

Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Фізичний факультет. Кафедра фізики металів

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до **самостійного** виконання вибраних лабораторних робіт з

фізики

в дистанційному режимі

для студентів біологічного факультету

Автор: Попов О.Ю.

Київ, 2021

Зміст

Вступ.....	3
Лабораторна робота №1. Визначення густини тіл правильної геометричної форми	5
Лабораторна робота №2. Визначення величини прискорення вільного падіння шляхом безпосереднього спостереження.....	7
Лабораторна робота №3. Визначення величини прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника.....	9
Лабораторна робота №4. Визначення коефіцієнту жорсткості пружних тіл. Перевірка закону Гука.....	12
Лабораторна робота №5. Визначення модуля пружності твердих тіл...	15
Лабораторна робота №6. Перевірка правила неперервності струменя та рівняння Бернуллі.....	17
Лабораторна робота №7. Експериментальне визначення критичного числа Рейнольдса.....	19
Лабораторна робота №8. Визначення механізму опору повітря під час падіння тіл.....	21
Лабораторна робота № 9. Визначення коефіцієнту поверхневого натягу рідин методом краплини.....	25
Лабораторна робота № 10. Перевірка рівняння Менделєєва-Клапейрона на прикладі ізобарного стиснення повітря.....	27
Додаток 1. Приклад оформлення лабораторної роботи.....	30

Вступ

Усвідомлення та систематизація знань з фізики неможливі без використання та перевірки одержаної теоретичної інформації на практиці. Одним з найбільш важливих напрямків такої перевірки є виконання лабораторних робіт, протягом яких можна спостерігати та досліджувати прояви тих чи інших природних явищ, робити висновки щодо виконання фізичних законів, отримувати первинний досвід проведення та аналізу власного фізичного експерименту. Безпосереднє спостереження закономірностей руху матерії «на власні очі» може бути частково замінено спостереженням експериментів, поставлених фахівцями та відзнятими на відео, однак, попри важливість інформації такого типу в сучасній системі освіти, воно ні в якому разі не може повністю замінити самостійне проведення власних досліджень, які, окрім істотно глибшого відчуття особливостей тих чи інших явищ, спонукають формування важливих практичних навичок, уяви та творчого мислення.

Епідеміологічна криза 2020 – 2021 років зумовила необхідність формування системи дистанційного навчання, в межах якого студенти часто не мають доступу до навчальних лабораторій. Останнє унеможливорює використання факультетського обладнання для проведення практичних занять, що, в свою чергу, зумовлює необхідність пошуку нових підходів до навчання. Одним з таких підходів стала розробка серії лабораторних робіт, які, за мінімальної підготовки та навіть в умовах жорсткого карантину, можуть бути виконані в домашніх умовах із використанням побутових предметів, які зазвичай оточують людину.

Автором даного посібника був успішно проведений даний цикл лабораторних робіт зі студентами 1-го курсу фізичного факультету та 2-го курсу біологічного факультету. Окрім можливості набуття майбутніми фахівцями важливих навичок самостійного виконання фізичних дослідів в межах дистанційного навчання, були відмічені несподівані переваги даного методичного напрямку. По-перше, практичне усвідомлення зв'язку фізичних законів із повсякденним життям сприяло істотно вищій актуалізації одержаної інформації. По-друге, необхідність самостійно створювати експериментальну послідовність та готувати відповідне

устаткування, сприяло істотно глибшому розумінню спостережуваних явищ. По-
третє, цілком самостійна робота вимагала від кожного виконання всієї
послідовності лабораторної роботи, починаючи від підготовки експерименту та
завершуючи розрахунками похибок та висновками.

Таким чином, запропонований цикл лабораторних робіт може бути не тільки
виконаним в повному обсязі під час дистанційного навчання в період карантину,
але й використаним частково для підвищення якості викладання фізики в вищих
навчальних закладах.

Лабораторна робота №1. Визначення густини тіл правильної геометричної форми

Необхідне обладнання:

- 2-3 різних тіл правильної геометричної форми (циліндр, паралелепіпед, куля) із відомою (написаною на етикетці) масою. Це може бути пачка масла, твердого сиру, будь-які пресерви в циліндричних чи прямокутних банках, пакет молока, формовий хліб, тощо
- лінійка

Короткі теоретичні відомості

Густина тіла, яка визначається як маса одиниці об'єму, може бути знайдена за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.1)$$

де m – маса та V – об'єм досліджуваного тіла. Густина є важливою та однією з базових характеристик речовини (*речовина* – вид матерії із певними фізико-хімічними характеристиками), що несе важливу інформацію про вагу структурних одиниць (атомів або молекул), з яких вона складається, а також про відстані між цими структурними одиницями.

Окрім того, густина матеріалу (*матеріал* – речовина або суміш речовин, що використовується для створення тих чи інших тіл), може нести інформацію про наявність в ньому порожнин та інших структурних особливостей, тісно пов'язаних із службовими характеристиками кінцевого виробу. Саме тому визначення густини є первинним експериментом при дослідженні нового матеріалу.

В межах даної роботи пропонується виконати визначення густини тіл правильних геометричних форм із відомою масою. Об'єм відповідних тіл (паралелепіпеда, циліндра та кулі відповідно) можна визначити за наступними та добре відомими формулами:

$$V = x \cdot y \cdot z, \quad (1.2)$$

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h, \quad (1.3)$$

$$V = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (1.4)$$

де x , y та z – лінійні розміри паралелепіпеда, d – діаметр основи циліндра або діаметр кулі, h – висота циліндра.

Хід роботи

1. За допомогою лінійки виміряти необхідні лінійні розміри першого тіла. Кожен розмір необхідно визначити 3 – 5 разів для розрахунку середнього значення та похибок.
2. Розрахувати об'єм першого тіла за формулами 1.2, 1.3 або 1.4.
3. Використавши відоме значення маси, обчислити густину першого тіла за формулою 1.1.
4. Розрахувати систематичну, випадкову та загальну похибки визначення густини.
5. Повторити пункти 1 – 4 для 2-го та 3-го тіла.
6. Порівняти одержані значення із густиною відомих речовин: пінопласту, деревини, масла, води, повареної солі, сталі (відповідні величини знайти в інтернеті).
7. Оформити роботу та зробити висновки.

Лабораторна робота №2. Визначення величини прискорення вільного падіння шляхом безпосереднього спостереження

Необхідне обладнання:

- невеличке тіло (ластик, копійка, тощо)
- лінійка або сантиметрова стрічка
- секундомір (мобільний телефон)

Короткі теоретичні відомості

Прискорення вільного падіння – це прискорення, якого набуває тіло поблизу поверхні Землі, якщо на нього діє лише сила гравітаційного притягання до земної кулі. Виходячи з закону всесвітнього тяжіння, величина прискорення вільного падіння може бути знайдена за формулою:

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad (2.1)$$

де $G = 6.67 \text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}$ – гравітаційна стала, M та R – маса та радіус Землі відповідно. Виходячи з визначення, прискорення вільного падіння може бути виміряне шляхом прямого спостереження за тілом, що починає падати поблизу поверхні Землі. В загальному випадку на тіло під час падіння будуть діяти дві основні сили: сила тяжіння, спрямована вниз та сила опору повітря – вгору. Відомо, що опір повітря збільшується із зростанням швидкості, тож в перші секунди падіння, за порівняно незначної швидкості, силою опору можна знехтувати.

Будемо спостерігати за тілом з моменту початку його руху, тож початкова швидкість дорівнюватиме нулевій. В цьому випадку висота, яку пройде тіло за перші t секунд його руху може бути записана як:

$$h = \frac{gt^2}{2}. \quad (2.2)$$

Тоді, прискорення вільного падіння можна знайти за формулою:

$$g = \frac{2h}{t^2}. \quad (2.3)$$

Хід роботи

1. Знайти в кімнаті будь-яку легко доступну відмітку на висоті більшій за 2 метри. Це може бути верхній край шафи, нижня точка люстри, тощо.

2. За допомогою лінійки або сантиметрової стрічки виміряти відстань від відмітки до підлоги.

3. Відпустити обране тіло на висоті відмітки, одночасно натискаючи «старт» секундоміру. Натиснути «стоп» в момент зіткнення тіла з підлогою. Повторити щонайменше 10 разів.

4. Розрахувати прискорення вільного падіння за формулою 2.3, обчислити похибки.

5. Порівняти одержані результати із табличним значенням прискорення вільного падіння

6. Оформити роботу та зробити висновки.

Лабораторна робота №3. Визначення величини прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника

Необхідне обладнання:

- невеличке тіло, прив'язане до кінця нитки довжиною до 2-х метрів
- лінійка або сантиметрова стрічка
- секундомір (мобільний телефон)

Короткі теоретичні відомості

Математичний маятник – це модельна коливна система, що являє собою матеріальну точку на кінці нерозтяжної нескінченно тонкої нитки. Фізичним аналогом такої коливної системи може бути невелике за розмірами тіло, підвішене до кінця довгої нитки (Рис. 3.1).

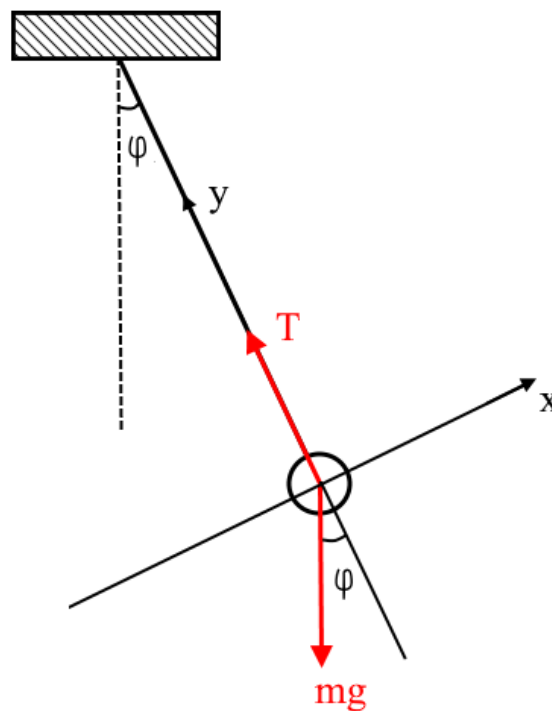


Рис. 3.1. Сили, що діють на підвішене тіло

Розгляд сил, що діють на таке тіло, дозволяє записати 2-й закон Ньютона наступним чином:

$$T = mg \cos \varphi, \quad (3.1)$$

$$mg\sin\varphi = -ma, \quad (3.2)$$

де m та a – маса та прискорення тіла відповідно, T – сила натягу нитки. За малих кутів можна вважати, що $\sin\varphi \approx x/l$, де l – довжина нитки. В цьому випадку, рівняння (3.2) може бути записане як:

$$\ddot{x} + \frac{g}{l}x = 0, \quad (3.3)$$

де $\ddot{x} \equiv a$ – друга похідна координати за часом. Легко перевірити, що частковим розв'язком диференційного рівняння (3.3) є вираз:

$$x = A\sin\omega t, \quad (3.4)$$

який описує циклічну зміну координати підвішеного тіла із часом. Тут A – максимальне відхилення тіла від положення рівноваги (амплітуда коливань), $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ – циклічна частота. Очевидно, що період коливного процесу (час одного повного коливання) тісно пов'язаний із періодом синуса та може бути визначений з співвідношення:

$$\omega T = 2\pi. \quad (3.5)$$

Отже

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (3.6)$$

З формули (3.6), яка носить назву формули Томсона, можна бачити, що період малих коливань математичного маятника залежить від його довжини та прискорення вільного падіння та не залежить від маси вантажа. Виразивши з (3.6) прискорення вільного падіння, отримаємо:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \quad (3.7)$$

Таким чином, визначивши довжину підвісу за допомогою лінійки, рулетки або сантиметрової стрічки, а також період коливань маятника за формулою:

$$T = \frac{t}{N}, \quad (3.8)$$

де t – час, за який відбувається N повних коливань маятника, маємо можливість обчислити прискорення вільного падіння за формулою (3.7).

Хід роботи

1. Підвісити нитку із прикріпленим до неї тілом так, щоб довжина маятника (від точки підвісу до центра мас тіла) становила приблизно 30 – 50 см. Виміряти точну довжину маятника. Підвіс слід влаштувати таким чином, щоб ні тіло ані нитка не дотикалися до стін або інших предметів. **Не слід** тримати нитку рукою замість підвісу, оскільки мікро-рухи руки істотно впливатимуть на період коливань та на результат обчислень.

2. Відхилити тіло на кут близько 5° та відпустити його. Виміряти час 10 повних коливань. Визначити період коливань за формулою (3.8). Дослід повторити тричі.

3. За формулою (3.7) розрахувати прискорення вільного падіння. Визначити похибки.

4. Повторити пункти 2 та 3 для тієї ж довжини підвісу, відхиляючи тіло на кут близько 15° та 30° .

5. Результати занести в таблицю. Зробити висновки щодо впливу кута відхилення на величину прискорення вільного падіння.

6. Виконати пункти 2 та 3 із кутом відхилення близько 5° , взявши довжину нитки близько 1 м та 1.5 – 2 м відповідно.

7. Визначити значення прискорення вільного падіння середнє по всіх довжинах нитки (для першої довжини не враховувати значення прискорення вільного падіння, одержані на кутах 15° та 30°). Визначити відповідну похибку. Порівняти одержані результати із табличним значенням g .

8. Оформити роботу та зробити висновки.

Лабораторна робота №4. Визначення коефіцієнту жорсткості пружних тіл. Перевірка закону Гука

Необхідне обладнання:

- шматок гуми довжиною від 40см із трьома петлями: на обох кінцях і на середині; може бути замінений двома канцелярськими резинками
- підвіс для вантажів (разовий пакет, торба, тощо)
- порожня пляшка і мірна склянка; інший варіант – декілька вантажів відомої маси; маси вантажів підбираються таким чином, щоб обраний шматок гуми розтягувався під дією кожного з них на помітну відстань (1 – 5 см), але не втрачав пружності (деформація має повністю зникати при усуненні навантаження)
- лінійка

Короткі теоретичні відомості

Пружна деформація – це така зміна форми та/або розмірів твердого тіла під дією зовнішніх сил, за якої початкова геометрія тіла повністю відновлюються після усунення навантаження. Відновлення початкової форми відбувається за рахунок напружень, які виникають всередині матеріалу та протидіють зовнішній силі.

В найпростішому випадку деформації розтягу або стиску, сила пружності може бути записана у вигляді:

$$F_{\text{пр}} = -k\Delta l, \quad (4.1)$$

де Δl – абсолютна деформація (різниця відповідних розмірів тіла перед та після прикладання зовнішньої сили), k – коефіцієнт жорсткості, фізичний зміст якого може бути сформульований як сила, яку необхідно докласти, щоб змінити характерний розмір тіла на 1 метр.

Виходячи з 3-го закону Ньютона, зовнішня деформуюча сила F дорівнює за величиною та протилежна за напрямком силі пружності. Тоді, виходячи з (4.1), коефіцієнт жорсткості можна розрахувати за формулою:

$$k = \frac{F}{\Delta l}. \quad (4.2)$$

Як можна бачити з Рис. 4.1, деформація $\Delta l'$ половини досліджуваного стрижня є вдвічі меншою:

$$\Delta l' = \frac{\Delta l}{2}. \quad (4.3)$$

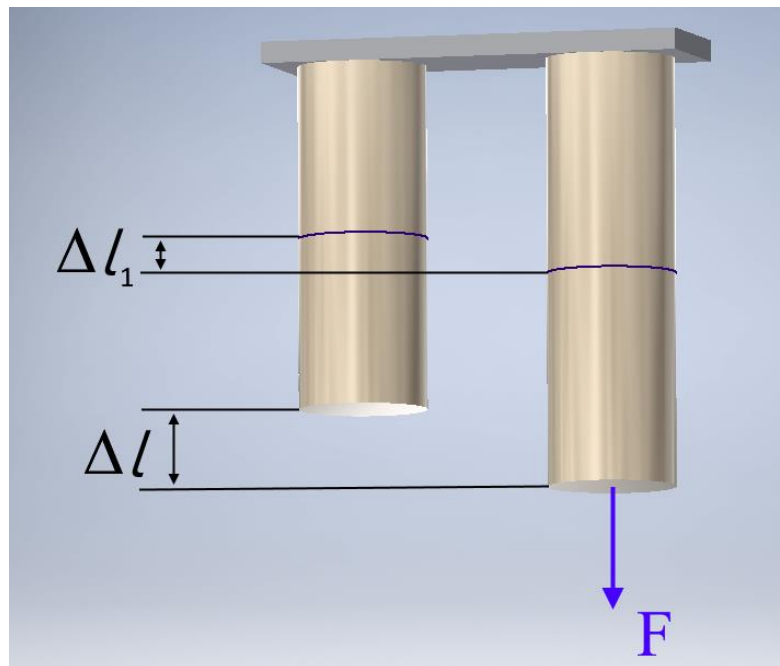


Рис. 4.1. Пружна деформація під дією прикладеної сили

Виходячи з 3-го закону Ньютона, сила, прикладена до середини тіла не відрізняється від сили F , прикладеної до його кінця. Тоді, на основі (4.2), коефіцієнт жорсткості k' половини стрижня можна подати у вигляді:

$$k' = \frac{F}{\Delta l'} = \frac{2F}{\Delta l} = 2k. \quad (4.4)$$

Далі очевидно, що для досягнення деформації $\Delta l'$ двох половин стрижня, закріплених поруч паралельно одна одній, до кожної з них слід докласти силу F . Тоді ефективний коефіцієнт жорсткості k'' такої системи двох паралельно закріплених половин становитиме:

$$k'' = \frac{2F}{\Delta l'} = 2k' = 4k. \quad (4.5)$$

Формули (4.4) та (4.5) можна вважати безпосередніми наслідками закону Гука для половини та двох паралельно закріплених половин пружного тіла, використання яких дозволяє, з одного боку експериментально визначити величини k , k' та k'' , а з іншого – порівняти їх між собою, перевіряючи таким чином наведені теоретичні міркування.

Хід роботи

1. Маємо резину із трьома петлями: на кінцях і на середині.

2. Підвісити резину за один з кінців. У випадку використання канцелярських резинок їх потрібно з'єднати одна з одною не розриваючи та підвісити таку складену резинку за один з кінців.

3. Підвісити на другий кінець торбу для вантажів (торбу з порожньою пляшкою).

4. Виміряти довжину резини між підвісами. Записати як l_0 .

5. Покласти в торбу відомий вантаж m_1 . Виміряти довжину резини між підвісами. Записати як l_1 .

6. Покласти в торбу відомий вантаж $m_2 > m_1$. Виміряти довжину резини між підвісами. Записати як l_2 .

7. Покласти в торбу відомий вантаж $m_3 > m_2$. Виміряти довжину резини між підвісами. Записати як l_3 .

8. Покласти в торбу відомий вантаж $m_4 > m_3$. Виміряти довжину резини між підвісами. Записати як l_4 .

9. Визначити величини $\Delta l_1 = l_1 - l_0$, $\Delta l_2 = l_2 - l_0$ і т.ін.

10. Визначити коефіцієнти жорсткості в кожному випадку за загальною формулою $k = \frac{m_i g}{\Delta l_i}$

11. Знайти середнє та розрахувати похибку.

12. Зняти торбу для вантажів з другого кінця резини та повісити на середину резини. У випадку використання канцелярських резинок, роз'єднати їх та підвісити одну з резинок одним кінцем на гачок, а на інший кінець почепити торбу для вантажів. Виконати пункти 4 – 11 для знаходження k' .

13. Підвісити резину за обидва кінця. Торбу з вантажами підвісити на середину резини. У випадку використання канцелярських резинок підвісити обидві резинки одним з кінців до гачка і на обидва інших кінця почепити торбу для вантажів. Виконати пункти 4 – 11 для знаходження k'' .

14. Перевірити виконання формул (4.4) та (4.5) для співвідношень між k , k' та k'' .

15. Оформити роботу та зробити висновки.

Лабораторна робота №5. Визначення модуля пружності твердих тіл

Необхідне обладнання:

- шматок гуми із петлями на обох кінцях; як і в попередній роботі може бути замінений на дві канцелярські резинки;
- підвіс для вантажів (разовий пакет, торба, тощо);
- порожня пляшка і мірна склянка;
- лінійка.

Короткі теоретичні відомості

Модуль пружності (модуль Юнга) твердого тіла E характеризує напруження σ , що виникають в твердому тілі під час пружної деформації. Відносна деформація вздовж певного напрямку може бути записана як:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (5.1)$$

де Δl та l – абсолютна деформація (див. Рис. 4.1) та розмір досліджуваного тіла вздовж цього напрямку. У випадку простої деформації (одновісного стиску або розтягу, див. Рис. 4.1) напруження, що виникають всередині деформованої речовини можна знайти за формулою:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (5.2)$$

де F – прикладене навантаження та S – площа перерізу. Відповідно, модуль Юнга досліджуваного матеріалу може бути розрахований як:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (5.3)$$

Хід роботи

1. Маємо резину із двома петлями на кінцях.
2. Підвісити резину за один з кінців. Те саме зробити із канцелярською резинкою, якщо саме вона використовується.
3. Підвісити на другий кінець торбу для вантажів (торбу з порожньою пляшкою).
4. Виміряти довжину резини між підвісами. Записати як l_0 .

5. Покласти в торбу відомий вантаж m_1 . Виміряти довжину між підвісами. Записати як l_1 .

6. Виміряти розміри та розрахувати площу перерізу резини у напрямку, перпендикулярному до навантаження. Відповідну площу позначити за S_1 . Слід розуміти, що у випадку використання цільної (нерозірваної) канцелярської резинки, відповідна площа – сума площ обох розтягнутих ділянок.

7. Покласти в торбу відомий вантаж $m_2 > m_1$. Виміряти довжину між підвісами. Записати як l_2 .

8. Виміряти розміри та розрахувати площу перерізу резини у напрямку, перпендикулярному до навантаження. Відповідну площу позначити за S_2 .

9. Покласти в торбу відомий вантаж $m_3 > m_2$. Виміряти довжину між підвісами. Записати як l_3 .

10. Виміряти розміри та розрахувати площу перерізу резини у напрямку, перпендикулярному до навантаження. Відповідну площу позначити за S_3 .

11. Визначити величини $\Delta l_1 = l_1 - l_0$, $\Delta l_2 = l_2 - l_0$ та $\Delta l_3 = l_3 - l_0$

12. Визначити модуль Юнга в кожному випадку за загальною формулою

$$E = \frac{m_i g}{S_i \Delta l_i}. \quad (5.4)$$

13. Виконати пункти 3 – 12 ще раз.

14. Знайти середнє значення модуля Юнга та розрахувати похибку.

15. Підвісити резину за обидва кінця. Торбу з вантажами підвісити на середину резини. У випадку використання канцелярських резинок – підвісити обидві резинки до гачка та почепити на них торбу із вантажами. Виконати пункти 3 – 14 за такою схемою навантаження, звертаючи увагу на змінені площу перерізу та довжину досліджуваного зразку.

16. Порівняти значення модулів Юнга, одержані в обох випадках

17. Оформити роботу та зробити висновки.

Лабораторна робота №6. Перевірка правила неперервності струменя та рівняння Бернуллі

Необхідне обладнання:

- водопровідний кран
- лінійка
- секундомір
- мірна посудина

Короткі теоретичні відомості

В процесі неперервної течії рідини по гладкій трубі змінного діаметра, середня швидкість рідини в різних точках труби зв'язана із площею відповідного перерізу рівнянням неперервності струменя:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2, \quad (6.1)$$

де v та S – швидкість та переріз труби відповідно. З іншого боку, співвідношення статичного та динамічного тисків рідини в різних точках труби може бути записано за допомогою рівняння Бернуллі:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + P_1 + \rho g h_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + P_2 + \rho g h_2, \quad (6.2)$$

де ρ – густина рідини, P_1 – статичний тиск (тиск у напрямку, перпендикулярному до руху рідини), h – висота відповідної ділянки труби.

Розглянемо тепер рух води в струмені, що витікає з вертикального крану (звичайнісінький кран на кухні). Статичний тиск в усіх точках такого струменя однаковий та дорівнює атмосферному тиску. Таким чином, рівняння (6.2) може бути переписане у вигляді:

$$2g\Delta h = v_2^2 - v_1^2, \quad (6.3)$$

де $\Delta h = h_2 - h_1$ – відстань (у вертикальному напрямку) між точками 1 та 2 струменя.

Об'єм рідини, що потрапляє в посудину за час t , може бути записаний через швидкість рідини та площу перерізу як:

$$V = Svt. \quad (6.4)$$

Враховуючи залежність (6.4), наслідком якого є рівняння неперервності струменя (6.1), рівняння (6.3), яке фактично являє собою рівняння Бернуллі для випадку вертикального потоку, можна подати у вигляді:

$$\Delta h = \frac{\left(\frac{V}{S_2 t}\right)^2 - \left(\frac{V}{S_1 t}\right)^2}{2g}. \quad (6.5)$$

Хід роботи

1. Відкрити воду в крані, зробивши близький до мінімального неперервний струмінь.
2. Почекати деякий час, аби пересвідчитись у тому, що струмінь залишається незмінним.
3. Заміряти діаметри d_1 та d_2 струменя біля виходу з крану та поблизу точки падіння води.
4. Не змінюючи інтенсивність потоку води підставити під струмінь посудину відомого об'єму V та визначити час t її наповнювання.
5. За формулою $S = \pi d^2/4$ розрахувати площі перерізів S_1 та S_2 струменя.
6. Розрахувати Δh за формулою (6.5).
7. Повторити пункти 1 - 6 декілька разів, дещо змінюючи потік води. Визначити середнє значення Δh та розрахувати похибку.
8. За допомогою лінійки виміряти відстань Δh між рівнями, на яких визначали діаметри d_1 та d_2 струменя та порівняти із величиною, розрахованою за (6.5). Зробити висновки.

Лабораторна робота №7. Експериментальне визначення критичного числа Рейнольдса

Необхідне обладнання:

- водопровідний кран
- лінійка
- секундомір
- посудина із відомим об'ємом

Короткі теоретичні відомості

Ламінарною називають течію, за якої шари рідини або газу рухаються паралельно один одному. Для ламінарної течії є характерними висока однорідність характеристик по об'єму речовини, гладкість її поверхні, низький рівень акустичної емісії (шуму) струменя. Підвищення швидкості течії, а також виникнення перешкод може призводити до того, що деякі шари речовини на окремих ділянках починають рухатися перпендикулярно до напрямку основного потоку, перетинаючи один одного. Такий характер течії називають турбулентним. Наявність неоднорідностей струменя, зникнення гладкості поверхні, погіршення прозорості, високий рівень шуму є характерними ознаками турбулентного струменя.

Емпіричним критерієм переходу ламінарної течії в турбулентну є число Рейнольдса, яке може бути розраховане за формулою:

$$Re = \frac{v\rho d}{\eta}, \quad (7.1)$$

де v, ρ, d та η – швидкість струменя, густина рідини, діаметр труби (струменя) та в'язкість рідини відповідно. Вважається, що для прямої гладкої труби критичне значення числа Рейнольдса, при перевищенні якого течія стає турбулентною, становить 2300.

Об'єм рідини, що потрапляє в посудину за час t , може бути записаний через швидкість рідини та площу перерізу струменя S як:

$$V = Svt. \quad (7.2)$$

Тоді число Рейнольдса для того чи іншого потоку можна подати у вигляді:

$$Re = \frac{v\rho d}{St\eta} = \frac{4V\rho}{\pi dt\eta}, \quad (7.3)$$

Хід роботи

1. Відкрити воду в крані, зробивши ламінарний неперервний струмінь.
2. Почекаати деякий час, аби пересвідчитись у тому, що струмінь залишається незмінним.
3. Заміряти діаметри d струменя в декількох місцях.
4. Не змінюючи інтенсивність потоку води підставити під струмінь посудину відомого об'єму V та визначити час t її наповнювання.
5. Розрахувати значення числа Рейнольдса для всіх визначених діаметрів за формулою (7.3).
6. Змінити потік води в крані на точно турбулентний.
7. Виконати пункти 2 – 5 для цього струменя.
8. Перевірити, чи одержані значення числа Рейнольдса відповідають характеру течії рідини в тому чи іншому випадку.
9. За можливості відкрити кран таким чином, щоб струмінь мав проміжний вигляд між чітко ламінарним та чітко турбулентним.
10. Виконавши пункти 2 – 5 оцінити критичне значення числа Рейнольдса для досліджуваного випадку та розрахувати похибки.
11. Зробити висновок.

Лабораторна робота №8. Визначення механізму опору повітря під час падіння тіл

Необхідні прилади:

- декілька нових поліетиленових разових пакетів «майка»;
- 2-3 тіла із відомою масою в межах 0.5 – 3г.

Короткі теоретичні відомості

Сила тяжіння, що діє на будь які матеріальні об'єкти поблизу поверхні Землі, спрямована до центру земної кулі та спричинює падіння. Падіння тіла у відсутності інших сил буде рівноприскореним та відбуватиметься із прискоренням рівним 9.81м/с^2 – прискоренням вільного падіння. Проте, під час руху в атмосфері тіло взаємодіє також із повітрям, яке протидіє рухові тіла, компенсуючи (повністю або частково) вплив сили тяжіння.

Розглядають 3 основні механізми вищевказаної взаємодії, які спричиняють виникнення різних за походженням сил. По-перше це так звана виштовхувальна сила або сила Архімеда, що пов'язана із різницею тисків атмосфери на нижню та верхню поверхні падаючого тіла, відповідає вазі повітря із об'ємом, що дорівнює об'єму тіла та може бути визначена за формулою:

$$F_A = \rho_{\text{п}} V_{\text{т}} g, \quad (8.1)$$

де $\rho_{\text{п}}$ – густина повітря, $V_{\text{т}}$ – об'єм тіла та g – прискорення вільного падіння. Ця сила не залежить від швидкості тіла в атмосфері та існує навіть за відсутності руху.

Силу в'язкості пов'язують із внутрішнім тертям між повітряним шаром, що оточує поверхню тіла та рухається разом із ним, та рештою повітря. За умови ламінарної течії повітря (повільного руху тіла) навколо об'єкту, що має форму кулі, силу в'язкості можна оцінити як:

$$F_{\text{в}} = 6\pi R \eta v, \quad (8.2)$$

де R та v – радіус та швидкість тіла, η – коефіцієнт в'язкості повітря.

Третя сила – сила опору повітря – спричинена відштовхуванням молекул повітря в напрямку руху тіла. Сила опору може бути пов'язаною із формулою для динамічного тиску та в найпростішому випадку оцінюється як:

$$F_o = \pi R^2 \frac{\rho_{\text{п}} v^2}{2}. \quad (8.3)$$

Таким чином, рівняння 2-го закону Ньютона для тіла, що повільно падає біля поверхні Землі, може бути записане як:

$$mg - \rho_{\text{п}} V_{\text{т}} g - 6\pi R \eta v - \pi R^2 \frac{\rho_{\text{п}} v^2}{2} = ma, \quad (8.4)$$

де m – маса тіла, a – його прискорення. Можна бачити, що при підвищенні швидкості падаючого тіла ліва частина рівняння (8.4) зменшується та врешті решт прямує до нуля, що, в свою чергу, означає зникнення прискорення, а отже рівномірний рух тіла. В цьому випадку, рівняння (8.4) може бути переписане як:

$$\pi R^2 \rho_{\text{п}} v_{\text{р}}^2 + 12\pi R \eta v_{\text{р}} + 2\rho_{\text{п}} V_{\text{т}} g - 2mg = 0, \quad (8.5)$$

де $v_{\text{р}}$ – швидкість рівномірного руху тіла під час падіння в атмосфері.

Хід роботи

а. Вибір досліджуваного тіла

Для забезпечення достатньо повільного руху в межах даної роботи в якості досліджуваного тіла пропонується використання разових пакетів «майка» для харчових продуктів із доданими до них невеличкими вантажами відомої маси в межах 0.5 – 3 грами. Маса пакета в грамах може бути знайдена за формулою:

$$m_{\text{п}} = 0.000167h(1.5b + 1)l, \quad (8.6)$$

де h – товщина плівки, з якої виготовлено пакет, в мікрометрах (товщину плівки завжди наведено на упаковці із відповідними пакетами), b та l – відповідно ширина та висота пакету в сантиметрах. Коефіцієнт 0.000167 обчислено із урахуванням густини поліетилену, а також особливостей форми пакету (кількість шарів плівки, вирубка, розмір бічних стінок). Наприклад, стандартний пакет «майка» розмірами 22x36см із товщиною плівки 10мкм має масу $m_{\text{п}} = 0.000167 \cdot 10 \cdot 34 \cdot 36 = 2.04\text{г}$.

Невеличкими вантажами відомої маси можуть бути маленькі цукерки (масу упаковки слід розділити на кількість цукерок в упаковці для одержання маси однієї цукерки), канцелярські скріпки, кнопки, тощо. Інший спосіб – використати шматки стандартного аркуша А4 (маса цілого аркуша складає $80 \cdot 0.21 \cdot 0.3 = 5.04\text{г}$). Відповідно піваркуша – 2.52г, чверть аркуша – 1.26г...

Таким чином, в якості одного з тіл можна використовувати пакет із ручками, зав'язаними таким чином, щоб якомога більше повітря опинилося всередині. Іншими тілами можуть бути той самий пакет із прикріпленим до нього (або покладеним в середину) вантажем.

Таким чином, маса досліджуваного тіла становитиме:

$$m = m_{\text{п}} + m_{\text{в}}, \quad (8.7)$$

де $m_{\text{в}}$ – маса вантажа.

б. Хід експерименту

1. Виміряти відстань від підлоги до будь якої відмітки в кімнаті на висоті 1.5 – 2м.
2. Зробити з пакета «повітряну кулю», зав'язавши ручки після «надування» пакету.
3. Виміряти приблизний радіус R утвореної «кулі».
4. Відпустити кулю з прив'язаним тілом з висоти, вищої на 30 – 50 см, аніж зроблена відмітка та заміряти час, що пройде між перетином кулею рівня відмітки та падінням на підлогу.
5. Повторити пункти 3 та 4 не менше 5-ти разів.
6. Прив'язати до «кулі» вантаж відомої маси.
7. Повторити пункти 2 – 5 для кулі із вантажем.
8. Почепити вантаж іншої маси та повторити пункти 2 – 5.
9. Розрахувати середні значення швидкості руху в кожному з випадків та оцінити похибки.

в. Визначення основного механізму взаємодії тіла із повітрям.

10. Підставити виміряні значення радіусу R «кулі», а також значення густини $\rho_{\text{п}}$ та в'язкості η повітря (відповідні величини слід знайти в інтернеті) в рівняння (8.5). Оскільки виштовхувальна сила (сила Архімеда) дорівнює вазі повітря, що займає об'єм самого тіла, у випадку кулі без додаткових вантажів вона лише

компенсуватиме вагу повітря, яке знаходиться в «кулі». Отже, 3-й доданок в рівнянні (8.5) можна прийняти рівним нулеві. Маса тіла m дорівнюватиме масі пакету та може бути знайдена за (8.6). З рештою, залежність (8.5) має перетворитися на квадратне рівняння із однією невідомою v_p .

11. Розв'язати одержане рівняння, знайшовши значення v_p та порівняти його із експериментальним значенням швидкості «кулі» без додаткових вантажів.

12. Підставивши у формули (8.2) та (8.3) експериментальне значення швидкості «кулі» без додаткових вантажів обчислити та порівняти між собою сили опору повітря за рахунок динамічного тиску (8.3) та в'язкості (8.2). Зробити висновок щодо основного механізму протидії рухові кулі у повітрі.

13. Виконати пункти 10 та 11 для другого та третього тіл («куля» із першим та другим вантажем). При цьому вважати, що об'єм тіла для підстановки у третій доданок рівняння (8.5) відповідає об'єму вантажа, а масу m для кожного з тіл знаходити за формулою (8.7) як суму мас пакету та вантажа.

14. Підставивши у формули (8.1), (8.2) та (8.3) експериментальне значення швидкості другого та третього тіл обчислити та порівняти між собою силу Архімеда (8.1), а також сили опору повітря за рахунок динамічного тиску (8.3) та в'язкості (8.2). Зробити висновок щодо основного механізму протидії рухові тіл у повітрі в даних випадках.

15. Зробити загальні висновки.

Лабораторна робота № 9. Визначення коефіцієнту поверхневого натягу рідин методом краплини

Необхідні прилади:

- шприц на 10мл з голкою;
- вода;
- засіб для миття посуду або шампунь;
- олія або спирт.

Короткі теоретичні відомості

Сила поверхневого натягу, що діє вздовж дотичної до поверхні рідини та пов'язана із особливостями приповерхневого шару, може бути знайдена за формулою:

$$F_H = \alpha l, \quad (9.1)$$

де α та l – коефіцієнт поверхневого натягу та довжина контуру, що обмежує поверхню відповідно.

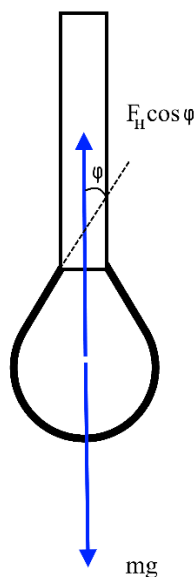


Рис. 9.1. Краплина на голці

Для дослідження явища поверхневого натягу в домашніх умовах спостерігатимемо процес повільного витікання рідини з отвору тонкої голки. Розглядаючи основні сили, що діють на краплину, яка висить на голці можна бачити, що момент відриву зумовлений рівністю між силою тяжіння та проекцією сили поверхневого натягу на вертикальну вісь (Див. Рис. 9.1).

В цьому випадку довжина контуру, що обмежує поверхню – це довжина кола, діаметр d якого дорівнює діаметру голки. Таким чином, формула для знаходження коефіцієнту поверхневого натягу може бути записана у вигляді:

$$\alpha = \frac{mg}{\pi d \cos \varphi}, \quad (9.2)$$

де m – маса краплини. Слід зазначити, що за неможливості точного визначення кута φ , його величину для рідин, густина та натяг яких не суттєво відрізняються від води, можна наближено вважати рівною 30° .

Хід роботи

1. Надіти на кінець шприца голку та вийняти поршень.
2. Тримуючи шприц над посудиною влити в нього 3 – 10 мл води.
3. Утримуючи шприц у вертикальному положенні голкою вниз спостерігати за краплинами, що витікають з голки. Порахувати кількість краплин N , необхідну для витікання певного об'єму V рідини. При використанні шприца таким об'ємом зручно обрати 2 – 4 мл.
4. За формулою $m = \frac{\rho \cdot V}{N}$, де ρ – густина рідини, визначити масу краплини.
5. За допомогою штангенциркуля або мікрометра виміряти діаметр голки. За відсутності відповідних приладів діаметр голки можна знайти в інтернеті. Стандартний діаметр голки шприца об'ємом 10 мл становить 0.8мм.
6. Повторити пункти 2 – 5 декілька разів.
7. Розрахувати коефіцієнт поверхневого натягу α за формулою (9.2), приймаючи $\varphi = 30^\circ$. Оцінити похибки.
8. Виконати пункти 2 – 7 для мильного розчину (декілька краплин засобу для миття посуду на склянку води) та олії або спирту.
9. Зробити висновки.

Лабораторна робота № 10. Перевірка рівняння Менделєєва-Клапейрона на прикладі ізобарного стиснення повітря

Необхідні прилади:

- пластикова пляшка об'ємом 1-2 літри
- миска з водою
- холодильник
- мірна склянка або шприц

Короткі теоретичні відомості

Рівняння Менделєєва-Клапейрона пов'язує між собою такі макроскопічні характеристики ідеального газу як тиск (P), об'єм (V), абсолютну температуру (T) та кількість речовини (ν):

$$PV = \nu RT, \quad (10.1)$$

де $R = 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – універсальна газова стала. Розглядаючи процеси, що відбуваються із незмінною кількістю газу, позначимо його тиск, об'єм та температуру на початку процесу як P_1 , V_1 та T_1 , а відповідні характеристики в кінці процесу як P_2 , V_2 та T_2 . Записавши рівняння (10.1) для початкового та кінцевого станів газу та поділивши їх одне на одне матимемо залежність:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}. \quad (10.2)$$

Рівняння (10.2) є безпосереднім наслідком рівняння Менделєєва-Клапейрона та ілюструє взаємозалежність параметрів ідеального газу за незмінної кількості речовини. Так наприклад, підвищення температури газу призводить до збільшення добутку тиску на об'єм, збільшення об'єму можливе або під час нагрівання або спричинюватиме зниження тиску, тощо.

Одним з простих способів перевірки залежності (10.2) є дослідження ізопроцесів – еволюції параметрів газу за умови незмінності одного з них. Так, ізобарним ($P = \text{const}$) називають процес, що відбувається за сталого тиску, ізохорним ($V = \text{const}$) – за сталого об'єму, ізотермічним ($T = \text{const}$) – температури.

В межах даної роботи пропонується вивчення закономірностей зменшення об'єму повітря при його охолодженні за сталого тиску.

Розглянемо посудину із об'ємом V_1 , заповнену ідеальним газом, що має температуру T_1 та знаходиться під тиском P . При зниженні температури до T_2 за незмінного тиску, об'єм V_2 газу знайдемо з рівняння (10.2):

$$V_2 = \frac{T_2 V_1}{T_1}. \quad (10.3)$$

Припустимо, що розглядувана посудина має незмінний об'єм. Тоді, для підтримання сталого тиску протягом охолодження, вона має сполучатися із навколишнім середовищем. Стиснення газу в посудині призводитиме до часткового заповнення посудини речовиною з навколишнього середовища, причому об'єм речовини, що увійде в посудину, дорівнюватиме різниці об'ємів газу та становитиме:

$$V_{\text{зов}} = V_1 - \frac{T_2 V_1}{T_1} = V_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (10.4)$$

Хід роботи

1. За допомогою шила або голки зробити невеличкий отвір в пластиковій пляшці якомога ближче до кришки.
2. Заповнити водою каструлю приблизно на третину.
3. Покласти закриту кришкою пляшку в каструлю таким чином, щоб отвір був під водою. Вода почне заповнювати пляшку. Залишити пляшку в спокої на 3-5 хвилин, не торкаючись її рукою. Дочекатися, поки заповнення пляшки припиниться (кількість води в пляшці перестане збільшуватися).
4. Вийняти пляшку з води, відкрити кришку та виміряти об'єм води ΔV_1 , що увійшов в пляшку.
5. Повторити пункти 3, 4 декілька разів та визначити середнє значення ΔV_1 .
6. Розрахувати початковий об'єм повітря в пляшці $V_1 = V - \Delta V_1$, де V – об'єм пляшки.
7. Витерти пляшку рушником та потримати в кімнаті 3 – 5 хвилин для встановлення температури в ній рівної до температури кімнати.

8. Знову покласти закриту пляшку в каструлю отвором вниз та поставити каструлю із пляшкою в холодильник на 15-20 хвилин.

9. Вийняти пляшку з води, відкрити кришку та виміряти об'єм води ΔV_2 , що ввійшов в пляшку. Визначити об'єм речовини, що зайшов у пляшку під час охолодження $V_{\text{зов}} = \Delta V_2 - \Delta V_1$.

10. Виконати пункти 7 – 9 ще двічі.

11. Визначити середнє значення $V_{\text{зов}}$ та розрахувати похибки.

12. Вважаючи температуру холодильника приблизно 3°C , а температуру в кімнаті 22°C (або, за наявності, використовуючи значення термометрів) розрахувати значення $V_{\text{зов}}$ за формулою (10.4) та порівняти із експериментально визначеною величиною.

13. Зробити висновки.

Додаток 1. Приклад оформлення лабораторної роботи (фізичний жарт)

Лабораторна робота № і.

Визначення залежності питомої швидкості зникнення цукерок у населеному приміщенні від типу наявних напоїв

Прилади та матеріали: цукерки «Шарм» в необмеженій кількості, люди віком до 25 років або студенти, чай, кава, мінеральна вода «Боржомі», пиво, прилад для підрахунку кількості з'їдених цукерок (очі ситого експериментатора), секундомір.

Короткі теоретичні відомості.

Відомо, що люди, а також студенти, опинившись у кімнаті, яка містить цукерки, починають їх їсти. Питома швидкість поїдання цукерок, що являє собою середню кількість цукерок, що її з'їдає одна людина або один студент протягом однієї хвилини, може бути знайдена за формулою:

$$\omega = \frac{n}{k} = \frac{N}{tk}, \quad (1)$$

де N – середня кількість цукерок, з'їдених за час t , k – кількість людей в кімнаті. Вона залежить від багатьох факторів, а саме: віку людей, якості цукерок, загального настрою, а також типу напоїв, наявних в кімнаті. Вплив того чи іншого напою може бути знайденом за допомогою так званого коефіцієнту підсилення поїдання, фізичний зміст якого полягає у відношенні питомої швидкості поїдання цукерок за наявності в кімнаті із цукерками даного напою (ω) до відповідної величини за відсутності будь якого напою (ω_0):

$$\delta = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (2)$$

Порядок виконання роботи.

1. Обладнати кімнату із цукерками чаєм та пристроями для його пиття (чашками).
2. Завести в кімнату 3-х студентів (або людей).
3. Визначити кількість з'їдених цукерок протягом перших 5 хвилин. Заповнити таблицю, не забувши усунути людей (і особливо студентів) з кімнати з цукерками.
4. Повторити дослід ще декілька разів, кожен раз використовуючи свіжі групи студентів.
5. Повторити пункти 1 – 4, обладнавши кімнату послідовно кавою, «Боржомі» та пивом.
6. Повторити пункти 1 – 4 у відсутності будь-якого напою.
7. Визначити величини питомої швидкості поїдання цукерок за формулою (1) та коефіцієнти підсилення для кожного з напоїв за формулою (2).
8. Зробити висновок.

Експериментальні результати

№ досліду	Речовина	к, штук	N, штук	t, хв.	ω , 1/хв.	$\bar{\omega}$, 1/хв
1	Чай	3	15	5	1	1.04
2			18		1.2	
3			14		0.933	
4	Кава		19		1.26	1.088
5			13		0.866	
6			17		1.133	
7	Боржомі		11		0.733	0.64
8			8		0.53	
9			10		0.66	
10	Пиво		2		0.13	0.2
11			4		0.266	
12			3		0.2	
13	Без напою		4		0.26	0.33
14			6		0.4	
15			5		0.33	

$$\delta_{\text{чаю}} = 3.15$$

$$\delta_{\text{кави}} = 3.3$$

$$\delta_{\text{Борж}} = 1.94$$

$$\delta_{\text{пива}} = 0.6$$

Похибки

$$\Delta\omega_{\text{чаю}} = 4.3 \sqrt{\frac{(1.04-1)^2 + (1.04-1.2)^2 + (1.04-0.93)^2}{3(3-1)}} = 0.345;$$

Аналогічно

$$\Delta\omega_{\text{кави}} = 0.506$$

$$\Delta\omega_{\text{Борж}} = 0.25$$

$$\Delta\omega_{\text{пива}} = 0.17$$

$$\Delta\omega_0 = 0.17$$

Висновок:

Визначено питому швидкість поїдання цукерок за наявності різних напоїв. Відповідні величини становлять: $\omega_{\text{чаю}} = (1.0 \pm 0.3) \text{ 1/хв}$, $\omega_{\text{кави}} = (1.1 \pm 0.5) \text{ 1/хв}$, $\omega_{\text{Борж}} = (0.6 \pm 0.3) \text{ 1/хв}$, $\omega_{\text{пива}} = (0.2 \pm 0.17) \text{ 1/хв}$. Встановлено, що чай та кава підвищують питому швидкість більш ніж втричі, в той час як вплив «Боржомі» істотно більш помірний із коефіцієнтом підсилення, що не перевищує 2. Пиво істотно знижує швидкість та може бути рекомендованим для економії цукерок під час заходів із великою кількістю учасників. Похибки, які становлять 30 – 50% від результату пов'язані із істотною індивідуальною відмінністю між різними людьми, які приймали участь у

досліді та можуть бути знижені шляхом виконання більшої кількості експериментів.