Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом підняття рідин в капілярах.

Мета роботи: Освоїти метод визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин і визначити поверхневий натяг води спостерігаючи за підняттям її в капілярі.

Прилади і матеріали: скляні циліндричні трубки (капіляри) різних радіусів на підставці; склянки, рідинний -U – подібний манометр.

Основні теоретичні відомості

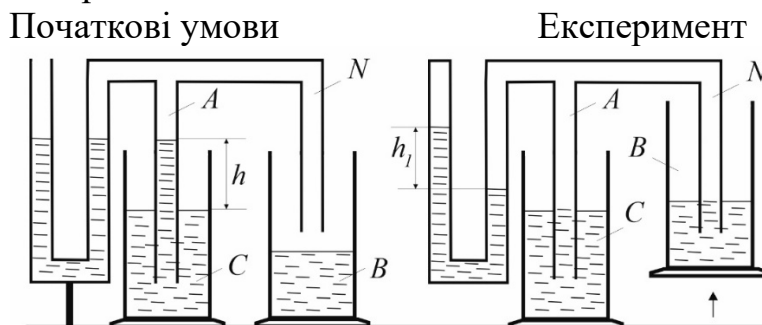
У вузьких трубках (капілярах), опущених в рідину, можна спостерігати підняття чи опускання рідини. Поверхнева плівка рідини в трубці під дією молекулярних сил рідини в трубці та твердої стінки приймає викривлену форму - **меніск**, який одержується вгнутим, якщо рідина змочує стінку (вода - скло), або опуклим, якщо рідина не змочує тверду стінку (ртуть - скло).

Сила поверхневого натягу створює додатковий тиск, обумовлений кривизною поверхні. Цей тиск завжди напрямлений до центру кривизни поверхні. Якщо поверхня сферична, то згідно з рівнянням Лапласа:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}, \quad (1)$$

де σ - коефіцієнт поверхневого натягу; R - радіус кривизни.

Фізична величина σ чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, що діє на одиницю довжини контура поверхневої плівки рідини. Цим додатковим тиском, тобто тиском, обумовленим кривизною меніску, викликані явища підняття, а у випадку рідини, яка не змочує поверхню - опускання, рідини в капілярах. Рідина піднімається чи опускається в капілярах доти, поки додатковий тиск не зрівняється з гідростатичним тиском піднятого чи опущеного стовпа рідини мал. 1.



Мал.1

Якщо вважати, що рідина повністю змочує поверхню трубки, то радіус кривизни меніска R збігається з внутрішнім радіусом трубки r . Із умови рівності додаткового та гідростатичного тиску одержимо

$$\frac{2\sigma}{r} = \rho gh, \text{ де} \quad (2)$$

ρ – густина рідини; g – прискорення сили тяжіння; h – висота підняття рідини.

З формули (2) визначаємо коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

$$\sigma = \frac{rg\rho h}{2} \quad (3)$$

Формула (3) справедлива тільки при умові повного змочування скла рідиною, через що необхідно строго слідкувати за чистотою капілярів.

Капілярні явища слід враховувати в будівельній справі, оскільки більшість будівельних матеріалів - пісок, вапно, бетон, керамічні вироби, пориста глина, не глазурований фарфор - насичені капілярними ходами, по яких у приміщення може проникати волога.

Як видно з (3), для знаходження σ треба знати такі величини: r - (вказується на установці); ρ (беруть із довідкових таблиць); h (вимірюють за допомогою рідинного U -подібного манометра).

Порядок виконання роботи та обробка результатів експерименту

1. Записати радіуси трьох капілярів, які вказані на установці.
2. Під'єднати U - подібний манометр до установки так, щоб його один кінець був з'єднаний з атмосферою.
3. Опустити склянку B так, щоб трубка N з'єднувалась з атмосферою.
4. Знайти висоту h в капілярі A (див. мал.2). В колінах U -подібного манометра рідина стане на одному рівні.
5. Підняти склянку B так, щоб вода в трубці N стиснула повітря всередині системи, а меніск у капілярі A опустився до рівня рідини в посудині C . Одночасно з цієї самої причини рівень у правому коліні манометра буде опускатися, а в лівому підніматися.
6. Знайти висоту h_1 стовпа рідини в колінах U -подібного манометра (див. мал.2).
7. Порівняти знайдені величини h і h_1 . У випадку однакових рідин у капілярі та манометрі ці величини повинні бути однаковими $h = h_1$.
8. Одержані результати експерименту та розрахунків занести у таблицю 1.

Капіляр 1.

Таблиця 1.

№ п/п	$h, м$	$\Delta h, м$	$r, м$	$\Delta r, м$	$\sigma, Н/м$	$\Delta\sigma, Н/м$	$E, \%$
1							
2							
3							
середнє значення							

9. Знайти абсолютну та відносну похибки експерименту, як для прямих вимірювань фізичних величин.
10. Результати експерименту виразити у висновку.

Питання для самоаналізу

1. Будова рідини згідно з молекулярно-кінетичною теорією.
2. Що таке поверхневий натяг?
3. Як направлена сила поверхневого натягу?
4. Що називається коефіцієнтом поверхневого натягу?
5. Пояснити змочуваність та незмочуваність рідини.
6. Що таке крайовий кут?
7. В чому полягають капілярні явища?

VII. Тестові завдання

Механіка

1. Які основні одиниці вимірювань Міжнародної системи одиниць (СІ) використовуються в механіці?

- а) метр, Ньютон, секунда;
- б) метр, кілограм, секунда;
- в) кілограм, секунда, Ньютон;
- г) метр, Ньютон, Джоуль.

2. Матеріальною точкою називається:

- а) тіло, розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати;
- б) тіло, деформацією якого в умовах даної задачі можна знехтувати;
- в) тіло, яке після припинення зовнішньої силової дії повністю відновлює свої первинні розміри і форму;

3. Абсолютно твердим тілом називається:

- а) тіло, розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати;
- б) тіло, деформацією якого в умовах даної задачі можна знехтувати;
- в) тіло, яке після припинення зовнішньої силової дії повністю відновлює свої первинні розміри і форму;
- г) тіло, яке після припинення зовнішньої силової дії набуває масу.

4. Тілом відліку називається:

- а) тіло, розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати;
- б) тіло, відносно якого розглядається рух;
- в) сукупність тіл;
- г) тіло, яке повністю відновлює свої первинні розміри і форму.

5. Системою відліку називається:

- а) тіло, розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати;
- б) тіло, відносно якого розглядається рух;
- в) сукупність тіл, які повністю відновлюють свої первинні розміри і форму;
- г) сукупність тіла відліку, пов'язаної з ним системи координат і годинника, що відлічує час.

6. Якими способами можна задавати координати тіла в просторі?

- а) табличним, графічним та інтегральним способами;
- б) радіус вектором та диференціальним способом;
- в) координатним та натуральним способами, радіус-вектором;
- г) всіма переліченими способами.

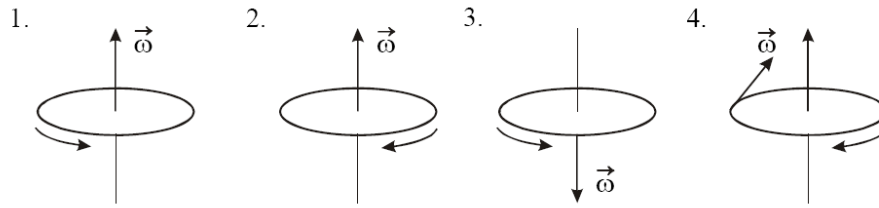
7. Яка з формул є рівнянням рівномірного руху:

- а) $S = v_0 t - \frac{at^2}{2}$; б) $S = v_0 t + \frac{at^2}{2}$; в) $S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$; г) $S = vt$

8. Яка з формул є рівнянням рівноприскореного руху:

- а) $S = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ б) $S = v_0 t + \frac{at^2}{2}$; в) $S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$; г) $S = vt$

9. Матеріальна точка рухається по колу. Вкажіть напрям вектора кутової швидкості.



10. Тангенціальне прискорення характеризує...

- а) зміну положення тіла в просторі;
- б) зміну швидкості за величиною і напрямом;
- в) зміну швидкості за величиною;
- г) зміну швидкості за напрямом.

11. Нормальне прискорення характеризує...

- а) зміну швидкості за величиною;
- б) зміну швидкості за величиною і напрямом;
- в) зміну швидкості за напрямом;
- г) зміну положення тіла в просторі.

12. Вкажіть формулу запису другого закону Ньютона, справедливу лише тоді, коли $m = \text{const}$.

- а) $F = ma$;
- б) $dp/dt = F$
- в) $F dt = m dv + v dt$
- г) $F = m(dv/dt) + v(dm/dt)$

13. Вкажіть формулу запису другого закону Ньютона, справедливу тоді, коли m змінюється.

- а) $F = ma$;
- б) $dp/dt = F$
- в) $F dt = m dv + v dt$
- г) $F = m(dv/dt) + v(dm/dt)$

14. Що таке вага тіла:

- а) маса тіла;
- б) сила, яка тисне на горизонтальну опору;
- в) сила тяжіння;
- г) немає правильної відповіді

15. Імпульсом тіла називається...

- а) добуток маси тіла на його прискорення;
- б) добуток маси тіла на його швидкість;
- в) добуток маси тіла на його об'єм;
- г) добуток сили, що діє на тіло, на час її дії.

16. Вкажіть формулу, яка виражає основний закон динаміки обертового руху в тому випадку, якщо момент інерції системи не змінюється.

- а) $J\mathcal{E} = M$;
- б) $dp/dt = F$
- в) $M_i = F_i d_i$
- г) $L_i = J\omega$

17. Вкажіть правильне формулювання закону збереження імпульсу.

- а) імпульс системи тіл є величина стала.
- б) повний імпульс всіх тіл, що входять в систему, не змінюється в часі.
- в) імпульс системи тіл дорівнює нулю.
- г) сумарний імпульс замкнутої системи матеріальних точок залишається сталим.

18. Вкажіть правильне формулювання закону збереження моменту імпульсу.

- а) момент імпульсу тіла є величиною сталою.
- б) повний момент імпульсу всіх тіл системи не змінюється з часом.
- в) момент імпульсу замкненої системи матеріальних точок залишається сталим:
- г) момент імпульсу всіх тіл системи постійно змінюється.

19. Вкажіть формулювання закону збереження механічної енергії.

- а) енергія системи не виникає і не зникає, вона тільки переходить від одного тіла до іншого.
- б) у неконсервативній системі тіл повна механічна енергія залишається сталою.
- в) повна механічна енергія замкненої системи тіл, між якими діють тільки консервативні сили, залишається сталою.
- г) у замкненої системі енергія всіх тіл не змінюється з часом.

20. Потужність є:

- а) роботою сили на ділянці шляху.
- б) роботою змінної сили за кінцевий проміжок часу.
- в) роботою, що виконано за одиницю часу.
- г) зміною кінетичної енергії тіла з часом.

Молекулярна фізика

1. Найменша частинка, яка є носієм властивостей хімічного елемента, називається ...:

- А) молекулою; Б) протоном; В) атомом; Г) електроном.

2. Якщо атом або молекула втратили один або кілька електронів, вони є:

- А– позитивним іоном. Б– негативним іоном.
В– нейтральним атомом Г– диполем

3. Відносна молекулярна маса показує ...

- А– у скільки разів маса m молекули більша, ніж $1/12$ маси атома Карбону;
- Б– у скільки разів маса m молекули менша, ніж $1/12$ маси атома Оксигену;
- В– у скільки разів маса m молекули більша, ніж $1/12$ маси атома Гідрогену;
- Г– у скільки разів маса m молекули менша, ніж $1/12$ маси атома Карбону.

4. Що визначають формулою $\nu = N/N_A$?

- А– кількість молекул в 1 кг речовини;
- Б– кількість молів частинок речовини;
- В– кількість бімолів частинок речовини;
- Г– кількість молів в одному кілограмові речовини.

5. Фізична модель газу, молекули якого приймають за матеріальні точки, що не взаємодіють одна з одною на відстані та пружно взаємодіють у моменти зіткнення, називають ...

- А– матеріальним газом; Б – рідким газом;
В – ідеальним газом; Г – ідеалістичним газом

6. Яке рівняння описує наступна формула: $p = m_0 n V^2 / 3$

- А– основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу.
Б– основне рівняння молекулярно-теоретичної теорії ідеального газу.
В– основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії кристалічного газу.
Г– основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії реального газу.

7. В яких одиницях вимірюється кількість речовини?

- А– Кг Б– моль В– грам Г– Кг/моль

8. За допомогою рівняння Менделєєва- Клапейрона можна встановити...

- А– динамічну рівновагу
Б– зв'язок між тиском, об'ємом та температурою В– тиск ідеального газу
Г– зв'язок між енергією та температурою

9. Ізобаричний процес відбувається при сталому параметрі...

- А– тиск Б– об'єм В– температура Г– робота

10. Броунівський рух це:

- А – тепловий рух молекул;
Б – взаємодія молекул однієї речовини з молекулами іншої;
В – рух одного тіла відносно іншого;
Г – тепловий рух частинок рідини в газі.

11. Що являє собою наступна формула: $p = 2nEk/3$

- А– формула потужності ідеального газу;
Б– формула основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу
В– формула прискорення молекул;
Г– формула енергії молекул газу.

12. Ізохоричний процес відбувається при сталому параметрі...

- А– тиск Б– об'єм В– температура Г– робота

13. Найменша частинка речовини, яка має хімічні властивості цієї речовини, називається ...

- А– молекулою Б– протонном В– атомом С– електроном

14. Що визначають цією формулою : $M = m_0 \cdot NA$?

- А– масу 1 кг речовини; Б– масу одного моля речовини;
В– масу, яку мають молекули чи атоми у кількості сталої (числа) Авогадро;
С– масу, яку мають молекули чи атоми у кількості $6,02 \cdot 10^{23}$

15. Фізичні величини, які характеризують властивості та поведінку окремих мікрочастинок речовини, називають ...

- А– Макроскопічними параметрами; Б – Мікроскопічними параметрами
В – Основними параметрами; Г– Нормальними параметрами

16. Що являє собою наступна формула: $p=2nEk/3$

Варіанти відповідей:

А– Один із видів формули основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу;

Б– Формула потужності ідеального газу;

В– Формула прискорення молекул;

Г– Формула енергії молекул газу;

17. Температура, за якої зупиняється рух молекул..

А– 0°K

Б– 0°C

В– 273K

Г– 0°F

18. Ізотермічний процес відбувається при сталому параметрі...

А– тиск Б– об'єм В– температура Г– робота

19. Виберіть твердження, що характеризує рух броунівських частинок:

А – в одному напрямі з однаковими за модулем швидкостями;

Б – в одному напрямі з різними за модулем швидкостями;

В – в різних напрямках з однаковими за модулем швидкостями;

Г – в різних напрямках з різними за модулем швидкостями.

20. За нормального атмосферного тиску температура кипіння води за шкалою Кельвіна дорівнює:

А– 100K

Б– 0K

В– 273K

Г– 373K

Термодинаміка

1. Суму кінетичної і потенціальної енергії називають:

А– загальною енергією

Б– механічною енергією

В– повною енергією

Г– внутрішньою енергією

2. Якою буквою позначають кількість теплоти :

А– Q

Б– A

В– E

Г– U

3. Укажіть одиницю вимірювання внутрішньої енергії в системі СІ :

А– Вт

Б– Па

В– Дж

Г– Моль

4. Як зміниться внутрішня енергія при кристалізації

А– зменшиться; Б– збільшиться; В– не зміниться; Г– рівна нулю.

5. Внутрішня енергія ідеального газу залежить від температури.

А– так

Б– ні

В– інколи

Г– правильна відповідь відсутня

6. В яких одиницях вимірюють теплоємність речовини?

А– Дж/кг

Б– Дж/К

В– Дж/моль К

Г– Дж/кгК

7. Укажіть процес, у якому газ не виконує роботу.

А– ізобарний;

Б– ізотермічний;

В– ізохоричний;

Г– адіабатний

8. Внутрішня енергія тіла може змінюватися при:

А– виконанні роботи тілом;

Б– виконанні роботи над тілом;

В– теплопередачі;

Г– при сталій температурі

9. Фізична модель газу, молекули якого приймають за матеріальні точки, що не взаємодіють одна з одною на відстані та пружно взаємодіють у моменти зіткнення, називають ...

А– матеріальним газом;

Б – рідким газом;

В – ідеальним газом;

Г – ідеалістичним газом.

10. Який вид теплопередачі можливий у твердих тілах?

А– теплопровідність;

Б– випромінювання;

В– конвекція;

Г– можливі всі види теплопередачі

11. Який спосіб зміни внутрішньої енергії характеризує кількість теплоти?

А– виконання роботи;

Б– теплопередачу;

В– конвекцію;

Г– виконана робота рівна нулю.

12. Вид теплопередачі, який здійснюється шляхом перенесення теплоти потоками рідини або газу - це...

А– теплопровідність;

Б– конвекція;

В– теплопередача;

Г– випромінювання

13. В яких одиницях вимірюється кількість речовини?

А– Кг

Б– моль

В– грам

Г– Кг/моль

14. Який вид теплопередачі неможливий у твердих тілах?

А– теплопровідність;

Б– випромінювання;

В– конвекція;

Г– можливі всі види теплопередачі

15. Які види теплових машин дозволяють передавати тепло від менш нагрітого тіла до більш нагрітого:

А– парові машини;

Б– вічні двигуни;

В– холодильники;

Г– газові та парові турбіни;

16. За якою формулою можна обчислити кількість теплоти, необхідну для нагрівання тіла масою m ?

А – $Q = c m \Delta T$

Б – $Q = c m \Delta T$

В – $Q = c m$

Г – $Q = \lambda m$

17. Укажіть умову перебігу адіабатного процесу.

А– стала температура;

Б– незмінний об'єм;

В– незмінний тиск;

Г– відсутність теплообміну.

18. Порівняйте внутрішню енергію реального (1) та ідеального (2) газів.

А– (1) завжди менша, ніж (2);

Б– (1) завжди більша, ніж (2)

В– (1) дорівнює (2);

Г– (1) може бути менша, ніж (2), а може бути більша

19. Формула $A = p(V_2 - V_1)$ справедлива для визначення роботи при...

А– ізобаричному розширенні;

Б– ізохоричному процесі;

В– ізотермічному розширенні;

Г– адіабатичному розширенні

20. Для якого процесу перший закон термодинаміки має вигляд $\Delta U = A$?

А– адіабатного

Б– ізобарного

В– ізохорного

Г– ізотермічного

VIII. Рекомендована література

Базова

1. Електричні вимірювання : [підруч. для студентів вищих навч. закл.] / Д. І. Блецкан, А. А. Горват, В. М. Кабацій. – Ужгород. : ВАТ «Видавництво «Закарпаття», 2008. – 400 с.
3. Кучерук, І. М. Загальний курс фізики у трьох томах : Навчальний посібник. Т.2 / І. М. Кучерук ; За ред.Кучерука І.М. – Київ : Техніка, 2001. – 452 с.
4. Горват, А. А. Методика розв'язування задач. Молекулярна фізика і термодинаміка : Навч. посібник. Реком. МОНУ для студ. ВНЗ / А. А. Горват, Ю. М. Височанський. – Ужгород : ІВА, 2006. – 160
5. Садовий, А. І. Основи фізики з задачами і прикладами їх розв'язування : Навчальний посібник / А. І. Садовий, Ю. Г. Лега. – 2-ге перероблене і доповнене. – К. : Кондор, 2010. – 384 с.
1. Богацька І.Г., Головка Д.Б., Маляренко Д.А., Ментковський Ю.Л. Загальні основи фізики. Т. 1. Механіка і молекулярна фізика., Т.2. Електродинаміка і атомна фізика. Київ, “Либідь”, 1995.
2. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. Т.1. Київ: Либідь, 1997.- 287 с.

Допоміжна

1. Король А.М., Андрияшин М.В. Фізика. Київ, Фірма «ІНКОС», 2006.
2. Трофимова Т.И. Физика в таблицах и формулах, 2006.
- Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. - М.: ОНИКС, 1990. – 1056 с.
3. Клюс І.І., Пилипів В.І. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу загальної фізики.– 4.1.– Хмельницький ХТІ,– 1993.
4. Косенко, О. Фізика у вищій школі в умовах нанореволюції / О. Косенко // Вища освіта України. – 2013. – №4. – С.59-64.
5. Берклеевский курс физики: [в 5 т.]. – М.: Наука. 1983–
6. Фейнмановские лекции по физике: [в 9 т.]. - М.: “Мир”, 1967.
7. Дущенко В.П., Кучерук І М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки, молекулярної фізики і термодинаміки. Київ, “Вища школа”, 1993.
8. Гаркуша І. П., Горбачук І. Т., Курінний В.П., Кучерук І. М. Загальний курс фізики: Збірник задач. К.: Техніка, 2004.
9. Чолпан П.П. Основи фізики.- Київ: Вища школа, 1995.- 315 с.

Інформаційні ресурси

1. <http://msu.edu.ua/library/> – бібліотека МДУ
2. <http://moodle.msu.edu.ua> – віртуальне навчальне середовище Moodle

Навчально-методичне видання

ФІЗИКА: ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Механіка. Молекулярна фізика. Термодинаміка Частина 1

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної форми навчання
спеціальностей 131 «Прикладна механіка»,
182 «Технології легкої промисловості»,
014.15 «Середня освіта (Природничі науки)»

Укладач: Кабацій В.М.

Тираж 15 пр.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції ДК № 4916 від 16.06.2015 р.

Редакційно-видавничий відділ МДУ,
89608, м. Мукачево, вул. Ужгородська, 26



МУКАЧІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

89600, м. Мукачево, вул. Ужгородська, 26

тел./факс +380-3131-21109

Веб-сайт університету: www.msu.edu.ua

E-mail: info@msu.edu.ua, pr@mail.msu.edu.ua

Веб-сайт Інституційного репозитарію Наукової бібліотеки МДУ: <http://dspace.msu.edu.ua:8080>

Веб-сайт Наукової бібліотеки МДУ: <http://msu.edu.ua/library/>