

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет
Кафедра фізики

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ**

Механіка. Молекулярна фізика
Для студентів інженерно-технічних спеціальностей
денної форми навчання

2018

Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики. Механіка. Молекулярна фізика. Для студентів інженерно-технічних спеціальностей денної форми навчання / Укладачі: Лоскутов С.В., Єршов А.В., Правда М.І., Манько В.К., Лушчін С.П., Работкіна О.В., Зеленіна О.А., Щегініна М.О.
– Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. - 105 с.

Укладачі: Лоскутов С.В., професор, д-р. фіз.-матем. наук.; Єршов А.В. професор д-р. техн. наук.; Правда М.І., канд. фіз.-матем. наук, доцент; Манько В.К., канд. фіз.-матем. наук, доцент; Лушчін С.П., канд. фіз.-матем. наук, доцент; Работкіна О.В., ст. лаб., Зеленіна О.А., асп.; Щегініна М.О., ст. лаб.

Р е ц е н з е н т Золотаревський І.В., канд. фіз.-матем. наук, доцент.

Затверджено на засіданні кафедри фізики ЗНТУ,
протокол № 2 від 21.11.2014 р.

Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики “Механіка. Молекулярна фізика.” схвалені на засіданні Методичної Ради Електротехнічного факультету ЗНТУ, протокол № 4 від ” 8 ” грудня 2014 р.

Відповідальний за випуск: Єршов А.В., д-р. техн. наук, професор

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Елементи теорії похибок	7
1.1 Основні поняття теорії похибок	7
1.2 Похибки засобів вимірювання	11
1.3 Похибки табличних величин	12
1.4 Правила округлення і виконання наближених обчислень	12
1.5 Похибки прямих вимірювань	14
1.6 Похибки непрямих вимірювань	14
1.7 Графічне відображення експериментальних результатів	16
Контрольні запитання	16
2 Лабораторна робота № 1. Визначення густини тіл	18
2.1 Вступ	18
2.2 Вимірювання і визначення похибок	22
Контрольні запитання	25
3 Лабораторна робота № 2. Визначення модуля Юнга металів	27
3.1 Вступ.....	27
3.2 Опис установки	29
3.3 Порядок виконання роботи	30
Контрольні запитання	32
4 Лабораторна робота № 3. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя методом Стокса	34
4.1 Опис установки	34
4.2 Теорія методу Стокса	34
4.3 Порядок виконання роботи (завдання 1)	35
4.4 Порядок виконання роботи (завдання 2)	37
Контрольні запитання	38
5 Лабораторна робота № 4.1 Пружний удар куль	39
5.1 Коротка теорія пружного удару	39
5.2 Порядок виконання роботи	42
Контрольні запитання	44
6 Лабораторна робота № 4.2. Пружний і непружний удари куль ...	45
6.1 Основні положення	46
6.2 Порядок виконання роботи	49
Контрольні запитання	51
7 . Непружний удар тіл	52
7.1 Лабораторна робота № 4.3.1.....	52

7.1.1 Теорія непружного удару.....	52
7.1.2 Порядок виконання роботи № 4.3.1.....	54
7.2 Лабораторна робота № 4.3.2.....	56
7.2.1 Методика вимірювання.....	56
7.2.2 Порядок виконання роботи № 4.3.2.....	57
Контрольні запитання.....	59
Список літератури.....	59
8 Лабораторна робота № 5. Вивчення основного закону динаміки обертального руху.....	60
8.1 Опис устаткування та методу вимірювання.....	60
8.2 Порядок виконання роботи № 5.1.....	62
8.3 Порядок виконання роботи № 5.2.....	64
8.4 Порядок виконання роботи № 5.3.....	66
8.5 Порядок виконання роботи № 5.4.....	68
8.6 Порядок виконання роботи № 5.5.....	70
8.7 Опис устаткування та методу вимірювання роботи № 5.6.....	73
8.8 Порядок виконання роботи № 5.6.....	74
8.9 Опис устаткування та методу вимірювання роботи № 5.7.....	75
8.10 Порядок виконання роботи № 5.7.....	75
Контрольні запитання.....	78
Рекомендована література.....	78
9 Лабораторна робота № 6. Перевірка теореми Штейнера.....	79
9.1 Опис пристрою та методу вимірювання.....	79
9.2 Порядок виконання роботи.....	81
Контрольні запитання.....	83
Рекомендована література.....	83
10 Лабораторна робота № 7. Визначення величини співвідношення теплоємностей C_p/C_v для газів.....	84
10.1 Опис пристрою та методу вимірювання.....	84
10.2 Порядок виконання роботи.....	87
Контрольні запитання.....	89
11 Лабораторна робота №8. Визначення швидкості та витрати рідини.....	90
11.1 Опис пристрою та методу вимірювання.....	90
11.2 Порядок виконання роботи.....	91
Контрольні запитання.....	91
12 Лабораторна робота №9-К Визначення прискорення сили тяжіння при падінні тіла.....	93

12.1	Опис роботи.....	93
12.2	Порядок виконання роботи	93
	Контрольні запитання	94
13	Лабораторна робота №10-К Вивчення руху тіла, кинутого під кутом до горизонту.....	95
13.1	Опис роботи.....	95
13.2	Порядок виконання роботи	96
	Контрольні запитання	96
14	Лабораторна робота №11-К Вивчення закону збереження імпульсу.....	98
14.1	Опис роботи.....	98
14.2	Порядок виконання роботи	98
	Контрольні запитання	99
15	Лабораторна робота №12-К Вивчення законів руху планет.....	101
15.1	Опис роботи.....	101
15.2	Порядок виконання роботи	101
	Контрольні запитання	102
	Рекомендована література.....	103
	Інструкція з охорони праці № 129 при виконанні робіт в лабораторії кафедри фізики.....	104

ВСТУП

Збірник містить лабораторні роботи для студентів усіх спеціальностей.

Основна спрямованість методичних вказівок з предмету фізика - дати можливість студентам за допомогою досліду вивчити важливі фізичні явища. Опис лабораторних робіт не претендує на те, щоб створити у студентів повне уявлення про явища, які вивчаються. Таке уявлення може виникнути лише внаслідок опрацювання лекцій та підручників.

Велика увага в методичних вказівках з фізики для студентів технічних спеціальностей приділяється обробленню результатів вимірювання. Для успішного виконання робіт необхідна попередня самостійна підготовка, в першу чергу теоретична.

Кожна лабораторна робота розрахована на дві академічні години занять у лабораторії. Перед заняттям студент повинен підготувати

протокол лабораторної роботи, вивчивши відповідний теоретичний матеріал.

Під час заняття студенти проводять необхідні виміри, виконують розрахунки, доводять звіт до висновку. Результати вимірювання обговорюються з викладачем і затверджуються.

Повністю оформлений звіт по лабораторній роботі потрібно подати викладачу до кінця заняття. Він повинен містити: титульний лист, номер лабораторної роботи та її назву, перелік приладів і приладдя, мету роботи, схему установки, розрахункові формули, таблицю результатів вимірів і розрахунки, висновки за результатами роботи. Графіки повинні бути виконані на міліметровому папері.

Якщо студент не встигає захистити лабораторну роботу до кінця заняття, дозволяється оформити звіт (графіки) з використанням комп'ютерних програм (Excel, Origin) до наступного заняття.

Лабораторна робота вважається виконаною після успішно проведеного захисту шляхом співбесіди студента з викладачем (захист звіту + оцінка за теоретичний матеріал).

Захист звіту: мета роботи + експериментальна методика + висновки.

Теоретичний матеріал: знання фізичних явищ, які вивчалися у даній лабораторній роботі (закони, формули).

1 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПОХИБОК

.1 Основні поняття теорії похибок

Числове значення будь-якої фізичної величини знаходять шляхом виміру, або розрахунку. Вимірювання це процес відшукування значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Виміряти безпосередньо якусь фізичну величину це означає порівняти її з деякою іншою однорідною з нею величиною, взятою за одиницю виміру. Отримане число показує, у скільки разів величина, що вимірюється, більше або менше обраної одиниці виміру. Отриманому числу приписується таке ж найменування, як і обраній одиниці.

Прямі виміри здійснюються або шляхом безпосереднього порівняння фізичної величини, що вимірюється, з одиницями міри, як це має місце при вимірах довжини лінійкою, штангенциркулем, мікро-

метром і т.п., або приладами, градуйованими у визначених одиницях, наприклад амперметрами, вольтметрами і т.п.

В багатьох випадках значення фізичної величини визначають за допомогою обчислень, використовуючи при цьому значення безпосередньо вимірених величин. Це трапляється тоді, коли відома функціональна залежність даної величини від безпосередньо вимірених величин. Наприклад, для визначення об'єму циліндра використовують функціональну залежність від діаметра d та висоти h :

$$V = \pi \cdot d^2 \cdot h / 4.$$

При **непрямих вимірах**, величину у знаходять по відомій функціональній залежності $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ від величин x_1, x_2, \dots, x_n , значення котрих знаходять прямими вимірами.

Вимірjene значення фізичної величини завжди відрізняється від істинного тому, що при вимірюваннях завжди виникають похибки. При вимірюваннях необхідно знайти не тільки наближене значення фізичної величини, але й обчислити відхилення цього значення від істинного. Цим питанням займається теорія похибок.

Всі вимірювання можуть бути виконані тільки з визначеним ступенем точності. Похибка вимірювань визначається як відхилення результату виміру від істинного значення величини.

Як показує теорія і практика, до істинного значення вимірюваної величини найближче підходить середнє арифметичне значення багатьох вимірювань. Якщо якусь величину x виміряли n раз і отримали ряд значень $x_1, x_2 \dots x_n$, то найбільш ймовірне значення вимірюваної величини x знаходять як середнє арифметичне результатів окремих вимірів:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.1)$$

Похибки вимірів бувають систематичними, випадковими і промахами.

Систематична похибка – це складова частина похибки виміру, що залишається сталою, або такою, що закономірно змінюється при повторних вимірах однієї та тієї ж величини.

Випадкова похибка – це складова частина похибки вимірювань, що змінюється випадково при повторних вимірах однієї та тієї ж величини.

Промак – це такий результат виміру, значення якого набагато відрізняється від очікуваної похибки в даних умовах. Наприклад, ці похибки можуть бути отримані, якщо прилад несправний або якщо експериментатор неухвально.

Похибки вимірювань бувають абсолютними і відносними. **Абсолютною похибкою** вимірювання називається похибка, виражена в одиницях величини, що вимірюється, вона визначається формулою

$$\Delta x = x - X, \quad (1.2)$$

де x – значення, здобуте при вимірюванні; X – справжнє значення величини, що вимірюється (найбільш ймовірне).

Середня арифметична абсолютна похибка n вимірювань дорівнює

$$\langle \Delta x \rangle = \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| / n. \quad (1.3)$$

Величина $\langle \Delta x \rangle$ визначає інтервал, у межах якого з певною ймовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини. За визначенням

$$x - \Delta x \leq x \leq x + \Delta x, \quad (1.4)$$

де Δx – абсолютна похибка вимірювань x . Чим більша ширина інтервалу $2\Delta x$, тим більшою буде ймовірність того, що точне значення вимірюваної величини належить цьому інтервалу.

Відотною похибкою вимірювання називається відношення абсолютної похибки вимірювання до справжнього значення величини, що вимірюється

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}}, \quad (1.5)$$

як правило, визначається у відсотках

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (1.6)$$

Знайти істинне значення фізичної величини x неможливо. Можна тільки вказати на інтервал (x_{min} , x_{max}), в якому з ймовірністю α знаходиться значення досліджуваної величини.

Приклад: поглядом вимірюють зріст студента в сантиметрах. Ми можемо припустити, що зріст студента може бути визначений між 1,5 м і 2,0 м з ймовірністю 0,9. Тоді ми можемо стверджувати, що

зріст студента може бути визначений між 1,6 м і 1,8 м з меншою ймовірністю 0,6 і так далі. Цей інтервал називають *довірчим інтервалом*. На рис.1.1 зображено довірчий інтервал досліджуваної величини x , де \bar{x} – найбільш ймовірне значення вимірюваної величини; Δx – півширина довірчого інтервалу для заданого α . Тому, істинне значення вимірюваної величини може бути визначене як

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad (1.7)$$

з ймовірністю α , або

$$x - \Delta x \leq x \leq x + \Delta x. \quad (1.8)$$

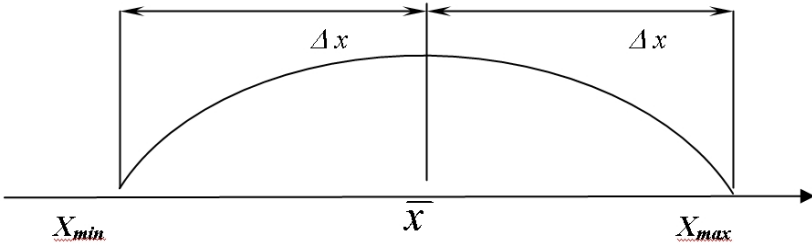


Рисунок 1.1

Ймовірність знаходження істинного значення вимірюваної величини в інтервалі $\pm \Delta x$ залежить від кількості вимірювань n . Якщо $n \rightarrow \infty$, то ймовірність наближається до 1. Якщо ж n дорівнює кільком одиницям, то ймовірність не досягає й 0,6. Тому для малої кількості вимірювань згаданий інтервал розширюють, збільшуючи Δx . Для цього знаходять середньоквадратичну похибку середнього арифметичного

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (1.9)$$

і збільшують її в t раз (t – так званий коефіцієнт Ст'юдента. Цей коефіцієнт було введено в 1908 році англійським математиком та хіміком В.С. Госсетом). Величину

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i, \quad (1.10)$$

називають *випадковим відхиленням*. Середнє квадратичне похибка результату серії вимірювань, викликана випадковими відхиленнями Δx_i , визначається як

$$\Delta x_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (1.11)$$

Таблиця 1.1

n\alpha	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
2	0,73	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3
3	0,62	0,82	1,06	1,4	1,9	2,9
4	0,58	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4
5	0,57	0,74	0,99	1,2	1,5	2,1
6	0,56	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0
7	0,55	0,72	0,91	1,1	1,4	1,9
8	0,55	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9
9	0,54	0,71	0,89	1,1	1,4	1,9
10	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8
20	0,58	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7
∞	0,52	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6

Множимо знайдене значення коефіцієнта Стьюдента t (коефіцієнт Стьюдента, залежить від α і кількості вимірів n) на середню квадратичну похибку середнього значення, знаходимо випадкову похибку $\Delta x_{\text{вип.}}$ результатів прямих вимірювань

$$\Delta x_{\text{вип.}} = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (1.12)$$

1.2 Похибки засобів вимірювання

До засобів вимірювань належать вимірювальні прилади та установки. Кожен прилад дає похибку, так як його неможливо зробити ідеальним. Похибка засобів вимірювання не перевищує деякої величини. Цю величину називають *межею основної допустимої похибки вимірювального приладу* (МОДП). МОДП на засоби вимірювання

встановлюється державними стандартами і визначається у вигляді абсолютних, відносних та приведених похибок.

Абсолютна похибка приладу δ – це є різниця

$$\delta = a - X, \quad (1.13)$$

де a – показання приладу, X – справжнє значення вимірюваної величини. Взагалі δ дорівнює ціні найменшої поділки інструмента. Наприклад: для лінійки $\delta=1$ мм. Відносна похибка вимірів – це відношення

$$\varepsilon = \frac{\delta}{X}. \quad (1.14)$$

Як правило, вона визначається у відсотках

$$\varepsilon = \frac{\delta}{X} \cdot 100 \% . \quad (1.15)$$

Приведена похибка вимірювання або клас точності визначається відношенням

$$\gamma = \frac{\delta}{D} \cdot 100 \% , \quad (1.16)$$

і визначається у відсотках. D – максимальне значення шкали інструмента. Наприклад: сила струму вимірюється амперметром з діапазоном $0 \div 1$ А, клас точності 0,5. Це означає, що $X_n = 1$ А; $\gamma = 0,5 \%$ і

$$\delta = \frac{\delta \cdot D}{100} = \frac{0,5 \cdot 1 \text{ А}}{100} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Якщо амперметр показує 0,3 А, тоді

$$\varepsilon = \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,3 \text{ А}} \cdot 100 \% = 1,7 \% .$$

1.3 Похибки табличних величин

1. Похибка табличної величини визначається за формулою

$$\Delta x_{\text{табл}} = \alpha \cdot \nu, \quad (1.17)$$

де α - довірча ймовірність; ν - половина ціни розряду останньої залишеної цифри табличної величини. Наприклад: величина π дорівнює 3,14. В цьому випадку $\nu = 0,005$ і

$$\Delta x_{\text{табл}} = \alpha \cdot 0,005.$$

Якщо величина π дорівнює 3,141 і $\nu = 0,0005$, то

$$\Delta x_{\text{табл}} = \alpha \cdot 0,0005.$$

2. При користуванні вимірювальними приладами виникають похибки відліку. Типово, похибка відліку дорівнює половині ціни поділки шкали приладу. Наприклад: лінійка має похибку відліку $v = 0,5$ мм.

1.4 Правила округлення і виконання наближених обчислень

Точність обчислень завжди повинна відповідати точності вимірів. Зайва арифметична точність обчислень не позитивна якість, а недолік в роботі. Наприклад, якщо середнє арифметичне значення товщини пластинки після розрахунку було взято рівним 2,2543 мм при абсолютній похибці вимірів 0,03 мм, то при цьому показане лише невміння виконувати арифметичні дії з наближеними числами. Щоб не витратити даремно часу для одержання сумнівної арифметичної точності, необхідно всі отримані величини перед підстановкою в формули округляти, залишаючи в них на одну значущу цифру більше, ніж самої з наближених величин (з найменшим числом знаків). При округленні наближеного числа необхідно відкидати останні цифри, якщо перша з цифр, що відкидаються, менша 5, і додавати одиницю до попередньої цифри, якщо перша з цифр, що відкидаються, 5 або більше.

За написаним числом, що виражає результат виміру або обчислення, можна говорити про ступінь точності.

Значущі цифри – це усі цифри, крім нулів, що стоять перед числом, і нулів, поставлених наприкінці записаного результату замість відкинутих цифр при округленні.

Десяткові такі числа – це усі цифри, розміщені праворуч від коми. Наприклад, число 25,002 має п'ять значущих цифр, а десяткових знаків три; число 0,0034 має дві значущі цифри, але чотири десяткових знаки.

Якщо обчислення за наближеними даними проводяться у декілька дій, то в проміжних діях треба зберігати на одну значущу цифру більше в порівнянні з точністю визначуваних величин у даному досліді (тобто дві сумнівні цифри). У всіх арифметичних діях над наближеними числами в остаточному результаті треба уберігати стільки десяткових знаків, скільки їх мають наближені дані з найменшим числом десяткових знаків.

Округлення чисел у процесі обчислення призводить до систематичної похибки. Відносна похибка, яку знаходять в результаті обчислень, має бути приблизно на порядок (тобто у 10 разів) менша за похибку результату непрямих вимірювань.

У записі результату вимірювань залишають одну (максимум дві) сумнівні цифри. Похибку вимірювань округляють до однієї значущої цифри, якщо ця цифра не «1». Якщо ж ця цифра «1», то у похибці залишають дві значущі цифри, в записі результату вимірювань – дві сумнівні цифри. Сумнівними називаються значущі цифри в записі результату вимірювань, десяткові розряди яких збігаються з десятковими розрядами значущих цифр у записі похибки цього результату.

Розряди останніх цифр Δx і x мусять співпадати. Для цього округляють x або приписують до нього неvistачаючі нулі справа. E округляють по тим же правилам, що і Δx . Спочатку округляють Δx , $\Delta x = 0,3$ мм. Розряд останньої цифри Δx - десяті долі, а \bar{X} – соті долі. Округляємо \bar{X} до десятих долів. Маємо $\bar{X} = 73,6$ мм.

Знаходимо E :

$$E = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% = \frac{0,3}{73,6} \times 100\% = 0,393\% = 0,4\%$$

Кінцевий результат $x = 173,6 \pm 0,3$ мм , $\alpha = 0,7$, $E = 0,4\%$

1.5 Похибки прямих вимірювань

Похибки прямих вимірювань визначаються за формулою

$$\Delta x = \sqrt{(t_{\infty} \cdot \frac{\delta}{3})^2 + (\alpha \cdot v)^2} , n = 1, \quad (1.18)$$

якщо деяку величину виміряти один раз.

Якщо вимірювання виконувались n раз , то

$$\Delta x = \sqrt{(t_{\infty} \cdot \frac{\delta}{3})^2 + (\Delta x_{\text{вип.}})^2} , n > 1. \quad (1.19)$$

В цих рівняннях t_{∞} - коефіцієнт Стюдента для заданого α при необмеженому числі вимірів; δ - похибка приладу; v - похибка відліку, $v = \delta / 2$.

Наприклад: довжина тіла була виміряна 3 рази:

n	x, мм	Δx_i , мм	$(\Delta x_i)^2$
1	12,8	0,446	0,217
2	13,6	0,334	0,111
3	13,4	0,134	0,018
$\bar{x} = 13,2$		$\sum(\Delta x_i)^2 = 0,3$	

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\left(\bar{x} \cdot \frac{\delta}{3}\right)^2 + (\Delta \bar{x}_{\text{вип}})^2} = \sqrt{\left(1 \cdot \frac{1}{3}\right)^2 + 1,4^2 \cdot \frac{0,346}{3 \cdot 2}} = 0,473 \text{ мм.}$$

Відносна похибка дорівнює

$$E = \frac{0,473}{13,266} \cdot 100\% = 3,56\% .$$

Кінцевий результат: $x = (13,3 \pm 0,3) \text{ мм}$; $\alpha = 0,7$; $E = 3,6\%$.

1.6 Похибки непрямих вимірювань

Якщо y - величина, що вимірюється посередньо, її розраховують за відомою залежністю $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ від змінних x_1, x_2, \dots, x_n , які вимірюють безпосередньо.

1. Похибки непрямих вимірів визначаються за формулою:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i\right)^2} , \quad (1.20)$$

якщо функціональна залежність досліджуваної величини є багаточлен.

2. Похибки непрямих вимірів можна визначити

$$E = \frac{\Delta y}{\bar{y}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i\right)^2} , \quad (1.21)$$

$$\Delta \Pi = \sqrt{\left[\left(\frac{V^2}{2} + g \cdot h\right) \cdot \Delta m\right]^2 + (m \cdot V \cdot \Delta V)^2 + (m \cdot h \cdot \Delta g)^2 + (m \cdot g \cdot \Delta h)^2} .$$

якщо функціональна залежність досліджуваної величини є одночлен і потім знаходимо Δy як: $\Delta y = E \cdot \bar{y}$. Наприклад:

1. Якщо залежність функції $\Pi = \frac{m \cdot V^2}{2} + m \cdot g \cdot h = f(m, V, g, h)$, тоді

$$\frac{\partial f}{\partial m} = \frac{\partial}{\partial m} \left(\frac{m \cdot V^2}{2} + m \cdot g \cdot h \right) = \frac{V^2}{2} + g \cdot h,$$

$$\frac{\partial f}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{m \cdot V^2}{2} + m \cdot g \cdot h \right) = m \cdot V,$$

$$\frac{\partial f}{\partial g} = \frac{\partial}{\partial g} \left(\frac{m \cdot V^2}{2} + m \cdot g \cdot h \right) = m \cdot h,$$

$$\frac{\partial f}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h} \left(\frac{m \cdot V^2}{2} + m \cdot g \cdot h \right) = m \cdot g$$

Тоді

$$\Delta \Pi = \sqrt{\left[\left(\frac{V^2}{2} + g \cdot h \right) \cdot \Delta m \right]^2 + (m \cdot V \cdot \Delta V)^2 + (m \cdot h \cdot \Delta g)^2 + (m \cdot g \cdot \Delta h)^2}.$$

2. Якщо залежність функції: $\Pi = m \cdot g \cdot h = f(m, g, h)$,

$$\ln \Pi = \ln m + \ln g + \ln h$$

$$\frac{\partial \ln \Pi}{\partial m} = \frac{1}{m}$$

$$\frac{\partial \ln \Pi}{\partial g} = \frac{1}{g}$$

$$\frac{\partial \ln \Pi}{\partial h} = \frac{1}{h}$$

Тоді

$$E = \frac{\Delta \Pi}{\Pi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2},$$

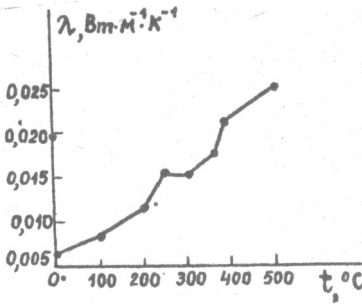
$$\Delta \Pi = E \cdot \bar{\Pi}.$$

У результаті отримуємо

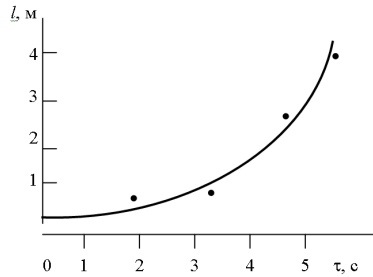
$$\Pi = \bar{\Pi} \pm \Delta \Pi, \alpha, E.$$

1.7 Графічне відображення експериментальних результатів

Графік будується на міліметровому папері. На рисунках нижче можна побачити приклади графіків.



невірно



вірно

Експериментальна крива проходить крізь експериментальні точки.

Контрольні запитання

1. Дати визначення прямих і непрямих вимірів. Приклади.
2. За допомогою якої формули знаходять найбільш ймовірне значення вимірної величини?
3. Що таке відносна похибка?
4. Що називається випадковим відхиленням?
5. За якою формулою знаходять середнє квадратичне значення або похибку, викликану випадковими відхиленнями?
6. За якою формулою знаходять похибки засобів виміру.
7. За якою формулою знаходять похибки табличних величин та відліку.
8. Сформулюйте правила округлення.
9. Запишіть формули обчислення похибок при прямих вимірах.
10. Запишіть формули обчислення похибок при непрямих вимірах.

Рекомендована література

1. Методичні вказівки до лабораторних занять з механіки та молекулярної фізики. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. - С.7-17. - 60 с.

Доповнення і редагування:

доцент кафедри фізики, канд. фіз.-матем. наук В. Г. Корніч;

професор кафедри фізики, д-р. фіз.-матем. наук С. В. Лоскутов.

Затверджено на засіданні кафедри фізики ЗНТУ, протокол № 3 від 01.12.2008 р.

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛ

МЕТА РОБОТИ: знайти густину металевого тіла з відомою масою, вимірюючи лінійні розміри тіла. Одержане значення густини порівняти з довідковим і визначити, з якого металу виготовлене тіло. Навчитися визначати похибки прямих і непрямих вимірювань.

ПРИЛАДИ І ЗНАРЯДДЯ: штангенциркуль, металеве тіло.

2.1 Вступ

Густиною ρ є величина, що визначається для однорідної речовини (тіла) її масою в одиниці об'єму. Тобто для однорідного тіла знаходимо

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

де m – маса тіла, V – об'єм тіла. Масу тіла в лабораторній роботі визначають як табличне значення.

Для обчислення густини тіла правильної геометричної форми проводимо вимірювання його лінійних розмірів. Далі обчислюємо об'єм за виміряними значеннями лінійних розмірів та відповідною формулою для тіла правильної геометричної форми. Нижче наведено формули об'ємів найпростіших геометричних фігур. Якщо це циліндр, то

$$V = \frac{1}{4} \pi \cdot a^2 \cdot h, \quad (2.2)$$

де a – діаметр, h – висота циліндра. Для конуса

$$V = \frac{1}{12} \pi \cdot a^2 \cdot h, \quad (2.3)$$

де a – діаметр основи, h – висота, $\pi = 3,14$. Для паралелепіпеда

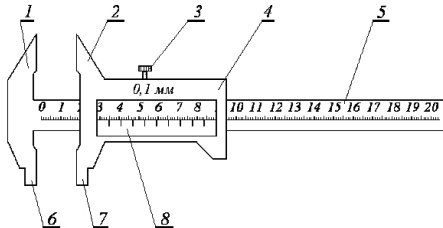
$$V = a \cdot b \cdot c, \quad (2.4)$$

де a , b , c три його ребра. Підставити в (2.1) відповідний об'єм і записати кінцеву робочу формулу.

Найпростішим інструментом для вимірювання лінійних розмірів є лінійка. Її найменша поділка дорівнює 1 мм. Точність вимірювання за допомогою лінійки буде дорівнювати половині ціни поділки, тобто

0,5 мм. Для вимірювань із більш високою точністю використовують штангенциркуль та мікрометр. Підвищення точності досягається завдяки використанню допоміжної шкали – ноніуса.

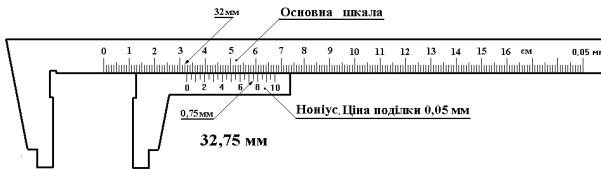
Штангенциркуль зображено на рисунку 2.1. Він складається з основної металевої лінійки 5 з міліметровими поділками. На початку її розміщені нижня 6 та верхня 1 губки. Повзунок 4, нижня 7 та верхня 2 губки є одним цілим. Вони можуть переміщуватись уздовж основної лінійки 5 і фіксуватися в потрібному положенні за допомогою гвинта 3. На нижній частині повзунка 4 нанесені поділки ноніуса 8. Коли губки 6 і 7 стикаються, нуль лінійки і нуль ноніуса повинні збігатися.



1, 2 – верхні губки; 3 – фіксуючий гвинт; 4 – повзунок; 5 – лінійка;
6, 7 – нижні губки; 8 – ноніус.

Рисунок 2.1 – Штангенциркуль

Другий тип штангенциркуля зображено на рис.2.2.



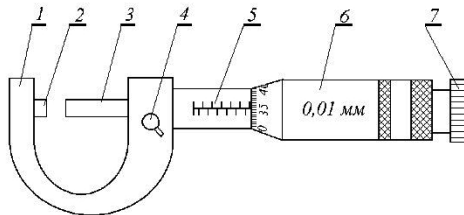
Цілі міліметри відраховуємо по основній шкалі до нульової риски шкали ноніуса. Долі міліметра зчитуємо по шкалі ноніуса по рисці, яка співпадає з будь-якою рисою основної шкали.

Рисунок 2.2 – Штангенциркуль.

Для того щоб виміряти довжину предмета B , його розміщують між губками 6 і 7 і закріплюють гвинтом 3. Після цього проводять відлік по лінійці і ноніусу й обчислюють довжину предмета L за формулою (9).

Для більш точного вимірювання розмірів предметів застосовуються мікрометричні гвинти з малим і точно витриманим кроком. Такі гвинти використовуються в мікрометрах. Мікрометр використовують для вимірювання зовнішніх розмірів із точністю до 0,01 мм.

Мікрометр (див. рис. 3.3) складається зі скоби 1, що має на лівому кінці нерухому п'яту 2 (перша вимірювальна поверхня), а з іншого боку – втулку 5, всередині якої встановлено мікрометричний гвинт (шпindel) 3 з кроком 0,5 мм. Торець цього гвинта 3 є другою вимірювальною поверхню. На зовнішній поверхні втулки 5 проведена осьова лінія, уздовж якої нанесені поділки лінійної шкали. Верхні і нижні штрихи лінійної шкали зміщені один відносно одного на півміліметра. Цифри проставлені тільки для поділок нижньої шкали, тобто вона є звичайною міліметровою шкалою. На втулку 5 надіто барабан 6, на скошену кільцеву поверхню якого нанесено шкалу ноніуса із 50 поділками. На голівці мікрометричного гвинта 3 є пристрій 7, що забезпечує сталість тиску на вимірювальний об'єкт. Цей пристрій 7 називається тріскачкою. Для фіксування положення мікрометричного гвинта використовується стопорний гвинт 4.



- 1 - скоба; 2 - нерухома п'ята; 3 – торець мікрометричного гвинта;
4 - стопорний гвинт; 5 - втулка з міліметровою шкалою;
6 - барабан зі шкалою ноніуса; 7 - тріскачка.

Рисунок 2.3 – Мікрометр

Для того щоб виміряти довжину предмета, його розміщують між п'ятою 2 і торцем мікрометричного гвинта 3. Мікрометричний гвинт обертають, використовуючи тріскачку 7. При цьому мікрогвинт 3 та барабан 6 обертаються та переміщуються поступально відносно лінійної шкали на втулці 5. Обертання продовжується до зіткнення поверхонь вимірюваної деталі з вимірювальними поверхнями мікрометра 2 та 3, після чого тріскачка починає тріщати, а поступальний рух припиняється. Далі фіксують положення мікрогвинта 3 стопорним гвинтом 4. Зверніть увагу: обертати мікрометричний гвинт потрібно тільки

користуючись тріскачкою 7. Інакше мікрометричний гвинт буде зірвано, мікрометр ушкоджено, вимірювання буде неправильним. Числове значення довжини вимірюваної деталі знаходять із формули:

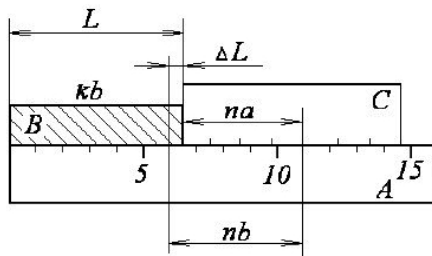
$$L = kb + nh/m, \quad (2.5)$$

де k – кількість поділок нижньої і верхньої лінійної шкали втулки, що відкриваються барабаном; b – відстань між сусідніми верхніми та нижніми поділками цієї шкали (0,5 мм); n – номер тієї поділки барабана, що у момент відліку збігається з осью лінійною втулки; h – крок гвинта (0,5 мм); m – кількість всіх поділок (100) на шкалі ноніуса (барабана). Зверніть увагу: не можна починати вимірювання мікрометром, не перевіривши його початкове показання! Початкове показання мікрометра (тобто без вимірюваного тіла) повинне бути нульовим. Однак трапляються випадки, коли початкове показання мікрометра не дорівнює нулю. В такому разі потрібно визначити поправку до нульового значення (вона може бути як від'ємною, так і додатною величиною) і врахувати її під час вимірювань.

Лінійний ноніус – це невелика лінійка C (рис. 2.4) із шкалою, m поділок якої дорівнюють $m-1$ поділкам основної шкали масштабної лінійки A . Звідси випливає, що ціна поділки основної лінійки b та ціна поділки ноніуса a пов'язані між собою співвідношенням

$$am = (m - 1)b. \quad (2.6)$$

Величину $b - a = b/m$ називають точністю ноніуса, вона дорівнює точності вимірювання.



А - основна шкала; В - тіло, довжина якого вимірюється;

С - шкала лінійного ноніуса.

Рисунок 2.4 – Схема застосування ноніуса для вимірювання довжини тіла

Процес вимірювання полягає у такому. До нульової поділки шкали основної лінійки прикладають один кінець вимірюваною тіла

B , а до іншого кінця тіла B – ноніус C . Тоді, як свідчить рисунок 2.4 шукана довжина тіла B буде дорівнювати

$$L = kb + \Delta L, \quad (2.7)$$

де розмір ΔL визначається з співвідношення (див. рис. 2.4):

$$\Delta L = nb - na = n(b - a) = nb / m. \quad (2.8)$$

Тут k – ціле число поділок масштабної лінійки; n – номер поділки ноніуса C , яка збігається з поділкою основної шкали A , Тоді з формул (2.7) і (2.8) отримуємо

$$L = kb + nb / m. \quad (2.9)$$

Таким чином, довжина вимірюваного тіла дорівнює сумі двох величин: довжині k поділок основної шкали A , що розміщені зліва від нульової поділки ноніуса, та довжині, що дорівнює добутку точності ноніуса b/m на номер поділки ноніуса n , що збігається з поділкою основної шкали.

2.2 Вимірювання і визначення похибок

1. Висоту циліндра, конуса, або два ребра паралелепіпеда виміряти один раз.
2. Діаметр основи циліндра (конуса) або третє ребро паралелепіпеда виміряти три рази. Результати занести в таблицю.
3. Знайти середнє значення, величини діаметра, або ребра, а також відхилення від середнього значення для кожного вимірювання.
4. Розрахувати по одержаній робочій формулі густину даного тіла, підставляючи середні значення вимірюваних величин, і записати результат в $\text{кг}/\text{м}^3$.
5. Визначити похибку прямих вимірювань діаметра або ребра за формулою:

$$\Delta a_{\text{сун}} = t \sqrt{\frac{\sum (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (2.10)$$

де t – коефіцієнт Ст'юдента, n – число вимірювань, Δa_i – відхилення від середнього значення i - того вимірювання.

Таблиця 2.1

Циліндр (Конус)	d_i , мм	Δd_i , мм	$(\Delta d_i)^2$, мм ²	h , мм
1				
2				
3				
	$\bar{d} =$		$\Sigma(\Delta d_i)^2 =$	

Таблиця 2.2

Паралелепі- пед	a_i , мм	Δa_i , мм	$(\Delta a_i)^2$, мм ²	b , мм	c , мм
1					
2					
3					
	$\bar{a} =$		$\Sigma(\Delta a_i)^2 =$		

6. Півширина довірчого інтервалу величини d і a , яка вимірюється декілька разів, визначається виразом:

$$\Delta d = \Delta a = \sqrt{(\Delta a_{\text{випн}})^2 + \left(t_{\infty} \frac{\delta}{3}\right)^2}, \quad (2.11)$$

де $\delta = 0,05$ мм – границя основної допустимої похибки штангенциркуля.

7. Півширина довірчого інтервалу одноразових вимірювань висоти (циліндра, конуса) або ребер (паралелепіпеда) визначається виразом:

$$\Delta b = \Delta c = \Delta h = \sqrt{\left(t_{\infty} \frac{\delta}{3}\right)^2 + (\alpha \cdot v)^2}, \quad (2.12)$$

де α – довірча ймовірність, v – похибка відліку, $v = 0,05$ мм.

Довірчий інтервал Δm і $\Delta \pi$ необхідно визначити як для довідкових величин. Для цього довірчу ймовірність помножують на п'ять одиниць найменшого відкинутого розряду табличного числа.

8. Відносна похибка для циліндра та конуса розраховується за формулою:

$$E = \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}, \quad (2.13)$$

для паралелепіпеда:

$$E = \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}. \quad (2.14)$$

9. Визначити півширину довірчого інтервалу

$$\Delta\rho = E \cdot \bar{\rho}. \quad (2.15)$$

10. Записати кінцевий результат (висновок), застосувавши правила округлення.

11. Порівняти одержаний результат з табличними значеннями густини і визначити з якого матеріалу виготовлено зразок.

Висновок: експериментально визначена густина металевого зразка, яка дорівнює $\rho = (\bar{\rho} \pm \Delta\rho) \text{кг/м}^3 =$,

с довірчою імовірністю $\alpha =$, відносною похибкою $E =$ % .

Визначено, що зразок виготовлено із

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти Ст'юдента

Число вимірювань, n	Довірча ймовірність, α					
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3	0,62	0,82	1,06	1,4	1,9	2,5
5	0,57	0,74	0,99	1,2	1,5	2,1
∞	0,52	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6

Таблиця 2.4 – Густина твердих тіл

Речовина	$\rho, 10^3, \text{кг/м}^3$
Плексиглас	1,2
Алюміній	2,7
Цинк	7,1
Залізо	7,7 ÷ 7,9
Латунь	8,4 ÷ 8,7
Мідь	8,9
Срібло	10,5
Вольфрам	19,1

Контрольні запитання

1. Які вимірювання називають прямими, а які непрямыми?
2. В якому вигляді зазвичай записують результати вимірювань?
3. Яку інформацію має абсолютна похибка?
4. Що таке відносна похибка?
5. Які похибки відносять до систематичних?
6. Які похибки відносять до випадкових?
7. Які похибки відносять до грубих?
8. Яку інформацію має коефіцієнт Ст'юдента, від яких параметрів він залежить?
9. Запишіть та поясніть формулу для абсолютної похибки випадкових похибок прямих вимірювань?
10. Запишіть та поясніть формулу для абсолютної похибки непрямих вимірювань?
11. Якою величиною характеризується точність приладів? Дайте цій величині визначення, пояснення.
12. Поясніть, скільки цифр треба залишати у записі середнього значення фізичної величини, скільки цифр треба залишати у записі абсолютної похибки?
13. Що називають густиною тіла?
14. До якого виду похибок відносять похибку штангенциркуля?
15. У чому полягає процес вимірювання за допомогою ноніуса?
16. Як побудований штангенциркуль?
17. Розкажіть, як проводити вимірювання за допомогою штангенциркуля.
18. Яку будову має мікрометр?
19. Розкажіть, як проводити вимірювання за допомогою мікрометра.
20. Для чого використовують у мікрометрі тріскачку?
21. Як знайти абсолютну похибку при вимірюванні маси?
22. Чому в лабораторній роботі потрібно проводити вимірювання діаметра, висоти одним і тим самим інструментом щонайменше три рази?
23. За якою формулою знаходять півширину довірчого інтервалу прямого вимірювання, виконаного декілька разів?
24. За якою формулою знаходять півширину довірчого інтервалу, якщо пряме вимірювання зроблено один раз?

25. Як знайти півширину довірчого інтервалу для табличної величини?
26. Як одержати формулу відносної похибки, виходячи з робочої формули для густини?
27. Як знайти випадкові відхилення для прямого вимірювання?

Рекомендована література

1.Методичні вказівки до лабораторних занять з механіки та молекулярної фізики.- Запоріжжя: ЗНТУ, 2003.– С.7-25.- 60 с.

Інструкція складена доцентом кафедри фізики Корнічем В.Г.
Рецензент - доцент кафедри фізики Манько В.К. Затверджена на засіданні кафедри фізики,
протокол № 3 від 01.12.2008 р.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЮНГА МЕТАЛІВ

МЕТА РОБОТИ: перевірити закон Гука; дослідним шляхом визначити модуль Юнга металевого дроту.

ПРИЛАДИ І ЗНАРЯДДЯ: штангенциркуль, індикатор видовження, набір вантажів, дрiт.

3.1 Вступ

Під впливом прикладених зовнішніх сил будь-яке реальне тіло деформується, тобто змінює свої розміри та форму. Якщо після припинення дії зовнішніх сил тіло відновлює початкові розміри та форму, то така деформація тіла називається пружною. При пластичній деформації форма і розміри тіла не відтворюються після зняття навантаження. Пружні деформації спостерігаються в тому випадку, коли зовнішня сила, що обумовлює деформацію, не перевищує деякої певної межі – границі пружності. При пружних деформаціях під впливом прикладеного навантаження відбувається тільки незначна зміна відстаней між атомами, або повороти блоків кристалу. При розтягуванні кристалу атоми віддаляються, а при стискуванні наближаються один до одного. При такому зміщенні атомів з положень рівноваги порушується баланс сил притягування та відштовхування, тому після зняття навантаження зміщені атоми завдяки дії сил притягування, або відштовхування повертаються в початковий стан рівноваги і кристали приймають свою первинну форму та розміри.

Прикладемо до твердого закріпленого з одного кінця стержня довжиною l зовнішню силу F (рис. 3.1). Нехай під впливом цієї сили стержень подовжиться на Δl . Відношення сили F до площі поперечного перерізу S

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} \quad , \quad (3.1)$$

називається механічним напруженням σ . У випадку циліндричного зразка (дроту) діаметром d площа перерізу дорівнює:

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

тому

$$\sigma = \frac{4mg}{\pi \cdot d^2}. \quad (3.2)$$

Величина

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (3.3)$$

називається відносною деформацією – це відношення абсолютного видовження Δl до початкової довжини l .

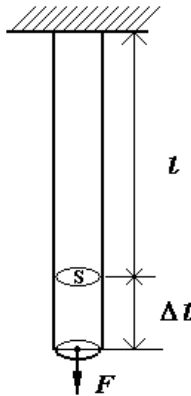


Рисунок 3.1

Експеримент показує, що в області пружних деформацій між величинами σ та ε має місце лінійна залежність. На рис. 3.2 OA – область пружної деформації, де виконується закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.4)$$

В області AB – мають місце пластичні деформації, тобто при $\sigma > \sigma_m$ після припинення дії зовнішніх сил в тілі виникають залишкові деформації $\varepsilon_{зал}$. Напруження σ_m називається межею пружності матеріалу.

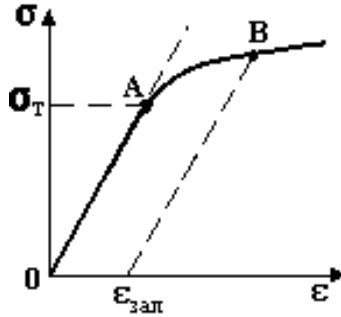


Рисунок 3.2

Залежність (3.4) відображає закон Гука, де E називається модулем пружності, або модулем Юнга, який характеризує пружні властивості матеріалу. Він дорівнює механічній напрузі, при якій довжина стержня (дроту) подвоюється. Величина модуля Юнга головним чином визначається типом кристалічної ґратки, тобто силами міжатомного зв'язку. Для деяких матеріалів величина E приведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

№	Матеріал	$E \cdot 10^9$, Па
1	Сталі леговані	206
2	Сталі вуглецеві	195 ÷ 205
3	Чавун ковкий	150
4	Ti	116
5	Cu	101
6	Ag	83
7	Al	71
8	Mg	44
9	Скло	49 ÷ 78
10	Целулоїд	1.7 ÷ 1.9

3.2 Опис установки

Схема експериментальної установки показана на рис.3.3.

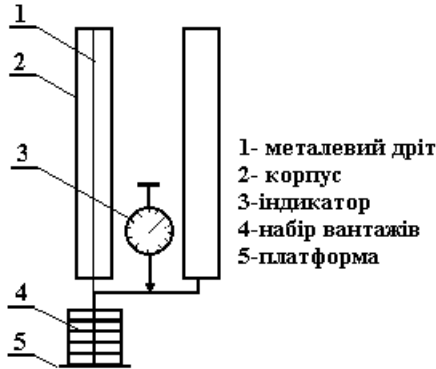


Рисунок 3.3.

Дріт 1 закріплений у корпусі 2. До кінця дроту прикріплена платформа 5, на яку поміщуються вантажі 4. Видовження дроту вимірюється індикатором 3.

3.3 Порядок виконання роботи

1. Для вирівнювання дроту навантажити його двома – трьома вантажами з набору. Обертаючи шкалу індикатора, встановити його показання на нуль.
2. Послідовно навантажуючи дріт усіма вантажами, вимірювати його абсолютне подовження Δl . Сила $F=mg$, що діє на дріт, дорівнюватиме сумарній вазі вантажів, покладених на платформу після установки нуля. Результати вимірювань m , Δl , занести в таблицю 3.2.
3. За формулами (3.2) і (3.3) розрахувати механічне напруження σ та відносну деформацію дроту ε . Результати розрахунків занести в таблицю 3.2.
4. Побудувати графік залежності $\sigma = f(\varepsilon)$ за зразком, який представлено на рис. 5.4, тобто провести пряму так, щоб більшість експериментальних точок знаходились якнайближче до неї. На цій прямій (але не з таблиці!) вибрати будь-які дві точки 1 і 2, яким відповідають значення механічного напруження σ_1, σ_2 та відносної деформації $\varepsilon_1, \varepsilon_2$.

Таблица 3.2

№	m, кг	F, Н	Δl , мм	σ , МПа	ε	l, мм	d, мм
1						1100	0,6
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

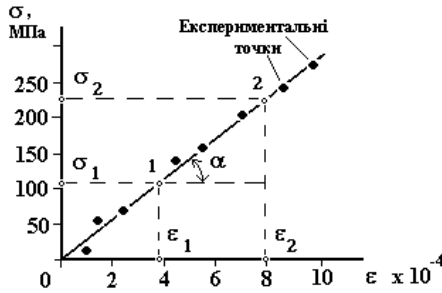


Рисунок 3.4

5. За формулою:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.5)$$

розрахувати модуль Юнга E . При такому методі визначення коефіцієнта пропорційності (як $tg\alpha$ на рис.3.4) між будь-якими величинами, що лінійно залежать одна від одної, використовується вся сукупність експериментальних даних, а не випадкове значення якогось одного вимірювання. Користуючись даними таблиці 3.1 визначити матеріал, з якого виготовлено дріт.

6. Використовуючи теорію похибок, оцінити відносну похибку вимірювань модуля Юнга E за формулою:

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\delta l_1}{\Delta l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2}, \quad (3.6)$$

де величину δl – похибку вимірювання видовження, розрахувати за формулою похибки для одноразових вимірювань:

$$\delta l_1 = \sqrt{\left(t_\infty \frac{\delta}{3}\right)^2 + (\alpha v)^2}, \quad (3.7)$$

$\delta = 0,01\text{мм}; v = \frac{\delta}{2}$. За формулою похибки для табличних величин:

$$\Delta x_{\text{табл.}} = \alpha \cdot v \quad (3.8)$$

розрахувати величини: Δl ($v = 1 \text{ см}$), Δm ($v = 0.5 \text{ г}$), Δg ($v = 0,5 \text{ м/с}^2$), $\Delta \pi$ ($v = 0,005$), Δd ($v = 0,05 \text{ мм}$).

6. По виду графіка залежності $\sigma = f(\epsilon)$ зробити висновок, щодо справедливості закону Гука. Висновок повинен містити відповіді на запитання: Чи справедливий закон Гука і як це довести? Чому дорівнює модуль Юнга та похибка його вимірювань ($E = \bar{E} \pm \Delta E$)? З якого матеріалу виготовлено дріт?

Контрольні запитання

1. Дати визначення пружнім та пластичним деформаціям.
2. Дати визначення механічного напруження σ та відносної деформації ϵ .
3. Який вид має експериментальний графік залежності $\sigma = f(\epsilon)$?
4. В чому полягає закон Гука?
5. Який фізичний зміст модуля Юнга?

Список літератури

1. Кучерук І.М. Загальний курс фізики. т.1. / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик - К.: Техніка, 1999.- С.115-120.-532 с.
2. Трофимова Т.Н. Курс фізики. -М.: Высшая. школа., 1990.- С.35-37.- 478 с.
3. Чолпан П.П. Фізика.- Київ: Вища школа.- 2003.- С.99-102.-567 с.

Інструкцію склав доцент кафедри фізики Правда М.І.

Рецензент - доцент кафедри фізики Манько В.К.

Затверджена на засіданні кафедри фізики,

протокол № 3 від 01.12.2008 р.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ МЕТОДОМ СТОКСА

МЕТА РОБОТИ: Визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини.

ПРИЛАДИ: скляний циліндр з мастилом, металеві кульки, штангенциркуль, секундомір, лінійка.

4.1 Опис установки

Прилад (рис.4.1) уявляє собою скляний циліндр, наповнений випробуваною в'язкою рідиною (мастилом). На циліндр одягнені два кільця АВ та СД. Кільця можуть переміщуватись вздовж труби. Відстань між ними вимірюється лінійкою, а час руху кульок секундоміром.

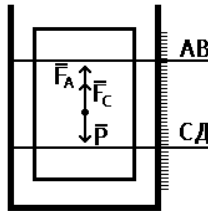


Рисунок 4.1

4.2 Теорія методу Стокса

На кульку, що вільно падає у в'язку рідину діють такі сили:

Сила тяжіння

$$\vec{P} = m\vec{g} = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \rho_k \vec{g} , \quad (4.1)$$

де r – радіус кульки, $\rho_k = 7800 \text{ кг/м}^3$ – густина кульки, \vec{g} – прискорення вільного падіння. Виштовхуюча сила Архімеда

$$\vec{F}_A = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \rho_p \cdot \vec{g} , \quad (4.2)$$

де $\rho_p = 960 \text{ кг/м}^3$ – густина рідини.

Сила опору руху, зумовлена силами внутрішнього тертя між шарами рідини. При рухові кульки в рідині це сила Стокса

$$F_o = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v, \quad (4.3)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя, v – швидкість руху кульки, r – радіус кульки. Після занурення кульки в рідину рівнодіюча сил R , що діють на неї

$$R = P - (F_A + F_o) > 0. \quad (4.4)$$

Кулька рухається прискорено. По мірі зростання швидкості збільшується сила Стокса і настане мить, коли рівнодіюча R буде дорівнювати нулю. Згідно з першим законом Ньютона кулька рух кульки стане рівномірним. При цьому

$$P - (F_A + F_o) = 0. \quad (4.5)$$

Підстановка сил P , F_A та F_o із виразів (4.1) ÷ (4.3) в (4.5) дає вираз для коефіцієнта внутрішнього тертя;

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_k - \rho_p}{v}. \quad (4.6)$$

Швидкість рівномірного руху $v = \frac{L}{t}$. Одержуємо із (4.6) робочу формулу

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g t \frac{\rho_k - \rho_p}{L}. \quad (4.7)$$

4.3 Порядок виконання роботи (завдання 1)

1. Виміряти штангенциркулем діаметр однієї кульки 5 разів. Отримані результати занести в таблицю 1.
2. Встановити кільце AB (CD – нерухомо) на відстані 35 см від CD (це буде – L), кільце AB повинно бути нижче рівня рідини на 10 см.
3. Опустити кульку в циліндр.
4. У мить проходження кульки через верхнє кільце ввімкнути секундомір, а при проходженні через нижнє - вимкнути.
5. Час проходження відстані L занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

№	r , м	$\Delta r'$, м	$(\Delta r')^2$ м ²	L , м	ΔL , м	t , с	Δt , с	η Па·с	$\Delta\eta/\eta$ Па·с	$\Delta\eta$ Па·с
1				0,35						
2										
3										
4										
5										
	$\bar{r} =$		$(\Delta r)^2 =$							

6. Повторити виміри, вказані в пунктах 3÷5 для останніх 4 кульок, змінюючи кожен раз L_i – пересовуючи кільце СД на 5 см. Результати вимірювань занести до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

L_i , м	35	40	45	50	55
t_i , с					

7. Розрахувати коефіцієнт внутрішнього тертя за (4.6), використовуючи дані r , L , t таблиці 4.1.

8. Побудувати графік залежності $L = f(t)$, використовуючи дані таблиці 4.2.

9. Обчислити відносну похибку $\Delta\eta / \eta$, виходячи з (4.6). При цьому півширину довірчого інтервалу Δg знайти як для табличної величини, а похибку табличних значень ρ_k та ρ_p не враховувати, вважаючи їх сталими величинами. Півширину довірчого інтервалу Δr розрахувати за формулою для 5 вимірів, а Δt та ΔL для одиничного вимірювання. Границя основної допустимої похибки σ і похибки відліку v прийняти: для штангенциркуля $\sigma = 0,05$ мм; $v = 0,05$ мм; секундоміра $\sigma = 0,2$ с; $v = 0,1$ с; лінійки $\sigma = 1$ мм; $v = 0,5$ мм.

10. Знайти півширину довірчого інтервалу. Результати обчислень похибок занести до таблиці 4.1.

Інструкцію склав доц. кафедри фізики Серпецький Б.О.
 Відредагував доц. Корніч В.Г.
 Затверджена на засіданні кафедри (протокол № 8 від 08.03.2001 р.)

4.4 Порядок виконання роботи (завдання 2)

1. Вибрати 5 кульок приблизно однакового розміру.
2. Виміряти штангенциркулем діаметр кожної кульки по одному разу. Результати занести в таблицю.
3. Встановити верхнє кільце АВ приблизно на 10 см нижче рівня рідини, а нижнє СД на відстані $L = 35$ см від АВ.
4. Опустити кульку в циліндр і в момент проходження кульки через верхнє кільце увімкнути секундомір, а при проходженні через нижнє – вимкнути.
5. Відстань L і час проходження її кулькою t занести в таблицю 7.3.

Таблиця 4.3

№	r , мм	L , см	t , с	$r^2 \cdot t$, мм ² ·с	η_i Па·с	$\Delta\eta_i$ Па·с	$[\Delta\eta_i]^2$ Па ² ·с ²
1		35					
2		40					
3		45					
4		50					
5		55					
					$\bar{\eta}$		$\Sigma[\Delta\eta_i]^2$

6. Збільшити відстань L на 5 см, опустивши нижнє кільце СД.
7. Повторити виміри, вказані в пунктах 4÷6, для останніх 4 кульок, змінюючи кожний раз L . Результати вимірювань занести до таблиці.
8. Розрахувати добуток $r^2 \cdot t$. Результати занести в таблицю 4.3.
9. Побудувати графік залежності цього добутку $r^2 \cdot t$ в залежності від відстані L . Робоча формула (4.7) показує, що ця залежність повинна бути лінійною. Якщо експеримент дає дійсно пряму лінію, то теоретична формула (4.7), а отже і формула Стокса (4.3) вірні.
10. По формулі (4.7) знайти п'ять значень коефіцієнта в'язкості, та розрахувати випадкову похибку його вимірювання як для 5-ти кратних прямих вимірів. Знайти також відносну похибку $\Delta\eta/\eta$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яка фізична природа сили в'язкості в рідині та яка умова її виникнення?
2. Записати формулу Стокса для сили опору рухові кульки в рідині.
3. Яка необхідна умова для застосування методу Стокса?
4. Одержати робочу формулу для розрахунку коефіцієнта в'язкості методом Стокса.
5. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт в'язкості?

Список літератури

1. Зачек І.Р. Курс фізики / І.Р.Зачек І.М. Кравчук, Б.М. Романишин В.М.Габа, Ф.М.Гончар. - Львів: „Бескид Біт”.-2002, С.76-78.- 376 с.
2. Трофимова Т.Н. Курс фізики. - М.: Высшая. школа., 1990.- С.45-53.- 478 с.
3. Чолпан П.П. Фізика.- Київ: Вища школа 2003. С.96-99.- 567 с.
4. Бушок Г.Ф. Курс фізики Кн.1 / Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер.- К.: Вища школа.-2003.- С.77-88. - 311 с.

Інструкцію склав доцент кафедри фізики Серпецький Б.О.
Відредагував, змінив і доповнив доцент кафедри фізики Манько В.К.
Затверджена на засіданні кафедри протокол № 3 від 01.12.2009 р.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4.1. ПРУЖНИЙ УДАР КУЛЬ

МЕТА РОБОТИ: вивчення законів збереження механічної енергії та імпульсу.

ПРИЛАДИ: дві металеві кулі підвішені на легких стержнях, генератор імпульсів, лічильник імпульсів ПСО 2-2ЕМ.

5.1 Коротка теорія пружного удару

Ударом називається процес кінцевої зміни швидкостей тіл за відносно короткий час їх взаємодії. При абсолютно пружному ударі кінетична енергія руху тіл перетворюється в потенціальну енергію деформації, яка потім повністю знову перетворюється в кінетичну енергію. При такому ударі виникає абсолютно пружна деформація, коли форма і розміри тіл повністю відтворюються. Теплова (не механічна) енергія при такому ударі не виділяється, а отже система консервативна і замкнута (робота зовнішніх сил дорівнює нулю). В таких системах виконується закон збереження як імпульсу, так і механічної енергії.



Рисунок 5.1

Розглянемо пружний центральний удар. Запишемо рівняння збереження імпульсу та енергії:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (5.1)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}. \quad (5.2)$$

При відомих масах тіл m_1 і m_2 та швидкостях v_1 і v_2 перед ударом знайдемо швидкості u_1 та u_2 після удару. Для цього рівняння представимо у вигляді

$$m_1 (v_1 - u_1) = m_2 (v_2 - u_2), \quad (5.3)$$

$$m_1 (v_1 - u_1) \cdot (v_1 + u_1) = m_2 (v_2 - u_2) \cdot (v_2 + u_2) \quad (5.4)$$

$$v_1 + u_1 = v_2 + u_2 \quad (5.5)$$

помноживши (5.5) на m_2 і віднімаючи з (5.3), отримуємо:

$$u_1 = \frac{2m_2v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad (5.6)$$

а помноживши (9.5) на m_1 та додаючи до (9.3), отримуємо:

$$u_2 = \frac{2m_1v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}. \quad (5.7)$$

Розглянемо такий випадок: маси тіл однакові $m_1 = m_2$ і одна із куль не рухається $v_2 = 0$. Із (5.6) і (5.7) одержуємо $u_1 = v_2$; $u_2 = v_1$. Це означає, що тіла обмінюються швидкостями.

Схема установки показана на рисунку 5.2. Дві однакові сталеві кулі масою $m_1 = m_2 = 0,6$ кг. Закріплені на металевих стержнях довжиною $l = 0,72$ м. Відхилимо одну кулю від положення рівноваги на кут φ . Потенціальна енергія $E_n = mgh$. Після відпускання кулі ця енергія повністю переходить в кінетичну :

$$E_n = E_k = \frac{mv_1^2}{2},$$

звідки

$$v_1 = \sqrt{2gh}. \quad (5.8)$$

З $\triangle ABC$ випливає, що $h = l(1 - \cos\varphi) = 2l \sin^2\varphi / 2$. Тоді швидкість першої кулі до удару

$$v_1 = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\varphi}{2} \quad (5.9)$$

Швидкість другої кулі до удару $v_2 = 0$. Внаслідок пружного удару перша куля зупиняється і її швидкість після удару $u_1 = 0$. Друга куля після удару починає рухатись з швидкістю $u_2 = v_1$, тобто кулі під час удару обмінюються швидкостями.

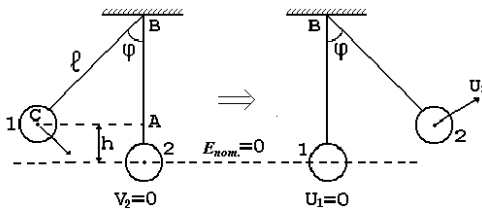


Рисунок 5.2

Імпульс кулі до удару p , Силу взаємодії куль F , кінетичну енергію кулі напередодні удару E_k , можна визначити за формулами:

$$p = 2m\sqrt{gl} \sin \frac{\varphi}{2} \quad (5.10)$$

$$F = \frac{p}{\tau} \quad (5.11)$$

$$E_k = 2mgl \left(\sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 \quad (5.12)$$

де m – маса кулі, τ – тривалість удару, φ – кут, на який відхиляється куля, g – прискорення вільного падіння, l – довжина підвісу.

Тривалість удару куль τ залежить від кута φ

$$\tau = c \cdot \varphi^k, \quad (5.13)$$

де c – постійна величина, залежна від пружних якостей речовин, $k = 0,3 \div 0,5$ – показник степені. Логарифмічна залежність $\ln \tau = f(\ln \varphi)$ дає пряму лінію

$$\ln \tau = \ln c + k \cdot \ln \varphi \quad (5.14)$$

тангенс кута нахилу якої дорівнює k .

Тривалість удару кульок τ визначається згідно методу, який ґрунтується на вимірюванні тривалості електричного контакту при зіткненні кульок. Принципова схема установки показана на рисунку 5.3. П - імпульси з періодом T від генератора передаються в лічильник через електричний контакт між кулями. За час удару (час електричного контакту) встигає пройти N імпульсів. Ясно, що $\tau = T \cdot N$. Період T знаходиться по кількості імпульсів N_0 , які фіксує лічильник за відомий час експозиції t

$$T = t/N_0.$$

Тоді час удару

$$\tau = t \cdot N/N_0. \quad (5.15)$$

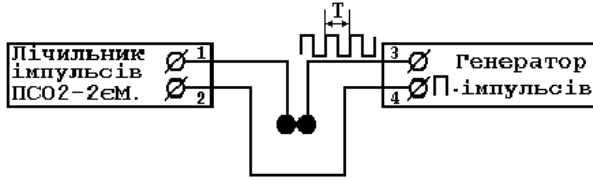


Рисунок 5.3

5.2 Порядок виконання роботи

1. Увімкнути лічильник ПСО2-2ЄМ і генератор в мережу.
2. На панелі лічильника натиснути кнопку “N” і вибрати експозицію t , натиснувши одну із кнопок “1с”, “3с” і т.д.
3. Забезпечивши електричний контакт між кулями натиснути кнопку “Сброс”, а потім “Пуск”. На цифровому індикаторі лічильника висвітиться число імпульсів N_o , які за час t потрапили через кулі від генератора під час дотику. Записати значення t і N_o в таблицю 5.1.
4. Повторити вимірювання ще чотири рази відповідно до пункту 3.

Таблиця 5.1

№	t, c	$N_o, \text{імп.}$	$\Delta N_o, \text{імп.}$	$(\Delta N_o)^2, \text{імп}^2$
1				
2				
3				
4				
5				
		$\bar{N}_o =$		$\Sigma(\Delta N_o)^2 =$

5. Відтиснути кнопку “Експозиция”. Натиснути кнопку “Сброс”, відвести ліву кулю на кут $\varphi = 14^\circ$. Натиснути кнопку “Пуск”, але так як електричний контакт розірваний, імпульси від генератора до лічильника не проходять. Відкоригувати по шкалі кут відхилення і приготуватись натиснути кнопку “Пуск”. Відпустити кулю і після одного удару натиснути кнопку “Стоп” та візуально замітити по шкалі максима-

льний кут β відхилення другої кулі після удару. Лічильник зафіксує кількість імпульсів N , що встигли пройти за час удару. Записати значення β і N в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2

φ , град	β	N , імп	τ , с	\ln τ	\ln φ	F , Н	P_0 кг·м/с	P кг·м/с	$E_{к0}$ Дж	E_k Дж
14										
12										
10										
8										
6										
4										
2										

6. Повторити вимірювання відповідно пункту 5 для кутів відхилення 12° , 10° , 8° , 6° , 4° , 2° . Результати занести в таблицю 5.2. Вимкнути прилади.

7. Розрахувати тривалість τ удару куль за (5.15), підставляючи середнє значення N_0 ; силу удару F за (5.11); імпульс до удару P_0 за (5.10); кінетичну енергію $E_{к0}$ за (5.12). Для розрахунку після удару імпульсу P і кінетичної енергії E_k у (5.10) і (5.12) кут φ замінити на кут β .

8 Розрахувати $\ln \tau$ і $\ln \varphi$ та побудувати графік залежності $\ln \tau$ від $\ln \varphi$. На прямолінійному участку графіка, а не із таблиці, вибрати дві точки, координати яких легко визначити по масштабованим осям координат, і розрахувати показник степені k за формулою

$$k = \frac{\ln \tau_1 - \ln \tau_2}{\ln \varphi_1 - \ln \varphi_2} \quad (5.16)$$

9. Знайти похибку вимірювання N_0 як для багатократних прямих вимірювань. Інструментальна похибка лічильника 1 імпульс, а похибка зчитування із цифрового приладу дорівнює нулю.

10. У висновку порівняти розрахункове значення k з теоретичним, а також зробити висновок щодо виконання законів збереження механічної енергії та імпульсу, співставивши їх значення до та після удару.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називається ударом?
2. Який удар називається абсолютно пружним?
3. Які системи називаються консервативними?
4. Сформулювати закон збереження імпульсу.
5. Сформулювати закон збереження механічної енергії.
6. Записати закон збереження імпульсу для центрального абсолютно пружного удару куль.
7. Записати закон збереження механічної енергії для центрального абсолютно пружного удару куль.
8. Вивести формули для визначення швидкостей куль після абсолютно пружного удару.

Список літератури

1. Зачек І.Р. Курс фізики / І.Р.Зачек І.М. Кравчук, Б.М. Романишин В.М.Габа, Ф.М.Гончар.- Львів: „Бескид Біт”.-2002, С.8-15.-376 с.
2. Трофимова Т.Н. Курс фізики. - М.: Высшая. школа., 1990.- С.13-27.- 478 с.
3. Чолпан П.П. Фізика.- Київ: Вища школа 2003. С.50-59.71-74.- 567 с.
4. Бушок Г.Ф. Курс фізики Кн.1 / Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер.- К.: Вища школа.-2003.- С.77-88. - 311 с.

Інструкцію склав доцент кафедри фізики Манько В.К.

Рецензент: старший викладач Работкіна О.В.

Затверджена на засіданні кафедри фізики, протокол № 3 від 01.12.2008 р.

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4.2. ПРУЖНИЙ І НЕПРУЖНИЙ УДАРИ КУЛЬ

МЕТА РОБОТИ Визначити коефіцієнти пропорційності в законах збереження імпульсу і механічної енергії при пружному і непружному співударяннях куль і порівняти їх експериментальні значення з теоретичними.

ОБЛАДНАННЯ - Дві кулі.

6.1 Основні положення

Ударом називається зіткнення тіл, при якому за дуже короткий проміжок часу відбувається значна зміна швидкостей тіл.

Під час удару тіла зазнають деформації. Кінетична енергія відносного руху тіл, що співударяються, па короткий час перетворюється в енергію пружної деформації. При ньому має місце перерозподіл енергії між тілами, що співударяються.

Якщо після зіткнення в обох взаємодіючих тілах не залишається ніяких деформацій і уся кінетична енергія, яку вони мали до удару, знову перетворюється в їх кінетичну енергію, то таке зіткнення називається **абсолютно пружним ударом**.

Якщо в результаті зіткнення двох тіл деформація не зникає й обидва тіла, об'єднуючись, рухаються далі як єдине тіло, то таке зіткнення називається **абсолютно непружним ударом**.

Пряма, що проходить через точку дотику тіл і нормальна до їхніх поверхонь, називається лінією удару. Якщо лінія удару проходить через центри мас обох тіл, то удар називається **центральною**. Прикладом прямого центрального удару може бути зіткнення двох підвішених па нитках куль у момент проходження ними положення рівноваги.

При абсолютно пружному й абсолютно непружному ударах викопуються закони збереження імпульсу й енергії.

Взагалі законами збереження є фундаментальні закони, згідно з якими за певних умов деякі фізичні величини не змінюються з часом, тобто зберігаються.

Закон збереження і перетворення енергії - загальний закон природи, згідно з яким енергія будь-якої замкнутої системи при всіх процесах, що відбуваються в системі, не змінюється з часом (залишається

сталою, зберігається). При цьому енергія може тільки перетворюватися з однієї форми в іншу та перерозподілятися між частинами системи.

Закон збереження імпульсу є закон механіки, згідно з яким сумарний імпульс всіх тіл в будь-якій замкнутій системі при всіх процесах, що відбуваються в системі, не змінюється з часом (залишається сталим, зберігається). Імпульс може перерозподілятися між частинами системи в результаті їхньої взаємодії. Запишемо їх для випадку прямого центрального удару підвішених двох куль.

Закон збереження імпульсу:

а) для абсолютно пружного удару

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2,$$

або в проекції на вісь $O X$, що збігається з лінією удару,

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (6.1)$$

б) для абсолютно непружного удару

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u. \quad (6.2)$$

Закон збереження енергії:

а) для абсолютно пружного удару

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad (6.3)$$

б) для абсолютно не пружного удару

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) u^2}{2} + \Delta W, \quad (6.4)$$

де ΔW величина механічної енергії куль, що перейшла в їхню внутрішню енергію. У випадку, якщо одна із куль (наприклад, із масою m_2) перед зіткненням знаходилася в спокої, то вирази (6.1), (6.2), (6.3) і (6.4) набудуть вигляду:

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (6.5)$$

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) u, \quad (6.6)$$

$$m_1 v_1^2 = m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2, \quad (6.7)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) u^2}{2} + \Delta W. \quad (6.8)$$

Проте досвід показує, що відносна швидкість тіл після удару не досягає свого колишнього значення. Це пояснюється тим, що немає ідеально пружних тіл і ідеально гладких поверхонь. Крім того, системи реальних тіл не бувають абсолютно замкнутими.

У застосуванні до реальних тіл рівняння (6.5), (6.6), (6.7) і (6.8) можуть бути записані тільки з відповідними коефіцієнтами пропорційності:

$$m_1 v_1 K_{inp} = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (6.9)$$

$$m_1 v_1 K_{inепр} = (m_1 + m_2) u, \quad (6.10)$$

$$m_1 v_1^2 K_{епр} = m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2, \quad (6.11)$$

$$m_1 v_1^2 K_{енепр} = (m_1 + m_2) u_2^2. \quad (6.12)$$

Індекси при коефіцієнтах K означають: *inp* - для імпульсу при пружному ударі; *inепр* - для імпульсу при непружному ударі; *епр* - для енергії при пружному ударі; *енепр* - для енергії при непружному ударі.

Оцінімо величину введених коефіцієнтів K для випадку, що реалізується в нашому лабораторному пристрої.

Система застосовуваних куль слабо взаємодіє з навколишніми тілами (через повітря, нитку підвісу і т. п.), тому "втрати" імпульсу й енергії при пружному ударі будуть незначними і коефіцієнти K_{inp} , $K_{inепр}$, $K_{епр}$ повинні бути трохи меншими одиниці. При непружному ударі у внутрішню енергію переходить значна частина початкової кінетичної енергії і коефіцієнт $K_{енепр}$ повинен значно відрізнятись від 1. (Легко показати, що при $m_1 = m_2$ ідеальний коефіцієнт $K_{енепр} = 0.5$. Для цього потрібно розв'язати спільно рівняння (6.10) і (6.12), враховуючи, що $K_{inепр} = 1$. Довівши експериментально, що K_{inp} , $K_{inепр}$, $K_{епр}$ трохи менші за 1, а значення $K_{енепр}$ значно відрізняється від 1, ми тим самим підтвердимо справедливості рівностей (6.9), (6.10), (6.11) і (6.12) (у межах похибок виміру), а отже підтвердимо і закони збереження імпульсу й енергії при співударанні реальних тіл.

Зведемо вирази (6.9), (6.10), (6.11) і (6.12) до вигляду, зручному для обчислення коефіцієнтів K . Розглянемо рис.6.1, куля масою m_2 знаходиться в стані спокою, а масою m_1 - відведена від положення рів-

новаги на кут α_1 (умовимося позначати кути до взаємодії куль через α , а після взаємодії - через β ; індекси: 1 для першої кулі, 2 - для другої).

Куля 1 одержить потенціальну енергію

$$E_1 = m_1 g h_1 = m_1 g (l - l \cos \alpha_1) = m_1 g l (1 - \cos \alpha_1),$$

яка під час руху кулі перейде в його кінетичну енергію. В момент удару

$$m_1 g l (1 - \cos \alpha_1) = m_1 v_1^2 / 2,$$

звідки

$$v_1 = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha_1)} = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_1}{2}.$$

Якщо кут α_1 малий ($< 10^\circ$), то $\sin \frac{\alpha_1}{2} \approx \frac{\alpha_1}{2}$ (при вимірі кута в радіанах) і тоді $v_1 \approx \alpha_1 \sqrt{gl}$. Після удару куля 2 масою m_2 одержить швидкість u_2 і відхилиться на кут β_2 . Аналогічно до вищевикладеного можемо одержати

$$u_2 \approx \beta_2 \sqrt{gl}.$$

Куля 1 після удару також відхилиться на деякий кут β_1 . Тоді

$$u_1 \approx \beta_1 \sqrt{gl}.$$

Підставивши значення v_1 , u_1 і u_2 в (6.9), (6.10), (6.11) і (6.12) і розв'язавши рівняння відносно K , одержимо

$$K_{inp} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} + \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\beta_2}{\alpha_1},$$

$$K_{inенр} = \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \cdot \frac{\beta_2}{\alpha_1},$$

$$K_{енр} = \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1}\right)^2 + \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{\beta_2}{\alpha_1}\right)^2,$$

$$K_{ененр} = \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \cdot \left(\frac{\beta_2}{\alpha_1}\right)^2.$$

Якщо маси куль узяти приблизно однаковими ($m_1 \approx m_2$), то кут відхилення β_1 , кулі масою m_1 буде дуже малим і ним можна знехтувати ($\beta_1 = 0$) Тоді одержимо

$$K_{inp} = \frac{\beta_2}{\alpha_1}, \quad (6.13)$$

$$K_{inеп} = 2 \cdot \frac{\beta_2}{\alpha_1}, \quad (6.14)$$

$$K_{еп} = \left(\frac{\beta_2}{\alpha_1} \right)^2, \quad (6.15)$$

$$K_{енеп} = 2 \cdot \left(\frac{\beta_2}{\alpha_1} \right)^2. \quad (6.16)$$

Обчислення коефіцієнтів K за формулами (6.13) ÷ (6.16), зіставлення їх значень із теоретичними для замкнених систем і одержання певних висновків складає основу даної лабораторної роботи.

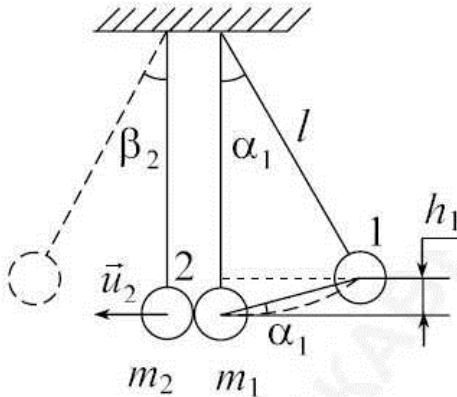


Рисунок 6.1

6.2 Порядок виконання роботи

1. За допомогою терезів переконайтеся, що маси куль приблизно однакові.
2. Підвісьте на нитках дві кулі для одержання пружного удару. Відрегулюйте їх взаємне положення так, щоб удар був прямим і центральним.

3. Відхиліть праву кулю на кут α_1 , прикріпивши її до електромагніту. Виміряйте і запишіть величину кута α_1 (у градусах) у таблицю з врахуванням похибки на нуль. Здійсніть пружний удар куль, відімкнувши живлення електромагніту. Визначте кут β_2 відхилення лівої кулі (з урахуванням похибки на нуль) і запишіть його значення в таблицю 10.1.
4. Дослід проведіть 5 разів. Результати вимірювань запишіть у таблицю.
5. Поверніть кулі, підвішені на нитках так, щоб одержати непружний удар ("липучками" один до одного). Відхиліть праву кулю на кут α_1 , прикріпивши її до електромагніту. Занесіть значення кута α_1 до таблиці.
6. Здійсніть непружний удар куль. Визначте кут β_2 відхилення системи по лівій кулі (з врахуванням похибки на нуль) і запишіть його значення в таблицю.
7. Дослід проведіть п'ять разів, записуючи дані в таблицю.
8. За формулами (6.13), (6.14), (6.15) і (6.16) обчисліть значення коефіцієнтів K за середніми значеннями кутів α_1 і β_2 .
9. Оцініть похибки непрямих вимірювань коефіцієнтів K . (Розрахункові формули для цього одержіть відповідним методом для непрямих вимірювань).
10. Зробіть висновки про підтвердження законів збереження імпульсу й енергії у явищі, що вивчається. Висновки обґрунтуйте.

Таблиця 6.1

№	Пружний удар			Непружний удар		
	α_1 , градус	β_2 , градус	$\Delta\alpha, \Delta\beta$, градус	α_1 , градус	β_2 , градус	$\Delta\alpha, \Delta\beta$, градус
1						
2						
3						
4						
5						
Середне	$K_{\text{пр}} =$			$K_{\text{непр}} =$		
	$K_{\text{епр}} =$			$K_{\text{енепр}} =$		

Контрольні запитання

- 1 Чим характерний пружний центральний удар куль?
- 2 Чим характерний непружний центральний удар куль?
- 3 Сформулюйте закон збереження імпульсу і запишіть його, застосувавши до пружного та попружного ударів куль.
- 4 Сформулюйте закон збереження енергії і запишіть його, застосувавши до пружного і непружного ударів куль.
- 5 Що показують коефіцієнти пропорційності у формулах (6.9). (6.10), (6.11) і (6.12)?
- 6 Виведіть формули для розрахунку похибок непрямих вимірювань коефіцієнтів K у законах збереження.

Список літератури

- 1.Зачек І.Р. Курс фізики / І.Р.Зачек І.М. Кравчук, Б.М. Романишин В.М.Габа, Ф.М.Гончар.- Львів: „Бескид Біт”.-2002, С.8-15.-376 с.
- 2.Трофимова Т.Н. Курс фізики. - М.: Высшая. школа., 1990.- С.13-27.- 478 с.
3. Чолпан П.П. Фізика.- Київ: Вища школа 2003. С.50-59.71-74.- 567 с.
4. Бушок Г.Ф. Курс фізики Кн.1 / Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер.- К.: Вища школа.-2003.- С.77-88. - 311 с.

Інструкцію підготувала старший викладач кафедри фізики Работкіна О.В.

Рецензент - доцент кафедри фізики Манько В.К.

7. НЕПРУЖНИЙ УДАР ТІЛ

7.1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4.3.1

МЕТА РОБОТИ: перевірка законів збереження механічної енергії та імпульсу.

ПРИЛАДИ: два металевих циліндри підвішені на легких стержнях, кутова шкала.

7.1.1 Коротка теорія непружного удару

Ударом називається процес кінцевої зміни швидкостей тіл за відносно короткий час їх взаємодії. При абсолютно непружному ударі має місце абсолютно пластична деформація, коли набуті при деформації форма і розміри тіл повністю зберігаються після припинення дії сил. Кінетична енергія руху тіл перетворюється частково в тепло і частково в кінетичну енергію. Система замкнута (робота зовнішніх сил дорівнює нулю) і дисипативна. В таких системах виконується закон збереження імпульсу, а закон збереження механічної енергії не виконується, так як частина її перетворюється в немеханічну енергію – тепло. Але закон збереження усіх видів енергії для замкнутих систем виконується.

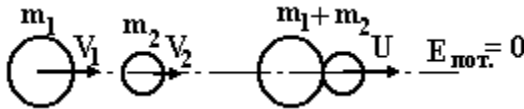


Рисунок 7.1

Розглянемо непружний центральний удар (рис. 7.1). Після удару тіла рухаються як одне ціле, тобто швидкість U обох тіл після удару однакова. Запишемо рівняння збереження імпульсу та енергії, прийнявши до уваги, що при пластичній деформації виділяється тепло Q :

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) \cdot U, \quad (7.1)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) U^2}{2} + Q \quad (7.2)$$

При відомих масах тіл m_1 і m_2 та швидкостях v_1 і v_2 перед ударом знайдемо швидкість U після удару та кількість теплоти Q .

$$U = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}, \quad (7.3)$$

$$Q = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) U^2}{2}. \quad (7.4)$$

Наслідок: Якщо маси тіл однакові і одне із тіл, наприклад друге, не рухається, то після удару $U = 0,5v$, тобто швидкість тіл зменшиться в два рази, а в тепло перетвориться половина початкової кінетичної енергії

$$Q = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{(2m)U^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{(2m)}{2} \cdot \left(\frac{v_1}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{mv_1^2}{2}. \quad (7.5)$$

У роботі розглядається непружний удар двох тіл однакової маси, які підвішені на стержнях (рис. 7.2). Кути відхилення стержнів вимірюються по шкалі. Маси тіл M і стержнів m , а також довжини стержнів L однакові.

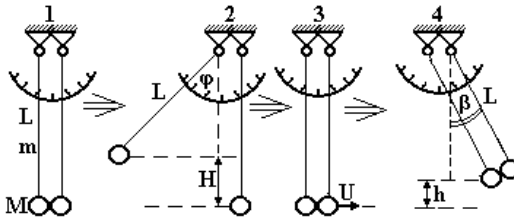


Рисунок 7.2

При відхиленні стержня з вантажем на кут φ центр ваги тіла піднімається на H , а стержня на $H/2$. Їхня потенціальна енергія зростає на величину

$$\Delta E_{\text{пот}} = MgH + 0,5mgH = (M + 0,5m)gH(1 - \cos\varphi) = 2(M + 0,5m)gH \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (7.6)$$

В момент проходження тілом нижнього положення, тобто перед ударом ця потенціальна енергія, у відповідності із законом збереження механічної енергії, (якщо знехтувати опором повітря та силою тер-

тя у підвісі), перетвориться у кінетичну енергію обертання перед ударом

$$E_o = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} \left(ML^2 + \frac{1}{3} mL^2 \right) \cdot \left(\frac{v}{L} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(M + \frac{1}{3} m \right) v^2. \quad (7.7)$$

Тут J – сума моментів інерції вантажу ML^2 (як матеріальної точки) і стержня $\frac{1}{3} mL^2$ відносно точки підвісу; $\omega = \frac{v}{L}$ – кутова швидкість обертання; v – швидкість вантажу перед ударом.

Приврівняючи праві частини рівнянь (7.6) і (7.7), знайдемо швидкість в залежності від кута відхилення

$$v = 2 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \sqrt{\frac{M + \frac{1}{2} m}{M + \frac{1}{3} m}} \cdot g \cdot H. \quad (7.8)$$

Після удару тіла рухаються як одне ціле. Тому, щоб знайти швидкість U та кінетичну енергію E після удару, у формулах (7.7) і (7.8) M і m замінемо відповідно на $2M$ і $2m$, а кут φ на кут β відхилення після удару

$$U = 2 \cdot \sin \frac{\beta}{2} \sqrt{\frac{2M + m}{2M + \frac{2}{3} m}} \cdot g \cdot H = v \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}}. \quad (7.9)$$

$$E = \frac{1}{2} \left(2M + \frac{1}{3} 2m \right) U^2. \quad (7.10)$$

Відносна втрата механічної енергії на тепло із (7.7) ÷ (7.10)

$$\frac{Q}{E_o} = \frac{E_o - E}{E_o} = 1 - \frac{E}{E_o} = 1 - \frac{2U^2}{v^2} = 1 - \frac{2 \sin^2 \frac{\beta}{2}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2}}. \quad (7.11)$$

7.1.2 Порядок виконання роботи № 4.3.1

1. Розрахувати початковий кут відхилення $\varphi = 15 + 3N$ у градусах. для першої половини групи, або $\varphi = 3N$ для другої половини групи. N – номер підгрупи студентів.

2. Для забезпечення непружного характеру удару на контактуючих поверхнях тіл із пластиліну сформувати невеличку гірку.

3. Відхилити один із стержнів на розрахований кут φ і відпустити. По шкалі кутів зафіксувати кут відхилення β після удару.
4. Повторити п.3 ще чотири рази (всього буде 5), слідкуючи, щоб після удару тіла за рахунок деформації пластиліну злипались. Результати вимірювань занести в таблицю 7.1.

Таблиця 7.1

№	φ	β_i	$\Delta\beta_i$	$\Delta\beta_i^2$	$\sin \frac{\varphi}{2}$	$\sin \frac{\bar{\beta}}{2}$	$\sin^2 \frac{\varphi}{2}$	$\sin^2 \frac{\bar{\beta}}{2}$
		$\bar{\beta} =$		$\sum \Delta\beta_i^2 =$				

5. Розрахувати величини, вказані в таблиці, а також похибку $\Delta\beta$ вимірювання кута β .
6. За формулою (7.11) знайти відносну втрату механічної енергії, одержану експериментально. При виконанні закону збереження енергії вона повинна дорівнювати теоретичному значенню 0,5 (див. наслідок).
7. Порівняти значення $\sin \frac{\varphi}{2}$ і $2 \sin \frac{\bar{\beta}}{2}$. Якщо закон збереження імпульсу виконується, то, згідно з (7.9) та наслідком, вони повинні бути однаковими.
8. Зробити висновок щодо виконання законів збереження імпульсу та енергії.

Інструкцію склав доцент кафедри фізики Манько В.К.

Рецензент: старший викладач кафедри фізики Работкіна О.В.

Затверджена на засіданні кафедри фізики,
протокол № 3 від 01.12.2008 р.

7.2.ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4.3.2

МЕТА РОБОТИ: визначити енергію розсіяну при непружному ударі і перевірити закон збереження імпульсу.

ПРИЛАДИ: два металевих циліндра, закріплені на жорстких підвісах, шкала куто-вих відхилень підвісів.

7.2.1 Методика вимірювання

У роботі розглядається непружний удар двох тіл однакової маси підвішених на стержнях до загальної осі коливань. Якщо до удару одне з них нерухоме, то після удару, внаслідок з'єднання, вони рухаються як одне тіло. При цьому повинен зберігатися імпульс системи

$$m_1V_1 + m_2V_2 = (m_1 + m_2)U \quad (7.12)$$

де: m_1 та m_2 - маси тіл; V_1 та V_2 - їх швидкості до удару ($V_2 = 0$); U - швидкість системи тіл після удару. Швидкість першого тіла до удару визначається запасом потенціальної енергії, яку має тіло відведене від стану рівноваги на кут α , рисунок 7.3.

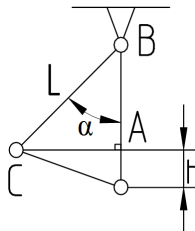


Рисунок 7.3.

$$V_1 = \sqrt{2gh} \quad (7.13)$$

де: h – висота підйому тіла, яка визначається з трикутника ABC, рисунок 7.3 звідки:

$$\frac{L - h}{L} = \cos \alpha$$

$$h = L(1 - \cos \alpha) = 2L \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (7.14)$$

де: L - довжина підвісу тіла.

Таким чином, співвідношення (7.13) і (7.14) визначають імпульс тіла до удару:

$$p_1 = m_1 v_1 = 2m_1 \sqrt{gL} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (7.15)$$

імпульс системи після удару можна визначити аналогічно (7.15) в залежності від кута відхилення центру маси системи від стану рівноваги

$$p_{1,2} = (m_1 + m_2)u = 2(m_1 + m_2)\sqrt{gL} \sin \frac{\beta}{2} \quad (7.16)$$

Кінетична енергія системи при непружному ударі не зберігається. Відносна втрата енергії при непружному ударі визначається з (7.15) та (7.16) в такому співвідношенні:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{m_1 + m_2}{m_1} \left(\sin \frac{\beta}{2} / \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2 \quad (7.17)$$

де α, β - кути відхилення маятника до і після удару

Теоретичне значення відносної втрати енергії для умов дослідів дорівнює:

$$\frac{\Delta E_{\text{нп}}}{E_1} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (7.18)$$

7.2.2 Порядок виконання роботи 4.3.2

1. В роботі вимірюються кути відхилення маятника до і після удару і визначаються імпульси тіл до і після удару, а також втрата кінетичної енергії при непружному ударі. Під час проведення дослідів задається початковий кут відхилення маятника (наприклад $1=(15 + 3N)$), де $N = (1 - 6)$ - номер підгрупи студентів вимірюється кут відхилення маятника після удару - 2.

2. Результати 5-ти кратких вимірювань занести в таблицю 7.2.

3. Проведені вимірювання дозволяють використовуючи (7.15), (7.16), (7.17) при $m_1 = m_2 = 0,25$ кг обчислити імпульс тіл до та після

удару, а також відносну втрату енергії при непружному ударі. Для порівняння обчислюється теоретична частка втрат енергії за (7.18).

Таблиця 7.2

	α	β_i	$\bar{\beta} - \beta_i$	$(\bar{\beta} - \beta_i)^2$	$P_1,$ кг·м/с	$P_{1,2},$ кг·м/с	$\left(\frac{\Delta E}{E_1}\right)$	α $\left(\frac{\Delta E}{E_1}\right)_n$
1								
2								
3								
4								
5								
—	—	$\bar{\beta} =$	—	$\sum(\bar{\beta} - \beta_i)^2$	—	—	—	—

4. Для перевірки закону збереження імпульсу оцінюємо погрішність вимірювань. Використовуючи (7.16), знаходимо відносну погрішність вимірювання імпульсу системи після удару:

$$E = \frac{\Delta P_{1,2}}{P_{1,2}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m_1 + \Delta m_2}{m_1 + m_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{2g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{2L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{2} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}\right)^2} \quad (7.19)$$

де: похибка вимірювання $\Delta \beta$ визначається в радіанах; Δm - визначаються як похибка табличної величини. Абсолютна погрішність імпульсу визначається $\Delta P_{1,2} = E P_{1,2}$. Перевірка закону збереження

імпульсу здійснюється при виконанні рівняння:

$$P_1 \pm \Delta P_1 = P_2 \pm \Delta P_2 \quad (7.20)$$

При умовах, які розглядаються, погрішність визначається в основному погрішністю куткових відхилень, тоді можна прийняти

$\Delta P_1 = 0,5\Delta P_2$. Закон збереження імпульсу запишеться:

$$P_1 = P_2 \pm 1,5\Delta P_2 \quad (7.21)$$

Виконавши перевірку умови (7.21), пропонується зробити висновок про виконання закону збереження імпульсу і про відповідність експериментальної і теоретичної величин втрат при непружному ударі.

Контрольні запитання

1. Що називається ударом?
2. Який удар називається абсолютно пластичним?
3. Які системи називаються замкнутими?
4. Сформулювати закон збереження імпульсу та енергії.
5. Вивести формули для визначення швидкостей куль після абсолютно непружного удару.
6. Записати зв'язок між силою та імпульсом.
7. Вивести формули для визначення швидкостей куль після абсолютно непружного удару.

Список літератури

- 1.Зачек І.Р. Курс фізики / І.Р.Зачек І.М. Кравчук, Б.М. Романишин В.М.Габа, Ф.М.Гончар.- Львів: „Бескид Біт”.-2002, С.8-15.-376 с.
- 2.Трофимова Т.Н. Курс фізики. - М.: Высшая. школа., 1990.- С.13-27.- 478 с.
3. Чолпан П.П. Фізика.- Київ: Вища школа 2003. С.50-59.71-74.- 567 с.
4. Бушок Г.Ф. Курс фізики Кн.1 / Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер.- К.: Вища школа.-2003.- С.77-88. - 311 с.

Інструкція складена проф. каф. фізики Ершовим А.В.
Рецензент доц. каф. фізики Золотаревський І.В.

Затверджена на засіданні кафедри протокол №7 від 19.06. 2017 р

8 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. ВИВЧЕННЯ ОСНОВНОГО ЗАКОНУ ДИНАМІКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

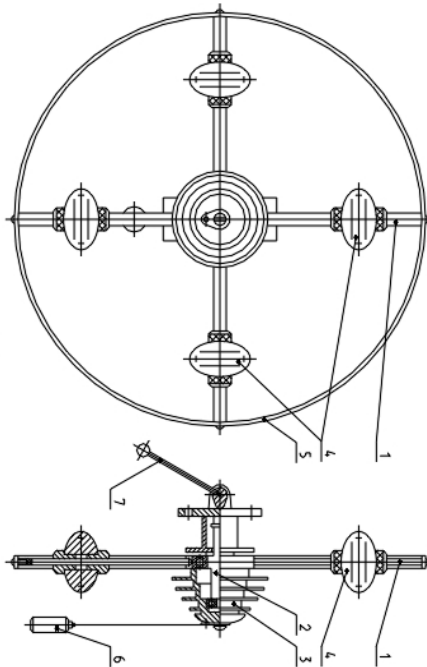
8.1 Опис устаткування та методу вимірювання

Основний закон динаміки обертального руху має вигляд.

$$M = I \cdot \varepsilon \quad (8.1)$$

де M – момент, діючих на тіло сил; I – момент інерції тіла відносно осі, навколо якої відбувається обертання; ε – кутове прискорення обертання тіла.

У цій роботі використовується хрестоподібний маятник – маятник Обербека, який дозволяє визначити параметри обертального руху. Схема устаткування представлена на рисунку 8.1.



1 - стержні; 2 – втулка; 3 - шків; 4 - тягарі; 5 – обруч; 6 - вантаж m_0 ; 7 - держак.

Рисунок 8.1 - Маятник Обербека

Хрестоподібний маятник складається з 4 стержнів (1), закріплених на втулці (2). Втулка яка переходить у шків (3) з різними радіусами r , що знаходяться на осі маятника. Вісь закріплена так, що вся система обертається навколо горизонтальної осі. На стержнях установлені тягарі m , які можна переміщувати на різні відстані від осі обертання. Стержні скріплені обручем (5). На один із шківів намотується шнур з вантажем m_0 (6). При падінні m_0 шнур розмотується з шківів. В устаткуванні застосована система механічного гальма яка дозволяє державком (7) керувати початком руху m_0 , та його зупинкою. Шлях h , пройдений m_0 , вимірюють лінійкою.

Вимірюючи час t , протягом якого вантаж опускається на відстань h , можна знайти прискорення a :

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (8.2)$$

Прискорення a пов'язане з кутовим прискоренням ε співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} \quad (8.3)$$

де r – радіус шківів, з якого розмотується шнур. Таким чином:

$$\varepsilon = \frac{2h}{rt^2} \quad (8.4)$$

При рухові вантажу m_0 на нього діють дві сили: сила ваги m_0g та натяг шнура N , під дією яких вантаж падає з прискоренням a . Згідно другого закону Ньютона:

$$m_0g - N = m_0a \quad (8.5)$$

звідки

$$N = m_0(g - a) \quad (8.6)$$

де g – прискорення вільного падіння. Під дією натягу шнура маятник виконує прискорене обертання. Момент сили, діючий на маятник

$$M = N \cdot r = m_0(g - a)r \quad (8.7)$$

для устаткування, використаного у даній роботі

$$a \ll g,$$

($0,003 \text{ м/с}^2 \ll 9,8 \text{ м/с}^2$) тому значенням m_0ar можна знехтувати. Тоді

$$M = m_0 gr. \quad (8.8)$$

Використовуючи (8.1), (8.4), (8.8) одержуємо:

$$I = \frac{m_0 gr^2 t^2}{2h}. \quad (8.9)$$

З основного закону динаміки обертального руху (8.1) витікає, що кутове прискорення ε прямо пропорційне моменту сили при умові $I = \text{const}$

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{M_1}{M_2}. \quad (8.10)$$

Щоб змінити момент сили потрібно до шнура підвішувати вантажі з різними масами, або переносити шнур з одного шківця на інший. Якщо момент сили постійний ($M = \text{const}$), то кутове прискорення обернено пропорційне моменту інерції:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (8.11)$$

8.2 Порядок виконання роботи № 5.1

МЕТА РОБОТИ: визначити кутове прискорення та момент сил маятника при різних значеннях падаючого вантажу і постійному моменті інерції.

ПРИЛАДИ: хрестоподібний маятник, секундомір, штангенциркуль, лінійка.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

- Розрахувати моменти сил M та кутове прискорення ε при різноманітних значеннях падаючого вантажу.
- Побудувати графік залежності $\varepsilon = f(M)$.
- Визначити момент сили тертя $M_{\text{тр}}$ та момент інерції маятника I з одержаного графіка.
- Обчислити відносну похибку та півширину довірчого інтервалу $\Delta\varepsilon$.

1. Радіус великого шківця маятника r вказано у таблиці 8.1.

2. Одночасно увімкнути секундомір і повернути догори держак гальма.

3. Коли розмотається шнур зі шківів, вимкнути секундомір. Записати показання секундоміра у таблицю 8.1.
4. Виміряти висоту h падіння вантажу.
5. Повторити 4 рази виміри часу t згідно пунктам 2 ÷ 3.
6. Зменшити масу падаючого вантажу m_0 на одну складову частину і зробити один раз вимір часу падіння.
7. Повторити вимірювання згідно п. 2,3,6 послідовно зменшуючи масу падаючого вантажу до однієї складової частини.
8. Після закінчення вимірювань привести устаткування у початковий стан.

Таблиця 8.1

№	t, c	$m_0, кг$	$r, м$	$h, м$	ε, c^{-2}	$M, Н м$	Примітка
1			0,025				Вимірювання з повним вантажем.
2							
3							
4							
5							
6							Масу зменшимо на 1 частину,
7							на 2 частини,
8							на 3 частини,
							на 4 частини.

9. Розрахувати кутове прискорення ε згідно (8.4), використавши середнє значення часу для перших 5-ти вимірювань, а потім для наступних вимірів t .
10. Обчислити момент сил згідно (8.8).
11. Згідно (8.4) обчислити відносну похибку $\Delta\varepsilon / \varepsilon$. При цьому півширину довірчого інтервалу Δr і Δh визначити по формулі для одного виміру, а Δt по серії перших 5-ти вимірів.

Для штангенциркуля $\delta = 0,05$ мм, $\nu = 0,05$ мм; для лінійки – $\delta = 1$ см, $\nu = 0,5$ см; для секундоміра – $\delta = 0,1$ с. Обчисливши $\Delta\varepsilon / \varepsilon$, знайти півширину довірчого інтервалу $\Delta\varepsilon$. Результати обчислень похибок занести у таблицю 8.2.

12. Побудувати графік залежності $\varepsilon = f(M)$, відкладаючи по вісі абсцис M , а по вісі ординат – ε . Користуючись одержаним графіком, визначити момент сили тертя і інерції маятника. Графік залежності $\varepsilon = f(M)$ повинен перетинати вісь абсцис, положення точки перетину визначає величину моменту сил тертя, а котангенс кута нахилу графіка до вісі абсцис – момент інерції маятника.

Таблиця 8.2

№	$t_i,$ с	$\Delta t_i,$ с	$(\Delta t_i)^2,$ с ²	Півширина довірчого інтервалу				$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$
				$\Delta t,$ с	$\Delta h,$ м	$\Delta r,$ м	$\Delta\varepsilon,$ с ⁻²	
1								
2								
3								
4								
5								
	$\bar{t} =$		$\sum \Delta t_i^2 =$					

8.3 Порядок виконання роботи № 5.2

МЕТА РОБОТИ: визначити кутові прискорення та моменти сил маятника при різних значеннях радіусів шківів та постійному моменті інерції.

ПРИЛАДИ: хрестоподібний маятник, секундомір, штангенциркуль, лінійка.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

- Розрахувати кутові прискорення ε та моменти сил M при різних значеннях радіусів шківів маятника.
- Побудувати графік залежності $\varepsilon = f(M)$.

- Визначити момент сили тертя M_{mp} та момент інерції маятника I з одержаного графіка $\varepsilon = f(M)$.
- Обчислити відносну похибку $\Delta M / M$ та півширину довірчого інтервалу ΔM .
- Знайти півширину довірчого інтервалу Δt .

1. Радіус великого шківця маятника r та наступних шківців r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 вказано у таблиці 8.3.
2. Одночасно увімкнути секундомір і повернути догори держак гальма.
3. Верхній зріз вантажу m_0 повинен бути нижче рівня обручу маятника
4. Вимкнути секундомір в той момент, коли розмотається шнур зі шківця. Записати показання секундоміра.
5. Виміряти висоту h падіння вантажу.
6. Повторити 4 рази вимірювання часу t падіння вантажу згідно 2÷4.
7. Виміряти час падіння вантажу один раз на наступних шківцях маятника згідно п. 2 ÷ 4. Дані вимірювань занести в таблицю 8.3.

Таблиця 8.3

№	$t,$ $с$	$r,$ $м$	$m_0,$ $кг$	$h,$ $м$	$\varepsilon,$ $с^{-2}$	$M,$ $Н м$	Примітка
1		0,035					Вимірювання, коли шнур знаходиться на великому шківці.
2							
3							
4							
5							
6		0,03					Вимірювання на наступних шківцях.
7		0,025					
8		0,02					
9		0,015					

8. Розрахувати кутове прискорення ε за (8.4), використовуючи середнє \bar{t} для перших 5 вимірювань, а потім для наступних вимірювань t .
9. Обчислити момент сил за (8.8).
10. Виходячи з (8.8), обчислити відносну похибку $\Delta M / M$ для якогось одного вимірювання. При цьому півширину довірчого інтервалу Δr визначити за формулою для одиничного вимірювання, а для m_0 та

g – як для табличних величин. Обчислити півширину довірчого інтервалу для t за серією перших п'яти вимірювань.

Для штангенциркуля – $\delta = 0,05$ мм, $\nu = 0,05$ мм; лінійки – $\delta = 1$ см, $\nu = 0,5$ см; секундоміра – $\delta = 0,01$ с.

Обчисливши $\Delta M / M$, знайти півширину довірчого інтервалу ΔM . Результати обчислень похибок занести до таблиці 8.4.

Таблиця 8.4

№	$t,$ с	$\Delta t_i,$ с	$(\Delta t_i)^2,$ с ²	Півширина довірчого інтервалу					$\frac{\Delta M}{M}$
				$\Delta t,$ с	$\Delta r,$ м	$\Delta m,$ кг	$\Delta g,$ м/с ²	$\Delta M,$ Н м	
1									
2									
3									
4									
5									
	$\bar{t} =$		$\sum \Delta t_i^2 =$						

11. Побудувати графік залежності $\varepsilon = f(M)$, відкладаючи на вісь абсцис M , а на вісь ординат – ε .

12. Користуючись графіком, визначити момент сили тертя та момент інерції маятника. Графік залежності $\varepsilon = f(M)$ повинен перетинати вісь абсцис. Положення точки перетину визначає величину моменту сил тертя, а котангенс кута нахилу графіка к вісі абсцис – момент інерції маятника.

8.4 Порядок виконання роботи № 5.3

МЕТА РОБОТИ: визначити момент інерції 4-х вантажів, які знаходяться на стержнях маятника, динамічним та теоретичним методами.

ПРИЛАДИ: хрестоподібний маятник, секундомір, штангенциркуль, лінійка.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

- Визначити динамічним методом момент інерції чотирьох вантажів, які знаходяться на стержнях маятника.

- Визначити момент інерції чотирьох вантажів I'_e .
- Розрахувати відносну похибку $\Delta I / I$ та півширину довірчого інтервалу ΔI .
- 1. Виміряти один раз діаметр великого шківця маятника, знайти r .
- 2. Виміряти відстань R від осі обертання до центру ваги вантажів m , які знаходяться на стержнях маятника.
- 3. Одночасно ввімкнути секундомір і повернути догори держак гальма Верхній зріз вантажу m_0 повинен бути нижче обруча маятника.
- 4. Коли розмотається шнур зі шківця, вимкнути секундомір. Записати показання секундоміра у таблицю 8.5.
- 5. Виміряти висоту h падіння вантажу.
- 6. Повторити 4 рази виміри часу t згідно пунктам 3÷4.
- 7. Розрахувати момент інерції маятника I за (8.9).

Таблиця 8.5

№	t, c	\bar{t}, c	$m_0, кг$	$r, м$	$h, м$	$R, м$	$\bar{m}, кг$	$I, кг \cdot м^2$	$I_0, кг \cdot м^2$	$I'_e, кг \cdot м^2$
1				0,025						
2										
3										
4										
5										

8. Визначити динамічним методом момент інерції 4 вантажів I_e , які знаходяться на стержнях маятника.

$$I_e = k(I - I_0) \quad (8.12)$$

де $I_0 = 4,15 \cdot 10^{-2} кг \cdot м^2$, k – поправочний коефіцієнт ($k = 0,98$).

9. Обчислити теоретично момент інерції 4 вантажів I'_e за формулою

$$I'_e = 4\bar{m}R^2 \quad (8.13)$$

де \bar{m} – середнє арифметичне 4 вантажів.

10. Виходячи з (8.9), обчислити відносну похибку $\Delta I / I$. При цьому півширину довірчого інтервалу Δr і Δh визначити за формулою для одиничного вимірювання, Δm_0 та Δg – як для табличних величин, а для t обчислити за допомогою серії з 5 вимірювань.

Для штангенциркуля – $\delta = 0,05$ мм, $v = 0,05$ мм; лінійки – $\delta = 1$ см, $v = 0,5$ см; секундоміра – $\delta = 0,1$ с.

Обчисливши $\Delta I / I$, знайти півширину довірчого інтервалу ΔI .

Результати обчислень похибок занести у таблицю 14.6.

Таблиця 8.6

	t_i с	Δt_i с	$\Delta t_i^2, c^2$	Півширина довірчого інтервалу						
				Δt с	Δh м	Δr м	Δm_0 кг	Δg м/с ²		ΔI кг·м ²
1										
2										
3										
4										
5										
			$\Sigma \Delta t_i^2 =$							

Примітка: $m_0 = 0,5$ кг, $m_1 = 0,592$ кг, $m_2 = 0,591$ кг, $m_3 = 0,575$ кг, $m_4 = 0,592$ кг.

8.5 Порядок виконання роботи № 5.4

МЕТА РОБОТИ: визначити кутове прискорення та моменти інерції маятника при різних значеннях мас вантажів, які закріплені на стержнях маятника і постійному моменті сили.

ПРИЛАДИ: хрестоподібний маятник, штангенциркуль, секундомір, лінійка, комплект змінних вантажів, які закріплені на стержнях маятника.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

- Розрахувати моменти інерції I та кутове прискорення ε при різних значеннях мас вантажів закріплених на стержнях маятника.

- Побудувати графік залежності $\varepsilon = f(1/I)$.
- Обчислити відносну похибку $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ та півширину довірчого інтервалу $\Delta\varepsilon$.

1. Виміряти один раз діаметр великого шківця маятника, знайти r .
2. Виміряти відстань R від вісі обертання до центру ваги вантажів m які знаходяться на стержнях маятника.
3. Одночасно ввімкнути секундомір і повернути догори держак гальма Верхній зріз вантажу m_0 повинен бути нижче обруча маятника.
4. Коли розмотається шнур зі шківця, вимкнути секундомір. Записати показання секундоміра у таблицю 8.7.
5. Виміряти висоту h падіння вантажу.
6. Повторити 4 рази виміри часу t згідно пунктам 3÷4.
7. Зняти із стержнів перший комплект вантажу m_1 .
8. Взяти із запасного блоку другий комплект вантажів m_2 і встановити їх на тій же відстані R на якій знаходились вантажі m_1 .
9. Виміряти час падіння вантажу m_0 один раз згідно пунктам 3 ÷ 4.
10. Потім використовуючи третій комплект вантажів m_a і виконати вимірювання згідно пунктам 3 ÷ 8. Після вимірювань устаткування привести у початковий стан. Дані вимірювань занести до таблиці 8.8.
11. Розрахувати кутове прискорення ε за (4) , використавши середнє \bar{t} для перших 5 вимірювань, а потім для наступних вимірювань t .
12. Обчислити момент інерції I маятника за формулою

$$I = I_0 + 4\bar{m}R^2, \quad (8.14)$$

де $I_0 = 4,6 \cdot 10^{-2}$ кг/м² , \bar{m} – середнє арифметичне з 4-х вантажів.

13. Розрахувати значення $1/I$.
14. Згідно з (8.4), обчислити відносну похибку $\Delta\varepsilon/\varepsilon$. При цьому півширину довірчого інтервалу Δr і Δh визначити за формулою для одиничного вимірювання, а Δt за серією перших 5 вимірювань.

Для штангенциркуля – $\delta = 0,05$ мм, $v = 0,05$ мм; лінійки – $\delta = 1$ см, $v = 0,5$ см; секундоміра – $\delta = 0,01$ с.

Обчисливши $\Delta\varepsilon/\varepsilon$, знайти півширину довірчого інтервалу ΔE . Результати обчислень похибок занести у таблицю 8.7.

15. Побудувати графік залежності $\varepsilon = f(1/I)$, відкладаючи на осі абсцис $1/I$, а на вісі ординат ε .

Примітка. $m_{l_1} = 0,6$ кг, $m_{l_2} = 0,593$ кг, $m_{l_3} = 0,592$ кг, $m_{l_4} = 0,594$ кг, $m_{2_1} = 0,298$ кг, $m_{2_2} = 0,288$ кг, $m_{2_3} = 0,307$ кг, $m_{2_4} = 0,298$ кг, $m_{3_1} = 0,158$ кг, $m_{3_2} = 0,161$ кг, $m_{3_3} = 0,168$ кг, $m_{3_4} = 0,158$ кг.

Таблиця 8.7

№	t, c	\bar{m} кг	r, m	h, m	R, m	ε c^{-2}	I кг \cdot м 2	$1/I$ кг $^{-1} \cdot$ м $^{-2}$	Примітка
1			0,025						Виміри з першим комплектом вантажів,
2									
3									
4									
5									
6									друг. комп.
7									трет. комп.

Таблиця 8.8

№	t_i, c	$\Delta t_i, c$	$\Delta t_i^2, c^2$	Півширина довірчого інтервалу.				$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$
				$\Delta t, c$	$\Delta r, m$	$\Delta h, m$	$\Delta \varepsilon, c^{-2}$	
1								
2								
3								
4								
5								
	$\bar{t} =$		$\sum \Delta t_i^2 =$					

8.6 Порядок виконання роботи № 5.5

МЕТА РОБОТИ: визначити кутове прискорення та моменти інерції маятника при різних значеннях відстаней вантажів, які закріплені на стержнях маятника і постійному моменті сили.

ПРИЛАДИ: хрестоподібний маятник, штангенциркуль, секундомір, лінійка.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

- Розрахувати моменти інерції I та кутове прискорення ε при різних значеннях відстаней вантажів які закріплені на стержнях маятника.
- Побудувати графік залежності $I = f(R^2)$.
- Побудувати графік функції $\varepsilon = f(I)$.
- Обчислити відносну півширину довірчого інтервалу ΔI та відносну похибку $\Delta I / I$.
- Знайти півширину довірчого інтервалу для t .

1. Радіус великого шківця маятника r вказано у таблиці 8.9
2. Виміряти відстань R від вісі обертання до центру ваги вантажів m які знаходяться на стержнях маятника.
3. Одночасно ввімкнути секундомір і повернути догори держак гальма. Верхній зріз вантажу m_0 повинен бути нижче обруча маятника.
4. Коли розмотається шнур зі шківця, вимкнути секундомір. Записати показання секундоміра у таблицю 8.9.
5. Виміряти висоту h падіння вантажу.
6. Повторити 4 рази вимори часу t згідно пунктам 3 ÷ 4.
7. Пересунути вантажі m вздовж стержнів на сусідню позицію натиском кнопки, яка знаходиться на вантажі m .

Таблиця 8.9

№	t, c	R, m	R^2, m^2	$\overline{m}, кг$	h, m	r, m	ε, c^{-2}	$I, кг \cdot m^2$	Примітка
1						0,025			Виміри на першій позиції.
2									
3									
4									
5									
6									На наступних позиціях
7									
8									
9									

8. Виміряти відстань R .

9. Виміряти час падіння вантажу m_0 з тієї ж висоти h один раз згідно пунктам 3 ÷ 4.

10. Повторити виміри згідно пунктам 3 ÷ 9, послідовно переміщуючи вантажі m вздовж стержнів на позиції які залишилися.

11. Розрахувати кутове прискорення ε за (8.4), використавши середнє \bar{t} для перших 5 вимірювань, а потім для наступних вимірювань t .

12. Обчислити момент інерції маятника за формулою

$$I = I_0 + 4\bar{m}R^2, \quad (8.15)$$

де $I_0 = (3,95 \mp 0,12) \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, \bar{m} - середнє арифметичне 4-х вантажів.

13. Згідно (8.1), обчислити півширину довірчого інтервалу ΔI . При цьому півширину довірчого інтервалу ΔR визначити з формули для одиничного вимірювання, Δm - як для табличної величини, ΔI_0 - дано. Обчисливши ΔI , знайти відносну похибку $\Delta I / I$ для одного якогось досліду. Обчислити півширину довірчого інтервалу для t з серії перших 5 вимірювань.

Для штангенциркуля – $\delta = 0,05$ мм, $v = 0,05$ мм; лінійки – $\delta = 1$ см, $v = 0,5$ см; секундоміра – $\delta = 0,01$ с. Результати обчислень занести в таблицю 8.10.

Примітка: $m_1 = 0,625$ кг, $m_2 = 0,623$ кг, $m_3 = 0,659$ кг, $m_4 = 0,640$

Таблиця 8.10

№	$t_i, \text{с}$	$\Delta t_i, \text{с}$	$\Delta t_i^2, \text{с}^2$	Півширина довірчого інтервалу.			
				$\Delta t, \text{с}$	$\Delta R, \text{м}$	$\Delta m, \text{кг}$	$\Delta I, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
1							
2							
3							
4							
5							
	$\bar{t} =$		$\sum \Delta t_i^2 =$				

14. Побудувати графік залежності $I = f(R^2)$, відмічаючи по вісі абсцис – R^2 , а по вісі ординат – I .

15. Побудувати графік функції $\varepsilon = f(I)$.

8.7 Опис устаткування та методу вимірювання роботи № 5.6

МЕТА РОБОТИ: визначити момент інерції чотирьох вантажів, які знаходяться на стержнях маятника, динамічним та теоретичним методами.

ПРИЛАДИ: хрестоподібний маятник, секундомір, штангенциркуль, лінійка.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

- Визначити динамічним методом момент інерції маятника I .

- Обчислити теоретично момент інерції маятника I .

- Розрахувати відносну похибку $\Delta I/I$ та півширину довірчого інтервалу ΔI .

Момент інерції маятника можна знайти другим способом. Момент інерції маятника Обербека складається з моменту інерції двох стержнів моменту інерції обруча і моменту інерції 4-х вантажів.

$$I' = 2 \cdot (1/12) \cdot (m_1 L^2) + m_2 R_1^2 + 4\bar{m}R^2 \quad (8.16)$$

де m_1 – маса одного із стержнів, L – довжина стержня, m_2 – маса обруча, R_1 – радіус обруча, \bar{m} – середнє арифметичне із 4-х вантажів, закріплених на стержнях, R – відстань від осі обертання до центра ваги вантажу m .

8.8 Порядок виконання роботи № 5.6

- 1 Радіус великого шківa r маятника приведено у таблиці 8.11.
- 2 Виміряти відстань R від вісі обертання до центру ваги вантажів m які знаходяться на стержнях маятника, довжину стержня L , радіус обруча R_L .
- 3 Одночасно увімкнути секундомір і повернути догори держак гальма. Верхній зріз вантажу m_0 повинен бути нижче обручу маятника.
- 4 Коли розмотається шнур зі шківa, вимкнути секундомір. Записати показання секундоміра у таблицю 8.11.
- 5 Виміряти висоту h падіння вантажу.
- 6 Повторити 4 рази виміри часу t згідно пунктам 3÷4.
- 7 Розрахувати момент інерції маятника I динамічним методом за формулою

$$I = k \cdot \left(\frac{m_0 g r^2 t^2}{2h} \right) \quad (8.17)$$

де k - поправочний коефіцієнт $k = 1,4$.

Таблиця 8.11

№	T, c	\bar{t}, c	$m_0, кг$	$r, м$	$H, м$	$R, м$	$\bar{m}, кг$	$L, м$	$R_L, м$	$I, кг \cdot м^2$	$I'_0, кг \cdot м^2$
1				0,025							
2											
3											
4											
5											

8. Визначити теоретичний момент інерції маятника I' за (8.16).
9. Виходячи з (8.17), обчислити відносну похибку $\Delta I/I$. При цьому підвищити довірчого інтервалу Δr і Δh визначити за формулою для одиничного вимірювання, Δm_0 і Δg – як для табличних величин а для t обчислити за допомогою серії з 5 вимірювань.

Для штангенциркуля $-\delta = 0,05\text{мм}$, $\nu = 0,05\text{мм}$; лінійки $-\delta = 1\text{см}$, $\nu = 0,5\text{см}$; секундоміра $-\delta = 0,1\text{с}$. Обчисливши $\Delta I/I$, знайти півширину довірчого інтервалу ΔI . Результати обчислень похибок занести до таблиці 8.12.

Таблиця 8.12

№	$t_i, \text{с}$	$\Delta t_i, \text{с}$	$\Delta t_i^2, \text{с}^2$	Півширина довірчого інтервалу.					$\frac{\Delta I}{I}$
				$\Delta t, \text{с}$	$\Delta h, \text{м}$	$\Delta r, \text{м}$	$\Delta m_0, \text{кг}$	$\Delta g, \text{м/с}^2$	
1									
2									
3									
4									
5									
			$\Sigma \Delta t_i^2 =$						

Примітка: $m_0 = 0,623\text{ кг}$, $m_1 = 0,3\text{ кг}$, $m_2 = 0,8\text{ кг}$.

$m_{(1)} = 0,592\text{ кг}$, $m_{(2)} = 0,595\text{ кг}$, $m_{(3)} = 0,592\text{ кг}$, $m_{(4)} = 0,597\text{ кг}$,

8.9 Опис устаткування та методу вимірювання роботи № 5.7

МЕТА РОБОТИ: дослідити розподіл потенційної енергії тягарця на шків маховика на кінетичну енергію маховика та роботу сили тертя.

ПРИЛАДИ І ЗНАРЯДДЯ: маховик, лінійка, секундомір, штангенциркуль.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

- 1 Визначити залежність кінетичної енергії маховика від часу його прискорення.
- 2 Визначити роботу та момент сили тертя.

8.10 Порядок виконання роботи № 5.7

На шків поєднаний з маховиком намотано шнур з тягарцем, який створює момент сили що може прискорювати маховик, якщо відпус-

тити гальмо маховика. При цьому потенційна енергія тягарця на шківу маховика перетворюється у кінетичну енергію маховика та роботу сили тертя. Рівняння балансу енергії має вигляд

$$E = mgh = E_K + A \quad (8.18)$$

де E - потенційної енергії тягарця на шківу маховика, m та h – маса тягарця та шлях його переміщення по вертикалі, g – прискорення вільного падіння, $E_K = J\omega^2 / 2$ - кінетична енергія маховика, J – момент інерції маховика, ω – кутова швидкість маховика, A - робота сили тертя.

Кутова швидкість маховика при рівноприскореному обертальному русі визначається співвідношенням

$$\omega = \frac{2h}{Rt}, \quad (8.19)$$

де R – радіус шківів, t – час переміщення.

Підставляючи (8.19) в (8.18) знаходимо залежність зміни потенційної енергії тягарця на шківу маховика від часу переміщення тягарця

$$E = mgh = \frac{J}{2} \left(\frac{2h}{Rt} \right)^2 + A, \quad (8.20)$$

Експериментально визначається час падіння тягарців різної маси на висоту h . Отримані дані заносяться у таблицю 8.13.

Таблиця 8.13

№	m , кг	t , с	E , Дж	E_K , Дж	A , Дж	h , м	R , м	M , Нм
1								
2								
3								
4								
5								

За даними таблиці будується графік залежності зміни енергії при переміщенні тягарця від квадрату оберненого часу падіння тягарця, який має вигляд, рис.8.2

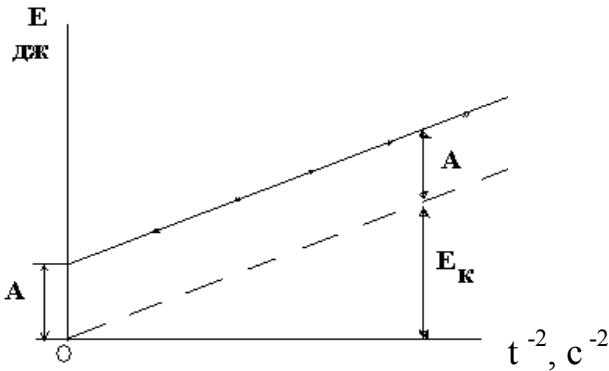


Рис.8.2

Враховуючи, що маса тягарця значно менша ніж маса маховика можна прийняти, що момент та робота сили тертя для сталого шляху є сталими і не залежать від мас тягарців та часу їх падіння. Найменша енергія тягарця, при якій час руху дорівнює нескінченності, (а швидкість руху дорівнює нулю) знаходиться у початку координат і дорівнює роботі сили тертя рис. 1. Тоді, згідно з (3), кінетична енергія маховика визначиться як різниця між потенційною енергією тягарця на шків маховика та роботою сили тертя

$$E_K = E - A \quad (8.21)$$

Момент сили тертя визначиться за формулою

$$M = AR / h \quad (8.22)$$

де R – радіус шківів який вимірюється штангенциркулем.

8.11 Порядок виконання роботи № 5.7

1 Виміряти час переміщення кількох тягарців з різними масами із стану спокою на відстань h до нижньої точки шляху переміщення. Результати вимірювань занести у таблицю.

2 Побудувати експериментальний графік залежності потенційної енергії тягарця на шків маховика від $(1/t)^2$, згідно рис.8.2 та визначити роботу сили тертя за графіком, як мінімальну потенційну енергію тягарця що може рухати маховик. Розрахувати момент сили тертя за формулою (8.22) та занести дані до таблиці.

3 Визначити кінетичну енергію маховика за формулою (8.21) та занести дані до таблиці.

4 Зробити висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Дати визначення параметрів обертального руху: момент сили, момент інерції, момент імпульсу, кутова швидкість, кутове прискорення.
- 2 Нормальне та тангенціальне прискорення у обертальному русі.
3. Формули для обчислень роботи і кінетичної енергії обертального руху.
4. Вивести основний закон динаміки обертального руху.
5. Сформулювати та записати закон збереження моменту імпульсу.
- 6 Як визначається робота сили тертя, кінетична енергія та момент сили тертя у обертальному русі.
7. Сформулювати і записати теорему Штейнера.

Рекомендована література

1. Трофимова Т.И. Курс фізики.- М.: Высшая школа, 1985.- С.28-32.
2. Кортнев А.В. и др. Практикум по фізице. –М.: Высшая школа.- 1963.- С.12-18.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики .- Запоріжжя. -2004. - 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер. Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.- 2003.-311 с.

Інструкцію склав професор кафедри фізики Єршов А.В.

Рецензент доцент кафедри фізики Серпецький Б.А..

9 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕМИ ШТЕЙНЕРА

ПРИЛАДИ: пристрій на тринитковому підвісі, два циліндри, штангенциркуль.

МЕТА РОБОТИ: визначити момент інерції циліндру, що обертається відносно вісі, яка не проходить через центр мас, дослідним шляхом та за теоремою Штейнера.

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ:

1. Розрахувати момент інерції ненавантаженого диску I_d .
2. Обчислити момент інерції системи I_1 , яка складається з диску і двох циліндрів.
3. Визначити момент інерції циліндра I' і I дослідним шляхом і за допомогою теореми Штейнера.
4. Впевнитись, що теорема Штейнера справедлива.

9.1 Опис пристрою та методу вимірювання

Момент інерції матеріального тіла – це скалярна фізична величина, яка є мірою інертності тіла в обертальному русі. Момент інерції залежить від маси, форми та розмірів тіла, розподілення маси відносно осі обертання, вибору осі обертання. У цій роботі використовується пристрій на тринитковому підвісі, який дозволяє визначити моменти інерції простих тіл. Пристрій складається з диску (2), котрий приводиться у коливальний рух за допомогою приводу (6). Внаслідок повороту рукоятки приводу (5) відбувається закручування пружини (8), котра, розкручуючись, передає імпульс обертального руху верхньому диску (7). Металеві нитки (4) дещо нахилиються, від чого центр мас системи зміщується вздовж осі обертання.

Момент сил пружності намагається повернути диск в положення рівноваги. Нижній диск здійснює обертальні коливання, період котрих залежить від моменту інерції системи. Оскільки центр мас диску зміщується, то змінюється його потенціальна енергія. Використовуючи закон збереження механічної енергії, одержимо формулу, що дозволяє визначити момент інерції нижнього диску:

$$I = \frac{(m_D \cdot g R r)}{4\pi^2 L} \cdot T_D^2, \quad (9.1)$$

де m_D – маса нижнього диску; g - прискорення вільного падіння; R - відстань від центру диску до точок, в яких кріпляться нитки до нього; r - радіус нижнього диску; L – довжина ниток підвісу; T – період коливань.

$$T = \tau / k, \quad (9.2)$$

де τ – час кількох коливань; k – число коливань.

Формула (9.1) дає можливість визначити момент інерції диску з розміщеними на ньому тілами. Згідно теореми Штейнера

$$I' = I_0 + m a^2, \quad (9.3)$$

де I_0 – момент інерції циліндру відносно осі 1 (рисунок 9.2а); I – момент інерції циліндру відносно осі 2 (рисунок 9.2б); m – маса циліндра; a - відстань між осями (рисунок 9.2б).

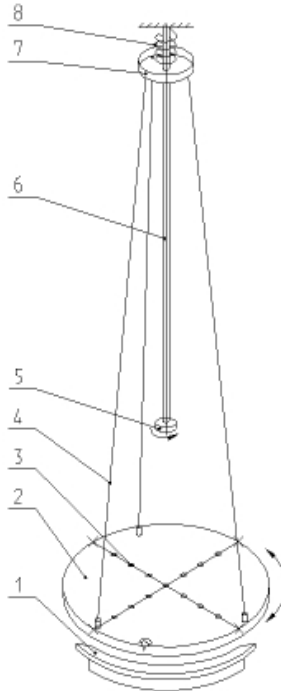


Рисунок 9.1

Момент інерції циліндра відносно осі 2 можна визначити і дослідним методом:

$$I' = \frac{(I_1 - I_D)}{2}, \quad (9.4)$$

де I_1 – момент інерції системи, що складається з диску та двох циліндрів, розміщених на однакових відстанях a від осі обертання (рисунок 9.2б); I_D – момент інерції ненавантаженого диска (рисунок 9.2в). Момент інерції циліндра I_0 визначається за формулою:

$$I_0 = \frac{1}{2}mr_u^2, \quad (9.5)$$

де r_u – радіус циліндра. Підставивши I_0 в (16.3) і маючи, на увазі, що $r_u = d/2$, одержимо

$$I_0 = \frac{1}{8}md^2 + ma^2. \quad (9.6)$$

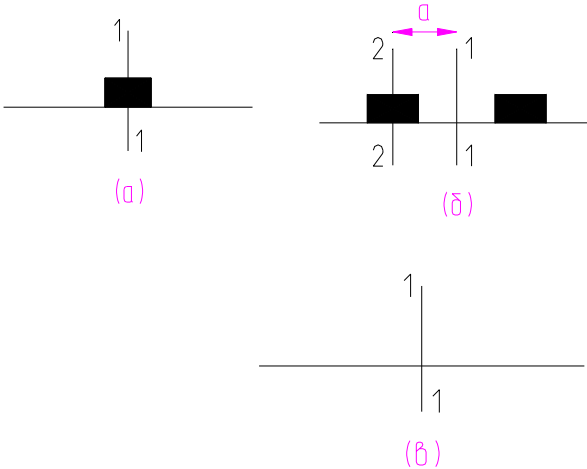


Рисунок 9.2

9.2 Порядок виконання роботи

1. Відхилити ненавантажений диск на 5 маленьких поділок лімбу (1).

2. Визначити час τ_D 10 коливань.
3. Повторити вимірювання ще два рази.
4. Розташувати в отворах диску два циліндри на однакових відстанях a від осі обертання.
5. Визначити час τ 10 коливань диску з двома циліндрами за п. 1 ÷ 3.
6. Заміряти один раз відстань a та діаметр циліндру d .
7. Визначити період коливань ненавантаженого диску T_D та період коливань диску з двома циліндрами T за (9.2), використовуючи середні значення τ_D та τ .
8. Обчислити момент інерції ненавантаженого диску I_D за (9.1), використовуючи значення: $m_D = 2$ кг, $R = 0,13$ м, $r = 5,5 \cdot 10^{-2}$, $L = 2,2$ м.

Таблиця 9.1

№	τ_D , с	τ , с	T_D , с	T , с	a , м	d , м	I_D , кг· м ²	I_1 , кг·м ²	I' кг·м ²	I кг·м ²
1										
2										
3										
ср.										

9. Обчислити момент інерції диску з двома циліндрами I_1 за (9.1), використовуючи замість m_D значення $m_D + 2m$. Маса m в грамах означена на циліндрах.
10. Визначити момент інерції циліндру I' відносно осі 2 дослідним методом за (9.4).
11. Обчислити момент інерції циліндру I відносно осі 2 згідно теореми Штейнера за (9.6). Дані вимірювань та обчислень занести у таблицю 9.1.
12. Порівняйте одержані результати I' та I і зробіть висновок про справедливість теореми Штейнера.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення для параметрів обертального руху: моменту сили, інерції, імпульсу, кутової швидкості, кутового прискорення.

2. Запишіть формули для обчислення роботи та кінетичної енергії обертального руху.
3. Вивести основне рівняння динаміки обертального руху.
4. Записати закон збереження моменту імпульсу.
5. Вивести співвідношення для кінетичної енергії обертального руху.
6. Записати теорему Штейнера.

Рекомендована література

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1.- М.: Наука, 1982.- С. 45-48, 134-136, 140-144, 151-152.
2. Кортнев А.В. Практикум по физике. - Киев: Высшая школа, 1963.- С.79.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики / Запоріжжя, 2004.- 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.-2003.- 311 с.

Інструкцію склав доцент кафедри фізики Єршов А.В.
Відредагував доцент кафедри фізики Корніч В.Г.

10 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7. ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ СПІВВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ C_p/C_v ДЛЯ ГАЗІВ

МЕТА РОБОТИ

1. Провести спостереження за газовими процесами, що проходять під час проведення дослідів.
2. Визначити величину показника адиабати для повітря.
3. Обчислити за даними роботи молярні та питомі теплоємності повітря.

ОБЛАДНАННЯ Лабораторна установка з водяним манометром.

10.1 Опис пристрою та методу вимірювання

Пристрій складається з скляного балону (1) об'ємом 12 л, гофрованої трубки (2), штока (3), рукоятки пружинного клапану (4), пружинного клапану (5), стопору (6), рукоятки штоку (7), водяного манометра (8) рис. 10.1.

Балон може сполучатись з атмосферою за допомогою пружинного клапану. Опускаючи чи піднімаючи рукоятку штока, можна збільшити або зменшити об'єм газу в балоні за рахунок розтягування або стискування гофрованої трубки. Стопор використовується для фіксування штока в верхньому положенні; водяним манометром вимірюється різниця тиску повітря в балоні та поза ним.

Під час виконання лабораторної роботи в балоні проходять чотири термодинамічних процеси. Розглянемо їх у тій послідовності, в якій вони проходять в лабораторній установці. Накачаємо в балон об'ємом V_1 небагато повітря. Зазначимо, що це повітря не впливає на параметри того повітря, з яким в балоні здійснюються термодинамічні процеси; накачане повітря в термодинамічних рівняннях не бере участі. Це призведе до стиснення повітря балону до об'єму V_2 . На графіку (рис.10.2) це ділянка 1÷2. Цей перший процес проходить нерівномірно і неоднозначно. Тому графічно його показати неможливо і він зображений умовно штрих-пунктирною лінією.

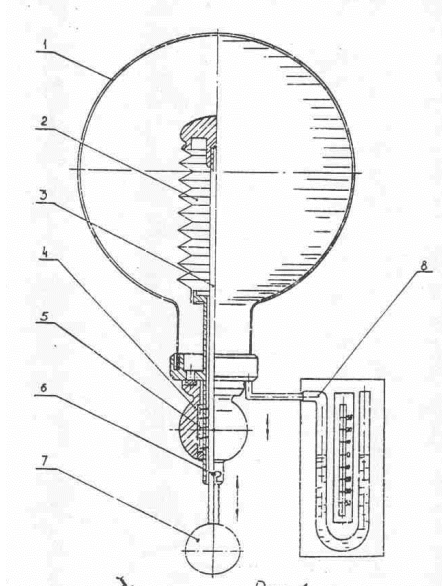


Рисунок 10.1

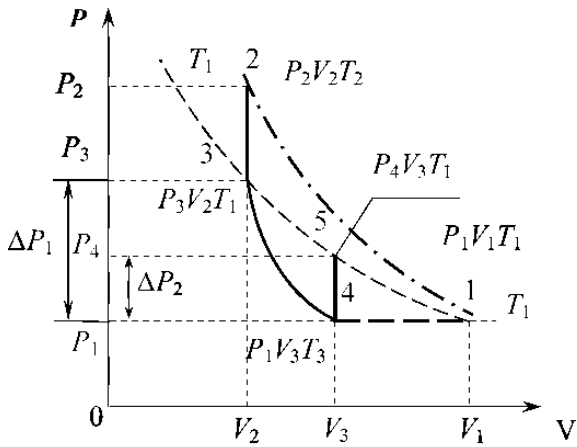


Рисунок 10.2

Відразу зазначимо, що реально в "чистому" вигляді провести жоден процес неможливо. Тому в подальшому визначати процеси ми будемо з деяким наближенням.

Оскільки при стисканні повітря зовнішніми силами виконувалася деяка робота, то повітря в балоні нагрілося і після припинення накачування воно почне охолоджуватися. Невеликими тепловими змінами об'єму скляного балона можна знехтувати і тоді другим процесом у балоні буде *ізохорне охолодження* газу (на графіку ділянка 2 ÷ 3). Як тільки температура повітря у балоні стане дорівнювати температурі навколишнього середовища (кімнатній), охолодження припиниться.

Тиск повітря в балоні можна виразити так:

$$P_3 = P_1 + \Delta P_1 = P_1 + \rho g h_1, \quad (10.1)$$

де P_1 - атмосферний тиск повітря, $\Delta P_1 = \rho g h_1$ - тиск, який показує рідинний манометр; h_1 - різниця рівнів рідини в колінах манометра.

Третій процес, що виконується в роботі, є *адіабатне розширення* повітря до об'єму V_3 . Це основний процес в роботі, тому дуже важливо провести його правильно.

Адіабатний процес - це процес, що проходить без теплообміну з навколишнім середовищем. Він буде ідеальним, якщо стінки балона з газом будуть абсолютно нетеплопровідними. Якщо стінки пропускають тепло, то за час розширення відбудеться частковий теплообмін. Чим коротший проміжок часу розширення, тим меншим буде теплообмін. Очевидно, можна так швидко провести процес розширення, що теплообміном можна знехтувати і тоді цей процес можна вважати адіабатним. Звідси: якість проведення третього процесу залежить від швидкості - чим швидше він буде проведений, тим процес буде якіснішим, тобто більш наближеним до адіабатного.

Отже, *швидко* проведемо розширення повітря в балоні, максимально відтягнувши рукоятку пружинного клапану 4. Оптимальний час розширення 1 ÷ 2 секунди. На графіку - це ділянка 3 ÷ 4. У кінці процесу тиск падає до атмосферного P_1 , об'єм стане дорівнювати V_3 , а температура T_3 стане нижчою за кімнатну.

Рівняння адіабатного процесу, що відбувся у нашому випадку, може бути записаним у такому вигляді:

$$\frac{P_3^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{P_1^{\gamma-1}}{T_3^\gamma} \quad (10.2)$$

Після завершення третього процесу розпочнеться четвертий - ізохорне нагрівання повітря (ділянка 4÷5 на графіку). Закінчується він при досягненні повітрям температури T_1 . При цьому тиск повітря в балоні буде дорівнювати

$$P_4 = P_1 + \Delta P_2 = P_1 + \rho g h_2, \quad (10.3)$$

де $\Delta P_2 = \rho g h_2$ - тиск, який показує манометр. Рівняння останнього ізохорного процесу має вигляд

$$\frac{P_1}{T_3} = \frac{P_4}{T_1}. \quad (10.4)$$

Об'єднаємо рівняння (10.2) й (10.4), виключивши з них температури T_1 і T_3

$$\left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_4}{P_1}\right)^\gamma.$$

Підставивши сюди P_3 і P_4 з рівнянь (18.1) і (18.3), одержимо

$$\left(1 + \frac{\rho g h_1}{P_1}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{\rho g h_2}{P_1}\right)^\gamma. \quad (10.5)$$

Застосувавши до виразу (10.5) формулу бінома Ньютона і враховуючи, що $\rho g h_1 \ll P_1$ і $\rho g h_2 \ll P_2$ одержимо

$$1 + (\gamma - 1) \frac{\rho g h_1}{P_1} = 1 + \gamma \frac{\rho g h_2}{P_1} \quad \Rightarrow \quad (\gamma - 1) h_1 = \gamma h_2$$

Звідки

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (10.6)$$

Формула (10.6) є розрахунковою.

10.2 Порядок виконання роботи

1. Опустите до упору рукоятку штока (7).
2. Відтягнути рукоятку пружинного клапану (4), коли рівні рідини в манометрі зрівняються, відпустити рукоятку.

3. Підняти рукоятку штока (7) і зафіксувати її стопором (6).
4. Через 2 хвилини записати значення різниці рівнів рідини в манометрі – h_1 .
5. Відтягнути на 0,5 с рукоятку пружинного клапану (4).
6. Через 2 хвилини записати значення рівнів рідини в манометрі – h_2 .
7. Повторити дослід по пунктам 1 ÷ 6 ще два рази, значення рівнів записати в таблицю 10.1.
8. Визначити γ для значень h_1 та h_2 за формулою (10.6).

Таблиця 10.1

№	h_1	h_2	γ	$\bar{\gamma}$
1				
2				
3				

1. Визначити відносну похибку γ за формулою:

$$E = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h_1}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_1}{h_1 - h_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_2}{h_1 - h_2}\right)^2}$$

При цьому величину h_1 та h_2 взяти для будь-якого з дослідів, а півширину довірчого інтервалу $\Delta h_1 = \Delta h_2$ знайти за формулою для одноразового вимірювання. Для шкали манометра $\delta = 1$ мм, $\nu = 0,5$ мм.

10. Знайти півширину довірчого інтервалу за формулою

$$\Delta\gamma = E\bar{\gamma}.$$

11. Обчислити величину γ для повітря за формулою $\gamma = \frac{i+2}{i}$ та порівняти її з одержаною в досліді величиною $\bar{\gamma}$. i для двохатомного газу = 5, для 3-х = 6.

12. Обчисліть молярні і питомі теплоємності повітря при сталому об'ємі і сталому тиску.

$$C_V = R/(\gamma - 1)$$

$$c_{V, \text{питоме}} = C_V / M$$

$$C_P = C_V + R$$

$$c_{P, \text{питоме}} = C_P / M,$$

де $\bar{\gamma}$ – показник адіапати, значення якого одержане в лабораторній роботі; $R=8,31$ Дж/(моль-К); $M=29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Контрольні запитання

1. Назвіть ізопроееси в ідеальних газах. Дайте пояснення, чим вони відрізняються?
2. Сформулюйте та запишіть перший закон термодинаміки.
3. Запишіть перший закон термодинаміки для кожного ізопроеесу.
4. Дати визначення числа ступенів свободи.
5. За якою формулою визначається середнє значення кінетичної енергії поступального руху молекули?
6. Яка середня енергія припадає на один ступінь свободи?
7. За якою формулою визначається внутрішня енергія ідеального газу?
8. Дайте визначення теплоємності, питомої та молярної теплоємності.
9. Чому теплоємність при сталому тиску більша теплоємності при сталому об'ємі?
10. Як пов'язані теплоємність при сталому тиску та теплоємність при сталому об'ємі з числом ступенів свободи?
11. Запишіть формулу для обчислення величин співвідношення C_p/C_v через число ступенів свободи.

Рекомендована література

1. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.1.- М.: Наука, 1982.- С. 45-48, 134-136, 140-144, 151-152.
2. Кортнев А.В. Практикум по физике. - Киев: Высшая школа, 1963.- С.79.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики / Запоріжжя, 2004.- 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.-2003.- 311 с.

Інструкція складена старшим викладачем кафедри фізики Денисовою О.І.

Відредагував доцент кафедри фізики Золотаревський І. В.

11 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ТА ВИТРАТИ РІДИНИ

МЕТА РОБОТИ: визначити швидкість та витрати рідини у залежності від перепаду статичного тиску між ділянками каналу змінного перерізу.

ПРИЛАДИ І ЗНАРЯДДЯ: канал змінного перерізу, манометр, ємність для води.

11.1 Опис пристрою та методу вимірювання

Швидкість рідини можна визначити за допомогою рівняння Бернуллі, яке для горизонтального каналу змінного перерізу має вигляд

$$\rho_1 \frac{V_1^2}{2} + P_1 = \rho_2 \frac{V_2^2}{2} + P_2 = \text{const} \quad (11.1)$$

Де ρ, V і P – густина, швидкість і статичний тиск рідини. Індекси «1» і «2» відносяться до першого та другого перерізів, які відрізняються площинами $S_1 < S_2$. Враховуючи рівняння нерозривності та умову сталої густини $\rho_1 = \rho_2$ маємо витрату рідини

$$G = \rho V_1 S_1 = \rho V_2 S_2 \quad (11.2)$$

Звідки

$$V_2 = V_1 \frac{S_1}{S_2} \quad (11.3)$$

Відношення площин перерізу пропорційно відношенням квадратів діаметрів труби. Перетворення формули (1) з урахуванням (3) визначає швидкість рідини у першому перерізі

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho[1 - (S_2/S_1)^2]}} \quad (11.4)$$

Витрата рідини визначається з (11.2) та (11.4)

$$G = S_1 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)\rho}{[1 - (S_2/S_1)^2]}} \quad (11.5)$$

Статичний тиск P_1 та P_2 визначається за допомогою водяного манометра

$$P_2 - P_1 = \rho g(h_2 - h_1) \quad (11.6)$$

де h_1, h_2 висота водяного стовпа у метрах.

11.2 Порядок виконання роботи

1. За допомогою крана встановити $h_2 - h_1 \approx 5 \cdot 10^{-2}$ м.
2. Визначити різницю тисків ($P_2 - P_1$) рідини з рівняння (11.6).
3. Визначити теоретичні значення швидкості рідини V_1 р (4) та витрати G_T з (11.5). Отримані дані занести до таблиці 11.1. Прийняти діаметри каналу у перерізах 1 і 2: $d_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_2 = 10 \cdot 10^{-3}$ м.

Таблиця 11.1

№	$(h_2 - h_1) \cdot 10^{-3}$, м	$P_2 - P_1$, Па	V_{1T} , м/с	G_T , кг/с	τ , с	G_e , кг/с	V_{1e} , м/с
1							
2							
3							

4. Виміряти час наповнення ємності $V = 2 \cdot 10^{-3}$ м³ та експериментальне значення витрати рідини за формулою

$$G_e = \frac{\rho V}{\tau}, \quad V_{1e} = \frac{G_e}{\rho S_1}$$

та порівняти експериментальне значення витрати та швидкості рідини G_e та V_{1e} із теоретичним G_T та V_{1T}

5. Повторити експеримент два рази для значень $h_2 - h_1 = 10^{-1}$ та $1.5 \cdot 10^{-1}$ м, та побудувати графіки експериментальних та теоретичних залежностей швидкості та витрати рідини від різниці статичного тиску у двох перерізах.
6. Зробити висновки щодо співставлення G_e з G_T .

Контрольні запитання

1. Рівняння Бернуллі. Статичний та динамічний тиск рідини.
2. Рівняння для експериментального та теоретичного визначення витрати рідини.

3. Як залежить тиск від висоти стовпа рідини?
4. Рівняння для експериментального та теоретичного визначення швидкості рідини.

Рекомендована література

1. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.1.- М.: Наука, 1982.- С. 45-48, 134-136, 140-144, 151-152.
2. Кортнев А.В. Практикум по физике. - Киев: Высшая школа, 1963.- С.79.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики / Запоріжжя, 2004.- 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.-2003.- 311 с.

Інструкцію склав професор кафедри фізики Єршов А.В.

Рецензент: доцент кафедри фізики Правда М.І.

12 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9-К ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ ПРИ ПАДІННІ ТІЛА.

МЕТА РОБОТИ: Вивчення рівноприскореного руху та експериментальне визначення прискорення сили тяжіння на деякій планеті.

12.1 Опис роботи

Всі тіла притягуються один до одного силами тяжіння. Якщо яке-небудь тіло підняти над поверхнею Землі або іншої планети, то дія цієї сили тяжіння приводить до того, що підняте тіло падає на поверхню планети з постійним прискоренням, яке називається прискоренням вільного падіння. Звичайно, згідно 3-му закону Ньютона на планеті з боку піднятого тіла діє така ж по величині сила, і тому планета також повинна рухатися з постійним прискоренням назустріч тілу. Однак, через сильні відмінності мас планети і тіла цей рух практично непомітно.

Г. Галілей експериментально показав, що прискорення вільного падіння не залежить від маси тіла, що падає.

Ця лабораторна робота присвячена вивченню рівноприскореного руху і експериментальному визначенню прискорення вільного падіння на деякій невідомій планеті.

12.2 Порядок виконання роботи

1. Встановіть позначку на висоті $h = 0,10$ м.
2. Визначте час падіння тіла t .
3. Виконайте досліди для інших висот, дані занесить у таблицю 12.1
4. Побудуйте графік залежності t від h .
5. Визначте прискорення вільного падіння за формулою, яка отримана з рівняння для шляху при рівнозмінному русі

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

6. Побудуйте графік залежності t^2 від h .
7. Визначте прискорення вільного падіння за графіком.
8. Зробіть висновки з виконаної роботи.

Табл.12.1

$h, м$	0,10	0,2	0,4	0,8	1,2
$t, с$					
$t,^2 с^2$					
$g, м/с^2$					

Контрольні питання

1. Формули для визначення середньої та митьтевої швидкості та прискорення.
2. Формули для визначення митьтевої швидкості у рівноприскореному русі.
3. Формули для визначення довжини шляху, який проходить тіло у рівноприскореному русі.

Рекомендована література

1. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.1.- М.: Наука, 1982.- С. 45-48, 134-136, 140-144, 151-152.
2. Кортнев А.В. Практикум по физике. - Киев: Высшая школа, 1963.- С.79.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики / Запоріжжя, 2004.- 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.-2003.- 311 с.

Інструкцію склав аспірант кафедри фізики Зеленіна О.А..

Рецензент: доцент кафедри фізики Правда М.І.

13 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10-К ВИВЧЕННЯ РУХУ ТІЛА, КИНУТОГО ПІД КУТОМ ДО ГОРИЗОНТУ

МЕТА РОБОТИ: вивчення руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, визначення часу, дальності і висоти польоту.

13.1 Опис роботи

Дана лабораторна робота присвячена вивченню руху тіла, кинутого під кутом до горизонту. В механіці будь-яке тіло рухається під дією всіх приложених до нього сил, законом руху є другий закон Ньютона. Тіло, кинуте під кутом до горизонту, при відсутності опору повітря рухається тільки під дією сили тяжіння, яка направлена вертикально вниз. Можна сказати, що таке тіло одночасно бере участь у двох рухах : рівномірному русі в горизонтальному напрямку та рівнозмітному русі в вертикальному напрямку. Траєкторією руху тіла є крива, яка зветься параболою. Для визначення часу польоту використовується формула, яка отримана з рівняння для швидкості при рівнозмітному русі

$$t = \frac{2V \sin \alpha}{g}, \quad (13.1)$$

де V - початкова швидкість; α - кут кидання; g - прискорення вільного падіння. У чисельнику записана подвійна величина початкової вертикальної складової початкової швидкості тіла.

Дальність польоту визначається за формулою

$$L = Vt \cos \alpha, \quad (13.2)$$

де t - час польоту.

Максимальна висота польоту визначається за формулою яка отримана з рівняння для шляху при рівнозмітному русі

$$h = \frac{g(t/2)^2}{2}. \quad (13.3)$$

13.2 Порядок виконання роботи

1. Встановити значення початкової швидкості і кута кидання. Всі значення параметрів встановлюються за допомогою бігунків. Рекомендується встановити початкову швидкість 40 см/с, а кут кидання 30 градусів.
2. Виміряти дальність і час польоту.
3. Виміряти максимальну висоту польоту.
4. Привести вимірювання при інших кутах кидання 45 і 60 градусів, дані занести до таблиці.

Табл.13.1

V, м/с	α , град	L, м	t, с	h, м

5. За допомогою (1) перевірити отриману залежність часу польоту від кута кидання.
6. Використовуючи (2) перевірити отриману залежність дальності польоту від кута кидання.
7. За допомогою (3) перевірити отриману залежність максимальної висоти польоту від кута кидання.
8. Перевірити отриману залежність максимальної дальності польоту від швидкості за допомогою (2) .
9. Зробити висновки з виконаної роботи.

Контрольні питання

1. Визначити горизонтальну та вертикальну складові прискорення при падінні тіла.

2. Формули для визначення горизонтальної та вертикальної складових швидкості.
3. Формули для визначення довжини шляху та висоти польоту тіла.
4. Вивести формулу для визначення максимальної висоти польоту тіла.

Рекомендована література

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1.- М.: Наука, 1982.- С. 45-48, 134-136, 140-144, 151-152.
2. Кортнев А.В. Практикум по физике. - Киев: Высшая школа, 1963.- С.79.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики / Запоріжжя, 2004.- 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.-2003.- 311 с.
Інструкцію склав професор кафедри фізики Єршов А.В. та аспірант Зеленіна О.А..
Рецензент: доцент кафедри фізики Правда М.І.

14 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11 ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ

МЕТА РОБОТИ : вивчення закону збереження імпульсу на прикладі розпаду тіла, кинутого під кутом до горизонту.

14.1 Опис роботи

В фізиці зустрічаються величини, які для замкнених систем частинок не змінюються з часом, або, як прийнято казати, зберігаються. До числа таких фізичних величин відносяться енергія та імпульс. Окрім них є ще декілька величин, для яких виконуються свої закони збереження.

Виявляється, всі закони збереження є наслідком симетрії простору і часу. Наприклад, закон збереження енергії пов'язаний з однорідністю часу, тобто з рівноправністю всіх моментів часу. Закон збереження імпульсу пов'язаний з однорідністю простору, тобто з рівноправністю всіх точок простору при розпаді тіла на осколки має вигляд

$$mv = m_1v_1 + m_2v_2$$

Дана лабораторна робота присвячена вивченню закону збереження імпульсу на прикладі розпаду тіла, кинутого під кутом до горизонту, на 2 однакові осколки.

14.2 Порядок виконання роботи

1. Задати за допомогою повзунків величини початкової швидкості - 10 м/с та кута кидання – 30 градусів.
2. Виконати кидок тіла. Натиснути кнопки «початок» та «пуск». У верхній точці тіло розпадається на 2 однакових осколки, які летять у протилежних напрямках. Перпендикуляр із точки розльоту на горизонтальну вісь дозволяє визначити висоту траєкторії та дальність.
3. Виміряти лінійкою дальність польоту тіла до точки розльоту осколків L та дальності розльоту осколків від цієї точки при

$v=10$ м/с та куті кидання 30 градусів. Результати занести до таблиці 14.1 .

Табл.14.1

V, м/с	α , град	L, м	L ₁ , м	L ₂ , м
10	30			
	45			
	60			

4. Перевірити закон збереження горизонтальної проекції імпульсу шляхом використання формули, що витікає із закона збереження при $v_1 = -v_2$; $m_1 = m_2 = m/2$

$$L_1 - L_2 = 2L$$

Порівняти горизонтальні дальності розльоту осколків , які пропорційні їх горизонтальним проекціям імпульсу.

$$L_1 = 2L + L_2$$

$$L_2 = L_1 - 2L$$

5. Виконати вимірювання для швидкості 10 м/с при кутах кидання 45 та 60 градусів.

Для швидкості 15 м/с виконати експерименти при кутах 30,45 та 60 градусів. Результати занести до другої аналогічної таблиці.

6. Зробити висновки , наскільки точно виконується закон збереження імпульсу при розпаді тіла.

Контрольні запитання

1. Записати зв'язок між силою та імпульсом.
2. Які системи називаються замкнутими?
3. Сформулювати закон збереження імпульсу.
4. Сформулювати закон збереження енергії.
5. Вивести формули для визначення швидкостей осколків

після розпаду тіла.

Рекомендована література

1. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.1.- М.: Наука, 1982.- С. 45-48, 134-136, 140-144, 151-152.
2. Кортнев А.В. Практикум по физике. - Киев: Высшая школа, 1963.- С.79.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики / Запоріжжя, 2004.- 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.-2003.- 311 с.

Інструкцію склав професор кафедри фізики Єршов А.В.

Рецензент: доцент кафедри фізики Правда М.І.

15 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12 ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ РУХУ ПЛАНЕТ

МЕТА РОБОТИ: вивчення руху тіл під впливом сил тяжіння. Перевірка 3-го закону Кеплера.

15.1 Опис роботи

На початку XVII сторіччя І. Кеплер відкрив закони руху планет, тим самим геліоцентрична система отримала своє дослідне підтвердження. Пізніше, в частості і на основі аналізу законів Кеплера, І. Ньютон відкрив закон всесвітнього тяжіння.

Всі планети рухаються навколо свого світила під дією сил тяжіння. При цьому на більш близькі до світила планети діє більша сила, і тому вони рухаються з більшою швидкістю, ніж віддалені планети.

Дана лабораторна робота присвячена вивченню орбітального руху планет.

15.2 Порядок виконання роботи

1. Привести в рух «планети». Натиснути кнопки «початок» і «пуск» на панелі керування. У будь-який момент рух «планет» можна зупинити, натиснувши «стоп».
2. Виміряти середню відстань від «планет» до «світила» R_1 та R_2 за допомогою нерухомої лінійки. Результати вимірювань занести до таблиці 1.
3. Лінійкою виміряти радіус орбіти супутника R_3 . Результати вимірювань занести до таблиці 1.
4. Визначити періоди обертання «планет» T_1 і T_2 та «супутника» T_3 за допомогою віртуального секундоміра. Для цього треба виміряти час кількох повних обертань, а після цього розділити цю величину на число обертань. Результати вимірювань занести до таблиці 1.

Табл. 1

$R_1, \text{мм}$	$R_2, \text{мм}$	$R_3, \text{мм}$	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$T_3, \text{с}$
------------------	------------------	------------------	-----------------	-----------------	-----------------

--	--	--	--	--	--

5.Перевірити виконання 3-го закону Кеплера для «планет». Цей закон полягає у тому, що

$$\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \quad \text{або} \quad \frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3}, \quad (15.1)$$

де R_1 і R_2 - відстані від планет до світила, а T_1 і T_2 - періоди їх обертання. Результати розрахунків за формулою (1) занести до таблиці 2.

Табл.2

$\frac{T_1^2}{R_1^3}$	$\frac{T_2^2}{R_2^3}$	$\frac{T_3^2}{R_3^3}$	$\frac{M}{M_1}$

6.Визначити відношення мас «світила» і «планети». Для цього визначте відношення $\frac{T^2}{R^3}$ для планети та її супутника. Це відношення обернено пропорційно масі тіла, відносно якого відбувається обертання.

$$\frac{T_1^2/R_1^3}{T_2^2/R_2^3} = 1; \quad \frac{M}{M_1} = \frac{T_3^2}{R_3^3} \frac{R_1^3}{T_1^2},$$

де індекси «1» відносяться до характеристик планети, «3» - до її супутника, M – маса світила. Результати розрахунків занести до таблиці 2.

7. Зробити висновки з виконаної роботи. У висновках вказати, яка планета рухається швидше. Чи виконується для планет 3-й закон Кеплера.

Контрольні запитання

- 1 Записати зв'язок між моментом сили та моментом імпульсу.
- 2 Які системи називаються замкненими?
- 3 Сформулювати закон збереження моменту імпульсу.
- 4 Сформулювати закон збереження енергії у обертальному русі.

5 Сформулювати 3-й закон Кеплера.

Рекомендована література

1. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.1.- М.: Наука, 1982.- С. 45-48, 134-136, 140-144, 151-152.
2. Кортнев А.В. Практикум по физике. - Киев: Высшая школа, 1963.- С.79.
3. Оселедчик Ю.С. та ін. Інтерактивний модульний курс загальної фізики / Запоріжжя, 2004.- 442 с.
4. Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер Курс фізики. Кн.1 / К.: Вища школа.-2003.- 311 с.

Інструкцію склав професор кафедри фізики Єршов А.В.

Рецензент: доцент кафедри фізики Правда М.І.

**ІНСТРУКЦІЯ
З ОХОРОНИ ПРАЦІ № 129
ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ В ЛАБОРАТОРІЇ КАФЕДРИ
ФІЗИКИ**

1 Загальні положення

1.1 До роботи в лабораторії допускаються:

- співробітники кафедри, які знають свої функціональні обов'язки та мають допуск до самостійної роботи;
- студенти, що вивчили та засвоїли правила поведіння в лабораторії, знають методику проведення лабораторних робіт, пройшли відповідний інструктаж.

1.2 Інструктаж для студентів проводить співробітник кафедри. Кожен студент у журналі «Інструктаж студентів з питань охорони праці» зобов'язаний особистим підписом підтвердити знання інструктажу.

1.3 Допуск студентів до роботи здійснює керівник занять після того, як він з'ясував рівень знань студентів методики проведення лабораторних робіт.

2 Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1 Для виконання робіт використовують тільки придатні для роботи прилади та інструменти.

2.2 Перед виконанням роботи керівник повинен особисто перевірити справність приладів і дати дозвіл на виконання роботи.

2.3 Особи, що не беруть участі у виконанні лабораторної роботи, в лабораторію не допускаються.

3 Вимоги безпеки під час виконання робіт

3.1 Забороняється вмикати або вимикати джерела електричної та світлової енергії без дозволу керівника робіт.

3.2 Забороняється крутити будь-які гвинти, рукоятки, натискувати кнопки, вимикачі, призначення яких для студента невідоме.

3.3 Про усі нещодавні в роботі приладів та обладнання студент повинен негайно повідомити викладача.

3.4 При роботі з маятниками (лаб. робота № 5) стежити за міцністю кріплення вантажів на спицях.

4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1 Перед закінчення роботи послідовно вимкнути всі споживачі електроенергії.

4.2 Візуально перевірити справність стенду, установки. Слід пам'ятати, що за зламани прилади студент несе відповідальність.

5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1 Виконавець робіт зобов'язаний:

- зупинити роботу;
- вимкнути прилади та обладнання з електричної мережі;
- сповістити керівника робіт про те, що сталося в лабораторії;

5.2 На випадок пожежі приступити до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння. Діяти згідно розпорядженням свого керівника або особи, що керує гасінням пожежі.

5.3 Керівник робіт сповіщає по тел. 9-101.