

складається з дискретних значень частот  $f_1, f_2, \dots, f_N$ , то він називається лінійчатим. Про звук з лінійчатим спектром говорять, що він **тональний**. Найменша частота зі спектру тонального звуку називається основною і вона визначає його **висоту**. Відносна інтенсивність хвиль вищих частот (так званих обертонів) визначає **тембр** звуку. Саме завдяки різному спектральному складу розрізняють звуки різних музичних інструментів, а усі людські голоси є унікальними.

**Гучність** звуку визначається інтенсивністю звукових хвиль. Існує мінімальне значення інтенсивності звуку, при якому орган слуху здатний його сприйняти. Таке значення називається порогом чутності. Поріг чутності визначається індивідуальними особливостями організму та відчутно залежить від частоти. Як видно з рисунка 1 (крива 1), найвища чутливість спостерігається на частотах 1000-4000 Гц. Для значень інтенсивності, які знаходяться вище так званого порогу больового відчуття (крива 2 рисунка 1), звукова хвиля вже не викликає відчуття звуку.

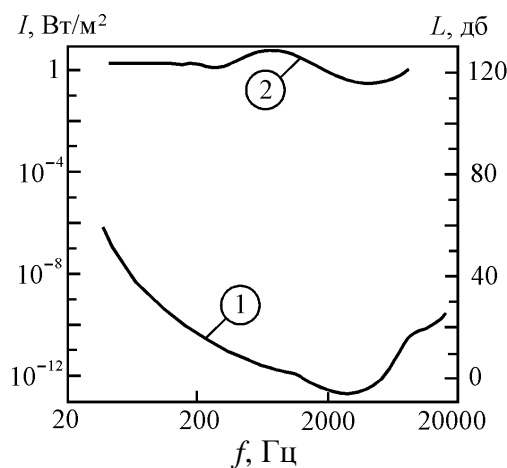


Рисунок 1 – Усереднені слухові характеристики людського вуха: 1 – поріг чутності; 2 – поріг больового відчуття

Суб'єктивно гучність звуку зростає істотно повільніше, ніж інтенсивність звукових хвиль. Тому кількісну міру гучності – так званий **рівень гучності**  $L$  – вводять як логарифм відношення інте-

нсивності  $I$  наявного звуку до інтенсивності  $I_0 = 10^{-12}$  Вт, що відповідає порогу чутності на частоті 1000 Гц

$$L = \lg \frac{I}{I_0}. \quad (8)$$

### 2.3. Використання звуку у природі та техніці

Умовно дію звуку можна поділити на два типи. Якщо під час взаємодії звукової хвилі із середовищем відбуваються зміни, зумовлені саме поглиненою енергією цієї хвилі, то говорять про енергетичну дію звуку. Якщо ж реакція на звукову хвилю відбувається за рахунок інших джерел енергії та визначається усією сукупністю характеристик звукової хвилі (її акустичним спектром, залежністю амплітуди від частоти, тривалістю), говорять про інформаційну дію звуку.

Енергетична дія звуку, як правило, має місце для досить потужних джерел звуку антропогенного походження. Тому така дія звуку найчастіше зустрічається в різноманітних технологічних процесах, наприклад: ультразвукове зварювання та різка металу, диспергування та створення колоїдних розчинів, сепарація твердих частинок та інше. Енергетична дія звуку також є основою багатьох методів терапії у медицині. Так, встановлено, що ультразвук заданої амплітуди та частоти має протизапальну та анальгезуючу дію. На окрему розмову заслуговує так званий фонофорез – метод, в якому звук змінює проникність клітинних мембран для розчинів речовин, що дозволяє спрямовувати за допомогою звуку лікарські препарати безпосередньо до ділянки організму або органу, що цього потребує.

У той самий час звукові хвилі можуть призводити до прямого руйнування біологічних клітин. Періодична зміна тиску всередині рідини внаслідок поширення звукової хвилі за певних умов може призводити до утворення мікроскопічних пухирців пари всередині клітинної рідини (так звана кавітація). У процесі інтенсивного виділення газів всередину цих пухирців вони швидко збільшують свій об'єм, що призводить до вибухоподібного руйнування усієї клітини. За даним принципом працюють при-

хвилі. **Поздовжньою** ж називається хвиля, в якій елементи середовища здійснюють коливання вздовж напрямку поширення хвилі. У твердих тілах можуть розповсюджуватися одночасно як поперечні, так і поздовжні хвилі, тоді як в газах – лише поздовжні.

У найпростішому випадку, коли коливання є гармонічними, а їх амплітуда залишається незмінною, хвильовий процес описується рівнянням плоскої монохроматичної хвилі

$$\xi(x, t) = \xi_0 \cos(\omega t - kx + \alpha), \quad (2)$$

де  $\xi$  – зміщення з положення рівноваги елемента середовища в точці з координатою  $x$  у момент часу  $t$ ;  $\xi_0$  – амплітуда хвилі;  $\omega$  – циклічна частота ( $\omega = 2\pi/T$ );

$$k = \omega/v = 2\pi/\lambda \quad (3)$$

– хвильове число;  $\alpha$  – початкова фаза.

Легко переконатися у тому, що вираз (2) є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Рівняння (4) називають **хвильовим рівнянням**.

Особливість хвильового процесу полягає у тому, що перенесення речовини в його рамках не відбувається, тобто середнє за період коливань значення  $\xi$  дорівнює нулю. Натомість, поширення хвилі супроводжується перенесенням енергії. Середня енергія, яка переноситься пружною хвилею за одиницю часу через одиницю поверхні, називається **інтенсивністю** хвилі і визначається як

$$I = \frac{1}{2} \rho \xi_0^2 \omega^2 v, \quad (5)$$

де  $\rho$  – об'ємна густина пружного середовища.

Швидкість поширення пружних хвиль у газах визначається як

маневрувати у польоті, уникаючи зіткнень, абсолютно не користуючись зором. Для нічних тварин, таких, як кажани, ехолокація є як засобом навігації, так і невід'ємною частиною полювання. Положення своєї жертви кажан встановлює з великою точністю, оскільки аналізується не лише час руху звукового сигналу, а й величину зміни амплітуди звуку за рахунок його поглинання у повітрі. Цікаво, що у метеликів з родини капустянка, на яких полюють кажани, розвинувся «генератор» ультразвукових перешкод, «що збиває зі сліду» хижаків-переслідувачів.

Для живої природи можна навести приклади, коли встановити чи є дана дія звуку енергетичною або інформаційною досить важко. У таких випадках говорять про біологічну активність звуку. Наприклад, позитивний вплив деякої музики на людину та деяких тварин не можна пояснити виключно інформаційною або енергетичною дією.

Біологічна активність звуку не завжди має позитивний характер. Одним з яскравих прикладів цього є так званий «голос моря» – інфразвукові хвилі з частотою приблизно 7 Гц. Така частота близька до частоти так званого альфа-ритму головного мозку людини, має надзвичайну негативну дію і викликає нестерпний біль. Подібні хвилі можуть виникати під час вітру над штормовими хвилями моря за відповідного співвідношення їх напрямків та швидкостей. Унаслідок низької частоти такі хвилі дуже погано поглинаються у повітрі та поширюються на досить великі відстані від місця шторму. Якщо один з розмірів корпусу корабля кратний до половини довжини такої хвилі, корабель стає своєрідним резонатором, у якому виникає так звана стояча хвиля (див. підрозділ 2.4.) з амплітудою, набагато більшою від амплітуди початкової хвилі за рахунок акумуляції її енергії. В історії зафіксована низка випадків реалізації такої ситуації, наслідком якої була швидка загибель усієї команди судна.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс фізики. Том 1. Механіка. Молекулярная фізика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 1. Класична механіка і теорія відносності. Молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка. Механічні коливання та хвилі. Звук. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика та магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс фізики. – М.: Высш. шк., 1990.

$$x_n = \pm n \lambda/2, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Точки, в яких амплітуда коливань дорівнює нулю, називаються **вузлами** стоячої хвилі. Координати вузлів  $x_n$  визначаються з умови  $A(x) = 0$ , тобто

$$x_n = \pm (n + \frac{1}{2}) \lambda/2, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

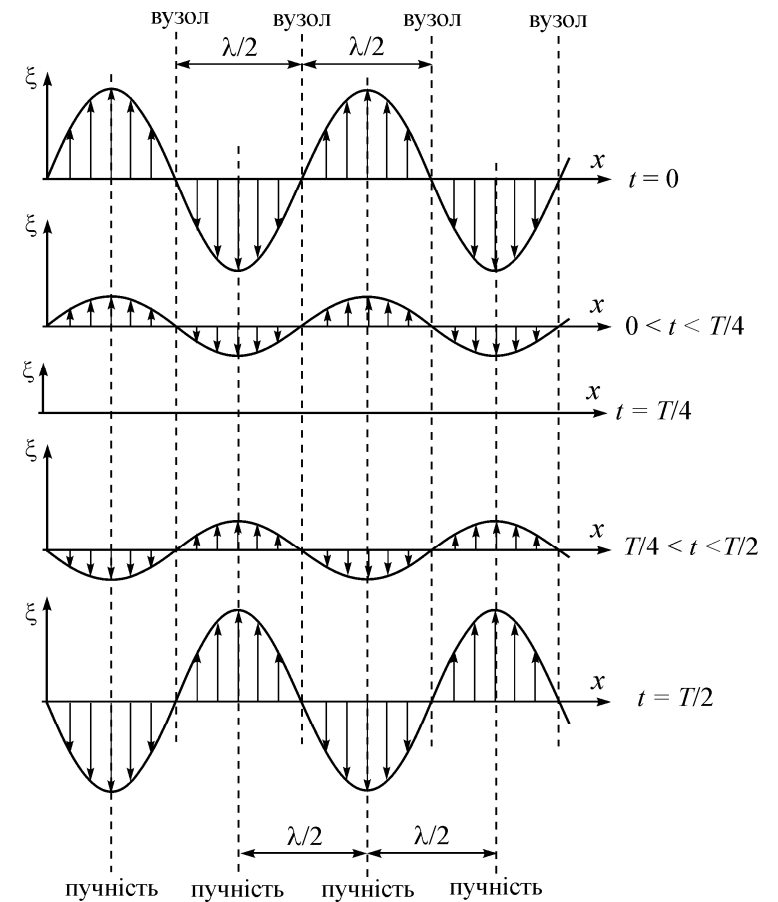


Рисунок 2 – “Моментальні фотознімки” ( $t = \text{const}$ ) стоячої хвилі для різних фаз

## 5.2. Перевірка залежності величини прискорення від маси системи при сталій величині рушійної сили

1. Обчисліть еквівалентну масу системи  $M_{e1}$  за допомогою рівності (13). Результат занесіть до таблиці 2. Оскільки перша половина дослідів з перевірки обернено пропорційності прискорення до маси аналогічна другій половині дослідів з перевірки пропорційності прискорення до сили, до таблиці 2 перенесіть відповідні дані з таблиці 1.
2. Пригвинтіть додаткові вантажі до обох платформ системи та обчисліть еквівалентну масу системи  $M_{e2}$  за допомогою рівності (13). Результат запишіть у таблицю 2.
3. Виміряйте час руху системи зі зміненою масою п'ять разів у спосіб, наведений вище. Результати запишіть у таблицю 2.
4. Знайдіть середнє значення часу руху для останньої серії експериментів. Результати запишіть у таблицю 2.
5. Підрахуйте відношення прискорень вантажів для обох випадків згідно з виразом (15). Порівняйте це відношення з відношенням еквівалентних мас  $M_{e2}/M_{e1}$ .
6. Результати обчислень занесіть до таблиці 2.
7. Знайдіть відносне відхилення перевірки обернено пропорційності прискорення до маси за формулою

$$\delta_M = \frac{|a_1/a_2 - M_{e2}/M_{e1}|}{M_{e2}/M_{e1}} 100\% . \quad (17)$$

Таблиця 2 – Перевірка залежності  $a \sim 1/M$  при  $F = const$

№	$t, c$	$M_{e1}, \Gamma$	$H, m$	№	$t, c$	$M_{e2}, \Gamma$	$H, m$
6				11			
...				...			
10				15			
Середнє				Середнє			
$\frac{a_1}{a_2} =$		$\frac{M_{e2}}{M_{e1}} =$		$\delta_M = \frac{ a_1/a_2 - M_{e2}/M_{e1} }{M_{e2}/M_{e1}} 100\% =$			

що відповідають максимальній інтенсивності звуку, фіксуються за допомогою шкали 7, нанесеної на трубу.

У відповідності до виразу (11) відстань між сусідніми пучностями дорівнює половині довжини біжучої хвилі. В результаті маємо експериментальну методику визначення довжини хвилі. Якщо частота хвилі є відомою, то за допомогою виразу (1) легко визначити швидкість її поширення.

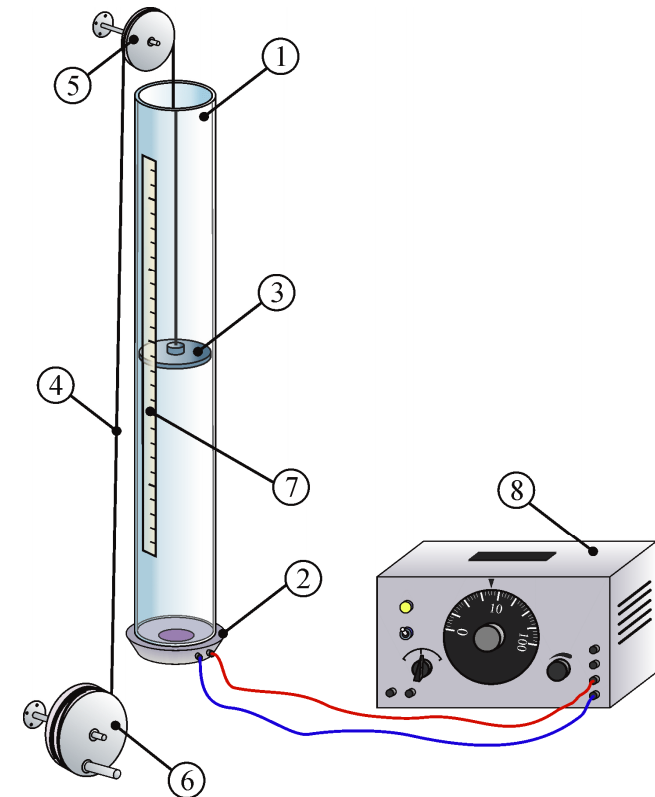


Рисунок 3 – Схематичне зображення експериментальної установки: 1 – скляна труба; 2 – дифузorz; 3 – рухомий металевий екран; 4 – нитка; 5 – блок; 6 – блок з рукояткою для намотування нитки; 7 – шкала для визначення положення екрана; 8 – звуковий генератор

де індекси  $i$  та  $j$  позначають будь-які два вимірювання.

Детально з будовою машини Атвуда можна ознайомитися за допомогою схеми на рисунку 1б. Процедура вимірювання часу автоматизована. Зі стартом відліку електронного секундоміра електромагнітний затискач б відпускає нитку 3, і таким чином починається рух. Щойно спрацьовує фотоелемент приймального столика 7, секундомір автоматично зупиняє відлік, а затискач б затискає нитку 3 та припиняє подальший рух.

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

### 5.1. Перевірка залежності величини прискорення від сили при сталій масі системи

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Компенсуйте силу тертя в системі. Для цього покладіть стільки тонких паперових вантажів масами 0,1 г на платформу 5 (див. рис. 1б), щоб система після слабкого поштовху рухалася вниз рівномірно. В цьому випадку сили тертя будемо вважати скомпенсованими силою тяжіння  $\Delta mg$  додаткових вантажів.
3. Покладіть на платформу 4 вантаж масою 1 г, а на платформу 5 вантажі масами 1 г та 2 г. При цьому маса перевантаження становитиме  $m_{n1} = 2$  г.
4. Перевірте електричне з'єднання секундоміра із столиком-вимикачем 7. Увімкніть електричний секундомір.
5. Установіть на секундомірі нульові значення часу. Для цього натисніть на кнопку "Сброс".
6. Підніміть платформу 5 на вибрану висоту  $H$  (тут і далі ця висота повинна бути однаковою). Забезпечте відсутність коливань платформ 5 та 4 та за допомогою кнопки "Пуск" секундоміра запустіть відлік часу. При цьому затискач б відпустить нитку й почнеться рух.
7. Після спрацювання фотоелемента приймального столика 7 та зупинки системи запишіть до відповідного стовпчика таблиці 1 час, вимірянний секундоміром.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

$f_1 = \dots\dots\dots$ , Гц							
$x_{1j}$ , см							
$\delta x_{1j}$ , см							
$\Delta x_{1j}$ , см							

$\langle \delta x_1 \rangle =$ = ....., м	$\lambda_1 =$ = ....., м	$\Delta \lambda_1 =$ = ....., м	$\Delta f =$ = ....., Гц	$v_1 =$ = ....., м/с	$\Delta v_1 =$ = ....., м/с
--	-----------------------------	------------------------------------	-----------------------------	-------------------------	--------------------------------

$f_2 = \dots\dots\dots$ , Гц							
$x_{2j}$ , см							
$\delta x_{2j}$ , см							
$\Delta x_{2j}$ , см							

$\langle \delta x_2 \rangle =$ = ....., м	$\lambda_2 =$ = ....., м	$\Delta \lambda_2 =$ = ....., м	$\Delta f =$ = ....., Гц	$v_2 =$ = ....., м/с	$\Delta v_2 =$ = ....., м/с
--	-----------------------------	------------------------------------	-----------------------------	-------------------------	--------------------------------

$f_3 = \dots\dots\dots$ , Гц							
$x_{3j}$ , см							
$\delta x_{3j}$ , см							
$\Delta x_{3j}$ , см							

$\langle \delta x_3 \rangle =$ = ....., м	$\lambda_3 =$ = ....., м	$\Delta \lambda_3 =$ = ....., м	$\Delta f =$ = ....., Гц	$v_3 =$ = ....., м/с	$\Delta v_3 =$ = ....., м/с
--	-----------------------------	------------------------------------	-----------------------------	-------------------------	--------------------------------

11. Похибки визначення швидкості звуку для кожної частоти розрахуйте як

$$\Delta v_i = v_i \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f_i}{f_i}\right)^2}, \quad (14)$$

де як  $\Delta f_i$  слід брати половину ціни поділки шкали звукового генератора. Похибка визначення довжини хвилі при цьому становить

$$\Delta \lambda_i = \sqrt{(\Delta_1 x_i)^2 + (\Delta_2 x_i)^2}, \quad (15)$$

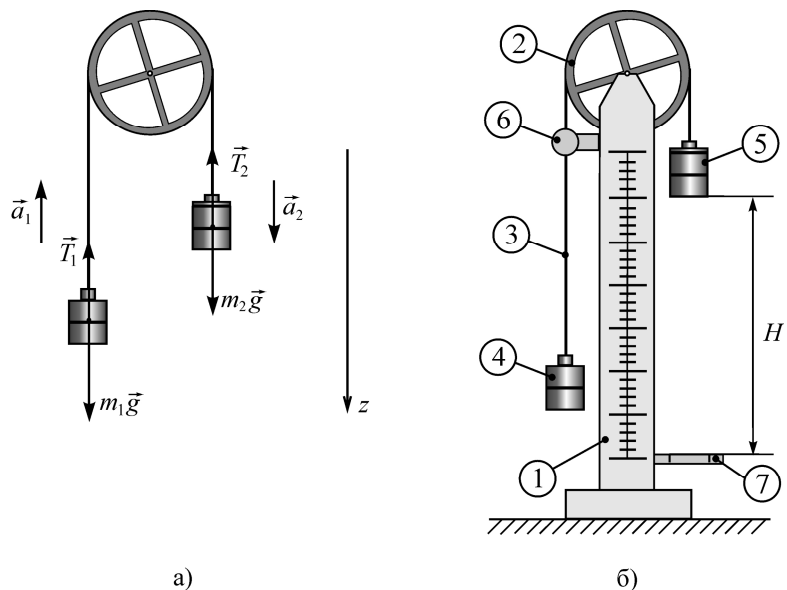


Рисунок 1 – Рух вантажів у машині Атвуда (а); схематичне зображення машини Атвуда (б): 1 – вертикальна основа зі шкалою; 2 – блок; 3 – легка нитка; 4, 5 – платформи для вантажів; 6 – електромагнітний затискач; 7 – приймальний столик з фотоелементом

$$\Delta W_p = m_1 g H - m_2 g H. \quad (6)$$

За рахунок зміни енергії  $\Delta W_p$  вантажі  $m_1$ ,  $m_2$  та блок набули кінетичної енергії

$$\Delta W_k = \frac{1}{2} \cdot (m_1 + m_2) v^2 + \frac{1}{2} \cdot I \omega^2, \quad (7)$$

де  $v$  – швидкість, якої набули вантажі за час  $t$ ;  $I$  – момент інерції блоку;  $\omega$  – кутова швидкість обертання блоку. При цьому повинна виконатися робота  $A$  проти сил тертя  $F_{mp}$

$$A = F_{mp} H. \quad (8)$$

З урахуванням виразів (6)-(8) та закону збереження енергії маємо

$$(m_2 - m_1) g H = \frac{1}{2} \cdot (m_1 + m_2) v^2 + \frac{1}{2} \cdot I \omega^2 + F_{mp} H. \quad (9)$$

7. Перелічити характеристики звуку та пояснити їх фізичний зміст.
8. Що називають стоячою хвилею та чим вона відрізняється від біжучої?
9. Що таке рівень гучності та як він залежить від частоти?
10. Наведіть приклади застосування звукових хвиль у природі та техніці.

### На оцінку “відмінно”

11. Пояснити сутність методу резонансу, що використовується в даній лабораторній роботі.
12. Одержати теоретичний вираз для швидкості звуку у газах (6).
13. Одержати рівняння стоячої хвилі та проілюструвати характер коливальних процесів у стоячій хвилі.
14. Одержати розрахункову формулу (13).
15. Одержати вираз для розрахунку похибки (14).

### СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1982.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 1. Класична механіка і теорія відносності. Молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка. Механічні коливання та хвилі. Звук. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики. у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика та магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Ультразвук>.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i, \quad (1)$$

де  $\vec{p}$  – імпульс тіла, що дорівнює добутку його маси на швидкість ( $\vec{p} = m\vec{v}$ ); а додавання ведеться за усіма  $N$  силами, що діють на тіло. Рівняння (1) називається **рівнянням руху** тіла. Використовуючи вираз для імпульсу  $\vec{p} = m\vec{v}$  та враховуючи, що в механіці Ньютона маса є величиною сталою, співвідношення (1) можна подати у вигляді

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i, \quad (2)$$

де  $\vec{a} = \dot{\vec{v}}$ . Таким чином, другий закон Ньютона можна сформулювати так: добуток маси тіла на його прискорення дорівнює силі, що діє на тіло. Другий закон Ньютона також є справедливим лише в інерціальних системах відліку.

**Третій закон (або закон взаємодії):** сили, з якими взаємодіють будь-які два тіла, рівні за модулем та протилежні за напрямком

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (3)$$

Ці сили паралельні лінії, яка з'єднує центри мас тіл, що взаємодіють.

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Машина Атвуда.
2. Чотири вантажі однакової маси ( $m = 66$  г кожний).
3. Плоскі вантажі масами 0,1 г (2 шт.), 1 г (2 шт.), 2 г (1 шт.).
4. Електронний секундомір.

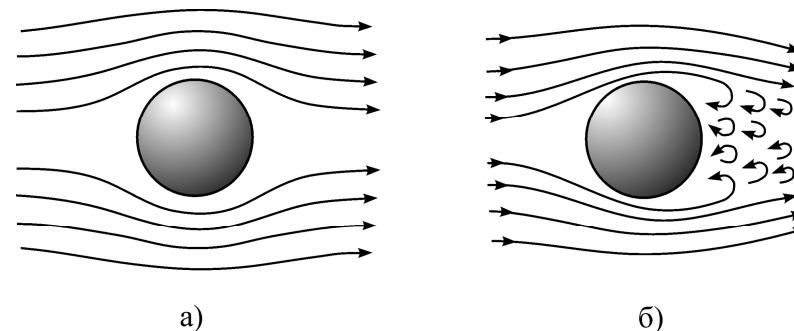


Рисунок 1 – Схематичне зображення ліній течії для ламінарного (а) та турбулентного (б) рухів

**Ламінарна течія** – відносно впорядкований рух рідини, при якому рідину можна умовно поділити на шари таким чином, що останні будуть ковзати один відносно одного без суттєвого перемішування. Тобто рух шарів буде однотипним (див. рис. 1а). Важливим критерієм ламінарної течії є її **стаціонарність**. На противагу цьому **турбулентна течія** характеризується інтенсивним перемішуванням рідини та **нестационарністю** (див. рис. 1б). У подальшому будемо розглядати лише ламінарну течію.

#### 2.2. Механізм виникнення в'язкого тертя

Для пояснення закономірностей в'язкого тертя розглянемо такий дослід. У рідині знаходяться дві паралельні горизонтальні пластини, лінійні розміри яких значно перевищують відстань  $d$  між ними. Нижня пластина закріплена до нерухої вертикальної поверхні за допомогою пружини, а верхня рухається зі швидкістю  $v_0$  (див. рис. 2а). За рахунок сил міжмолекулярного притягання молекули рідини у безпосередній близькості від верхньої пластини будуть прилипати до неї та відповідно рухатимуться зі швидкістю  $v_0$ . Однак за рахунок теплових флуктуацій молекули рідини можуть відриватися від поверхні пластин, при цьому горизонтальна складова їх швидкостей певний час залишатиметься такою, що дорівнює швидкості пластини. Під час взаємодії з іншими молекулами рідини молекула, яка відірвалася від пластини, віддає горизонтальну складову імпульсу. У сукупності такий механізм призводить до передачі частини імпульсу

## 6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

### На оцінку “задовільно”

1. Дати визначення абсолютній та відносній похибкам.
2. Що являє собою експоненціальна форма запису числа?
3. Які цифри називаються значущими?
4. Чим прямі вимірювання відрізняються від непрямих?
5. Викласти порядок виконання лабораторної роботи.

### На оцінку “добре”

6. Що називається систематичними похибками та які причини їх виникнення?
7. Що називають випадковими похибками та які причини їх виникнення?
8. Що називається класом точності приладу та як за його допомогою знаходити інструментальну похибку?
9. Чому точне значення вимірюваної величини відрізняється від середньоарифметичного і як мінімізувати цю відмінність?
10. Пояснити будову штангенциркуля та методику вимірювань за його допомогою.

### На оцінку “відмінно”

11. Пояснити принцип роботи ноніуса.
12. Пояснити будову мікрометра та методику вимірювань за його допомогою.
13. Пояснити правило «трьох сигм».
14. Вивести формулу (22) для визначення абсолютної похибки непрямого вимірювання густини циліндра.
15. Вивести формулу (23) для визначення абсолютної похибки непрямого вимірювання густини паралелепіпеда.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Загальна фізика. Лабораторний практикум / за ред. І.Т. Горбачук. – К.: Вища школа, 1992.
2. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. – М.: Высш. шк., 1970.

$$\vec{F}_{mp} = -\vec{F}'_{mp}. \quad (1)$$

Таким чином, дві пластини взаємодіють із силами  $\vec{F}'_{mp}$  та  $\vec{F}_{mp}$  через шар рідини між ними. Неважко переконатися у тому, що з силами  $\vec{F}'_{mp}$  та  $\vec{F}_{mp}$  будуть взаємодіяти будь-які два шари рідини.

Знайдемо вигляд модуля сили  $\vec{F}_{mp}$ . **1)** Його значення має бути пропорційним площі пластин, оскільки площа пропорційна кількості молекул, які беруть участь у перенесенні імпульсу. **2)**  $F_{mp}$  має бути також пропорційною величині імпульсу  $m_0\Delta v$ , що передається молекулою маси  $m_0$  під час проходження відстані  $\Delta z$ . **3)** Відповідно  $F_{mp}$  буде обернено пропорційною до  $\Delta z$ , оскільки чим меншу відстань проходить молекула за один акт передачі імпульсу, тим інтенсивніше відбувається його передача. Таким чином,

$$F_{mp} = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S, \quad (2)$$

де  $\eta$  ( $[\eta]_{SI} = \text{Па}\cdot\text{с}$ ) – так званий **коєфіцієнт в'язкості**, який залежить від виду рідини та є табличною величиною.

### 2.3. Рух тіл у рідині. Сила Стокса

Сили внутрішнього тертя виникають як під час руху рідини стосовно нерухомого твердого тіла, так і під час руху твердих тіл у рідині. При цьому на силу опору руху тіла впливатиме як в'язкість рідини, так і форма тіла та його швидкість. Розглянемо найпростіший випадок, коли тіло, що рухається у рідині, має форму кулі радіусом  $r$ . Силу опору, що діє на тіло, можна подати у такому вигляді:

$$F = \lambda \cdot \eta^A \cdot r^B \cdot v^C, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – певний безрозмірний коєфіцієнт;  $A$ ,  $B$  та  $C$  – числові коєфіцієнти, які можна встановити з аналізу розмірностей:  
 $\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2} = [\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}]^A \cdot [\text{м}]^B \cdot [\text{м}\cdot\text{с}^{-1}]^C = \text{кг}^A \cdot \text{м}^{(B+C-A)} \cdot \text{с}^{(-A-C)}$ ,  
звідки маємо



валами. Зважаючи на зростання точності вимірювальних приладів, така послідовність забезпечить уточнюючий характер вимірювань, а довірчі інтервали повинні бути «вкладеними» один у одного.

Розрахунки похибок «уручну» в даній лабораторній роботі є достатньо трудомістким процесом, а у разі одержання неправильних значень часто досить важко віднайти помилку. Тому для одержання середніх значень та похибок рекомендується користуватися табличним процесором MS Excel. Особливості зазначеного програмного продукту дозволяють в уніфікований спосіб обробляти та аналізувати одержані результати. При цьому достовірність їх обробки істотно вища, ніж «уручну».

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи.
2. Одержіть від викладача досліджуване тіло та вимірювальний інструмент.
3. Підготуйте три таблиці за шаблоном таблиці 1 для запису результатів вимірювань. Залежно від форми тіла перший рядок таблиці повинен містити змінні  $D$ ,  $h$  або  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .
4. Зрівноважте терези.
5. Зважте досліджуване тіло спочатку на лівій, а потім на правій шальках терезів. Результати запишіть в усі три підготовані таблиці.
6. Виміряти за допомогою лінійки кожен з лінійних розмірів досліджуваного тіла не менше ніж п'ять разів для кожного. При цьому для підвищення достовірності слід намагатися проводити виміри одного й того самого параметра у різних місцях.
7. Результати вимірювання і величину інструментальної похибки лінійки 0,5 мм запишіть у першу таблицю.
8. Проведіть аналогічні вимірювання лінійних розмірів досліджуваного тіла за допомогою штангенциркуля та мікрометра. Результати запишіть у наступні дві таблиці, аналогічні таблиці 1. Інструментальна похибка штангенциркуля і мікрометра зазначені на корпусах приладів.

Далі згідно з рівністю (6) сила опору рідини зростатиме лінійно зі швидкістю, а прискорення зменшуватиметься. Нарешті, настане момент, коли сила Стокса разом із силою Архімеда скомпенсують силу тяжіння, прискорення стане таким, що дорівнює нулю, і кулька продовжить рухатися зі сталою швидкістю, яку встигла набути на цей момент. З урахуванням виразу (6) та очевидних рівностей

$$m = \frac{4}{3} \cdot \pi r^3 \rho,$$

$$F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi r^3 \rho_0 g,$$

де  $\rho$  – густина речовини кульки і  $\rho_0$  – густина рідини, з рівняння (7) у випадку  $a = 0$  можна виразити коефіцієнт в'язкості

$$\eta = \frac{2gr^2}{9v}(\rho - \rho_0). \quad (8)$$

Швидкість кульки може бути визначена експериментально

$$v = l/t, \quad (9)$$

де  $l$  – відстань, яку проходить кулька за час  $t$ . Величини  $l$  та  $t$  визначаються безпосередньо з експерименту. З урахуванням рівності (9) коефіцієнт в'язкості (8) набуває вигляду

$$\eta = \frac{2gr^2t}{9l}(\rho - \rho_0). \quad (10)$$

Вираз (10) справедливий у випадку, коли кулька падає у необмеженому середовищі. В лабораторній роботі рідина, в'язкість якої вивчається, знаходиться у циліндричній посудині діаметром основи  $D$ , тому імпульс від кульки буде передаватися боковим стінкам посудини. У цьому випадку коефіцієнт в'язкості слід визначати згідно з рівністю

$$\eta = \frac{gd^2t}{18l} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{1 + 2,4 \cdot d/D}. \quad (11)$$

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Металеве тіло правильної геометричної форми.
2. Сталева лінійка.
3. Штангенциркуль.
4. Мікрометр.
5. Терези.
6. Набір важків.

### 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

**Густиною** тіла називається маса одиниці об'єму. У випадку, коли тіло однорідне, густина  $\rho$  буде визначатися відношенням маси  $m$  тіла до його об'єму  $V$

$$\rho = m/V. \quad (16)$$

Для тіл правильної геометричної форми об'єм визначається доступними для вимірювання лінійними розмірами тіла. Наприклад, для циліндра та паралелепіпеда об'єми будуть складати

$$V_C = 0,25 \cdot \pi D^2 h, \quad (17)$$

$$V_P = abc \quad (18)$$

відповідно. Тут  $D$  – діаметр циліндра;  $h$  – його висота;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – довжина, ширина та висота паралелепіпеда відповідно. Тоді визначене експериментально значення густини циліндричного тіла становить

$$\langle \rho_C \rangle = \frac{4 \langle m_C \rangle}{\pi \langle D \rangle^2 \langle h \rangle}, \quad (19)$$

де  $\langle m_C \rangle$ ,  $\langle D \rangle$ ,  $\langle h \rangle$  – середні за серією вимірювань значення маси, діаметра та висоти. У свою чергу, визначене експериментально значення густини паралелепіпеда

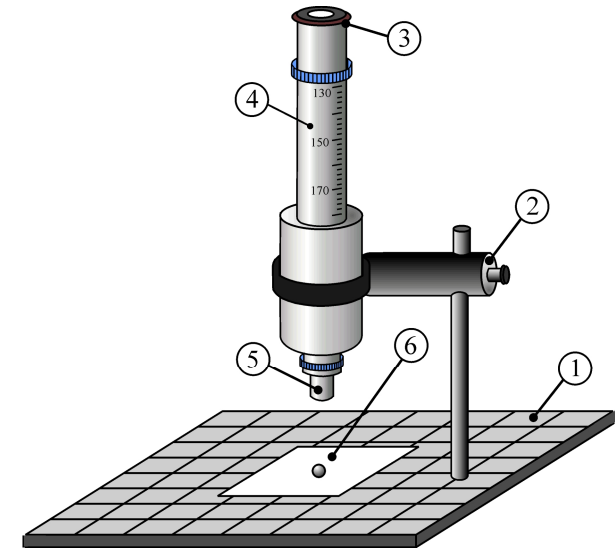


Рисунок 3 – Схематичне зображення мікроскопа: 1 – станина штатива; 2 – штатив; 3 – окуляр мікроскопа; 4 – проградуйований тубус; 5 – об'єктив; 6 – підставка з досліджуваним об'єктом

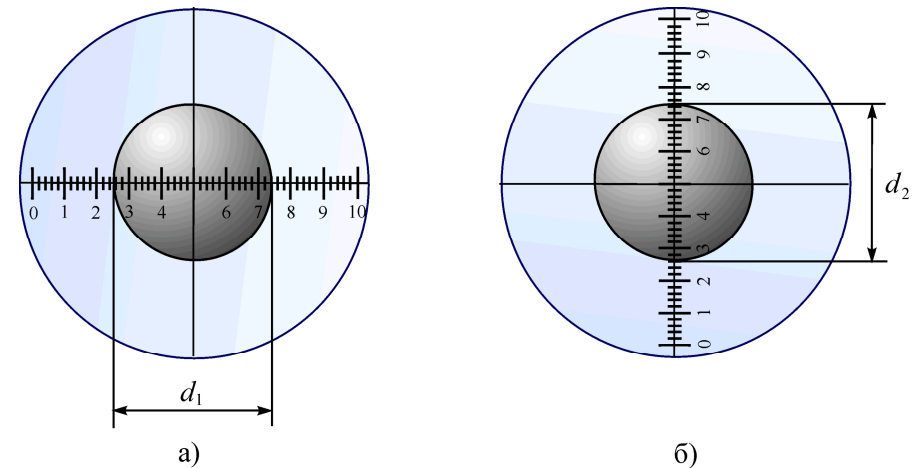


Рисунок 4 – Схематичне зображення виду в окулярі для горизонтального (а) та вертикального (б) положень шкали

ся всередині спеціальної гільзи з внутрішнім різьбленням 4. Крок гвинта становить 0,5-1,0 мм. На зовнішній поверхні гільзи нанесені дві поздовжні шкали – верхня і нижня, які зміщені одна відносно одної на 0,5 мм. Зовні гільза охоплюється барабаном 5, який обертається разом із мікрометричним гвинтом. Поздовжнє переміщення гвинта пропорційне куту повороту барабана. Таким чином, за умови відповідного градування, рівномірно нанесені на барабан поділки 6 будуть показувати відстань зовнішньої частини гвинта 3 від опорної п'яти 2, а отже, розміри тіла, яке знаходиться між ними. При цьому для запобігання деформаціям досліджуваного зразка, а також виходу з ладу мікрометричного гвинта, на правому кінці барабана є спеціальний фрикційний пристрій – тріскачка 7. Вона запобігає надмірному тиску гвинта на вимірюване тіло.

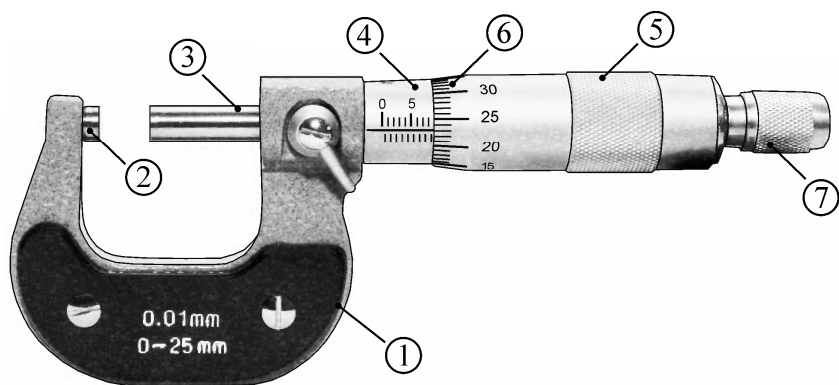


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд та будова мікрометра: 1 – сталева скоба; 2 – опорна п'ята; 3 – мікрометричний гвинт; 4 – гільза з внутрішнім різьбленням; 5 – барабан; 6 – додаткова шкала; 7 – ручка тріскачки

Розміри вимірюваного тіла визначаються у такий спосіб. Спочатку за основною шкалою визначається ціле число міліметрів. Якщо перша від шкали барабана позначка непроградуваної частини основної вимірювальної шкали знаходиться ближче, ніж аналогічна позначка проградуваної її частини, то до результатів потрібно додати 0,5 мм. Потім за додатковою шкалою

**Увага!** Кожна кулька може бути використаною лише один раз, оскільки залишається на дні посудини. Тому перед вимірюванням часу падіння власне кульок потрібно потренуватися на невеликих металевих частинках неправильної форми.

Таблиця 2 – Результати вимірювань

№ досліду	Діаметр $d$ , поділки		Діаметр $d$ , мм	Час падіння $t$ , с	$\eta_i$ , Па·с	$\Delta\eta_i$ , Па·с	$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta$
1	$d_1$						
	$d_2$						
	$\langle d \rangle$						
...	...	...	...	...	...	...	...
5	$d_1$						
	$d_2$						
	$\langle d \rangle$						
Середнє	-		-	-	-	-	-
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> =					$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup> =		
$l$ , м =			$D$ , мм =		$T$ , К =		

8. Переведіть значення діаметра в поділках у значення в міліметрах та заповніть відповідний стовпчик таблиці 2. Якщо висота тубуса не збігається з жодним значенням, поданим у таблиці, скористайтесь лінійною апроксимацією

$$d = \langle d \rangle \left( Y_1 + (X - X_1) \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \right), \quad (12)$$

де  $X$  – висота тубуса;  $X_1$  – найближче до  $X$  менше значення з таблиці 1;  $X_2$  – найближче до  $X$  більше значення з таблиці 1;  $Y_1$  – ціна поділки, що відповідає висоті  $X_1$ ;  $Y_2$  – ціна поділки, що відповідає висоті  $X_2$ .

9. За допомогою виразу (11) визначте коефіцієнт в'язкості  $\eta$  рідини для вимірювань по кожній кульці. Результат занесіть до таблиці 2.

Одним з приладів, який має додаткову шкалу, є *штангенциркуль*. Його точність залежно від конструкції знаходиться у межах від 0,02 до 0,1 мм. Існує багато конструкцій штангенциркуля, які відрізняються в деталях. На рисунку 1 показана одна з типових реалізацій даного приладу. Він складається із сталльної лінійки – штанги 1 з міліметровими 6 та дюймовими 7 поділками, відносно якої переміщається рамка 2. За допомогою губок 3, 4, а також щупа 5 штангенциркуль здатний вимірювати розміри у всіх значущих з практичної точки зору ситуаціях і тому є достатньо універсальним.

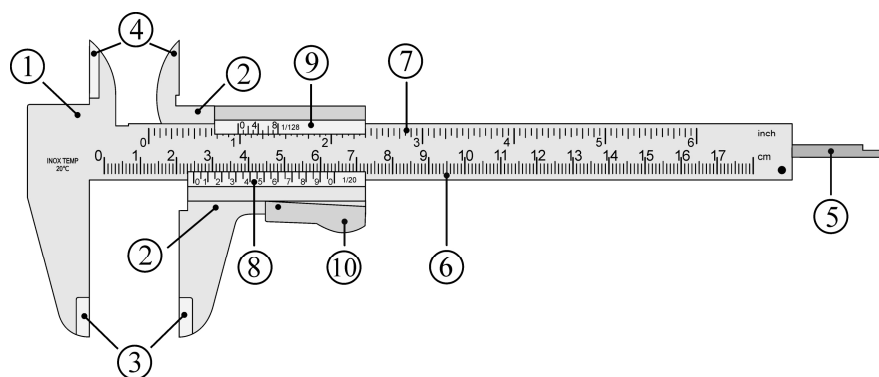


Рисунок 1 – Будова штангенциркуля: 1 – штанга; 2 – рухома рамка; 3 – зовнішні губки для вимірювання зовнішніх розмірів; 4 – внутрішні губки для вимірювання внутрішніх розмірів; 5 – щуп для вимірювання глибини; 6 – основна шкала, см; 7 – основна шкала, дюймів; 8 – ноніус для визначення десятих частин міліметра; 9 – ноніус для визначення частин дюйма; 10 – фіксатор рухомої частини приладу для полегшення процедури вимірювання

Додаткова шкала 8 штангенциркуля називається *ноніусом*. Принцип дії ноніуса ґрунтується на тому, що людське око здатне достатньо точно фіксувати збіг або незбіг двох тонких поздовжніх позначок – штрихів. Тоді точність вимірювання обмежується товщиною штриха. У поданому на рисунку 1 прикладі довжина шкали ноніуса становить 39 мм. Вона поділена на 20 однакових частин по 1,95 мм (див. рисунок 2а). Це забезпечує точність вимірювання штангенциркуля даної конструкції до 0,05 мм.

10. Детально пояснити принцип вимірювання діаметра кульки за допомогою мікроскопа.

### На оцінку “відмінно”

11. Пояснити механізм виникнення в’язкого тертя.
12. Як повинен змінюватися коефіцієнт в’язкості зі зростанням температури? Відповідь аргументувати.
13. Одержати залежність швидкості руху кульки у рідині від часу.
14. Одержати вираз для сили в’язкого тертя, що діє на пластину, яка рухається у напрямку, що лежить у її площині.
15. Одержати вираз для визначення коефіцієнта в’язкості у неограниченій середовищі (11).

### СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 1. Класична механіка і теорія відносності. Молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка. Механічні коливання та хвилі. Звук. – Суми, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика та магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S_a = \sigma_a, \quad (8)$$

де  $\sigma_a$  називається **стандартним відхиленням**. Тому вибір похибки згідно з виразом (7) називається **правилом «трьох сигм»**.

Під час визначення похибки прямих вимірювань потрібно враховувати як систематичну, так і випадкову складові. Тому абсолютну похибку прямих вимірювань прийнято визначати одним з двох таких способів

$$\Delta a = \sqrt{(\Delta_1 a)^2 + (\Delta_2 a)^2}, \quad (9)$$

$$\Delta a \approx \Delta_1 a + \Delta_2 a, \quad (10)$$

де  $\Delta_1 a$  – систематична складова абсолютної похибки, яка у подальшому визначається за допомогою виразу (5);  $\Delta_2 a$  – випадкова складова абсолютної похибки, що, як правило, визначається відповідно до виразу (7).

У переважній більшості випадків виміряти необхідну величину безпосередньо не є можливим, однак її можна обчислити за певною сукупністю результатів прямих вимірювань. Експериментальне визначення величини  $F$ , під час якого прямому вимірюванню підлягають величини  $a_1, a_2, \dots, a_K$ , а сама невідома величина знаходиться за допомогою функціональної залежності  $F = F(a_1, a_2, \dots, a_K)$ , називається **непрямим вимірюванням**. При цьому статистичній обробці, зазначеній вище, підлягають саме результати прямих вимірювань  $a_1, a_2, \dots, a_K$ , а результат непрямих вимірювань шукається у вигляді

$$\langle F \rangle = F(\langle a_1 \rangle, \langle a_2 \rangle, \dots, \langle a_K \rangle). \quad (11)$$

Абсолютна похибка непрямих вимірювань визначається як

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial a_1} \Delta a_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial a_2} \Delta a_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial a_K} \Delta a_K\right)^2}. \quad (12)$$

У ряді практично важливих випадків, коли функція  $F = F(a_1, a_2, \dots, a_K)$  має вигляд

Відповідний теоретичний розрахунок показує, що така модель описується рівнянням

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_k \rangle, \quad (1)$$

де  $p$  – тиск газу на стінки посудини;  $n$  – концентрація молекул газу;  $m_0$  – маса однієї молекули;  $v$  – швидкість руху молекули,  $\varepsilon_k$  – кінетична енергія її поступального руху, а кутові дужки означають усереднення за усіма молекулами у газі.

З іншої сторони, експериментально встановлено, що тиск газу, температура  $T$  та об'єм  $V$  задовольняють рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (2)$$

де  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;  $m$  – маса газу;  $M$  – молярна маса газу. Прирівняємо вирази (1) та (2) відносно тиску  $p$ . З урахуванням того, що  $R = N_A k_B$  ( $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – стала Авогадро),  $n = N/V$ ,  $N$  – кількість молекул газу;  $N = N_A \cdot m/M$ , одержимо

$$\langle \varepsilon_k \rangle = \frac{3}{2} k_B T.$$

У припущенні, що всі напрямки швидкості рівно ймовірні, можна вважати що на кожну з трьох Декартових координат у середньому припадає третина усієї кінетичної енергії

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{1}{3} \cdot \langle \varepsilon_k \rangle = \frac{1}{2} k_B T. \quad (3)$$

Вираз (3) ще називають **законом рівнорозподілу**, який вказує на те, що на кожний ступінь вільності припадає в середньому однакова частина кінетичної енергії  $\langle \varepsilon_0 \rangle$ . **Кількістю ступенів вільності** називається кількість незалежних координат, за допомогою яких можна однозначно визначити положення молекули.

Тоді середня енергія однієї молекули визначається як

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} k_B T, \quad (4)$$

Для запису сумнівних цифр та похибок слід користуватися правилами округлення. **1.** Похибка результату вимірювання зазначається двома значущими цифрами, якщо перша з них дорівнює 1 або 2, і одній – якщо перша цифра дорівнює 3 або більше. **2.** Результат вимірювання округлюється до того ж десяткового знака, яким закінчується округлене значення абсолютної похибки. **3.** Якщо наступна після сумнівної цифра є меншою, ніж 5, то сумнівна цифра записується без змін. Якщо наступна після сумнівної цифра є більшою, ніж 5, то до сумнівної цифри додається одиниця. У випадку, коли наступна після сумнівної цифра дорівнює 5, округлення проводиться до найближчої парної цифри. Наприклад  $28,15 \approx 28,2$ , однак і  $28,25 \approx 28,2$ .

Під час безпосереднього або **прямого** вимірювання будь-якої фізичної величини на одержані результати буде впливати велика кількість факторів, що можуть мати як детерміністичний, так і ймовірнісний характер. Відповідно до цього розрізняють два класи помилок: систематичні, випадкові та грубі.

**Систематичними** називаються похибки, які однакові в усіх вимірюваннях, що проводяться в однакових умовах. Такі похибки можна обчислити, вони пов'язані з точністю вимірювальних приладів та особливостями методики експерименту. Систематичні похибки поділяють на три види.

**1)** Похибки, природа яких відома і які можуть бути точно визначені. Їх можна вирахувати, а отже, позбавитися від них введенням відповідних поправок. Прикладом таких похибок є вплив теплового розширення на результат вимірювання довжини.

**2)** Похибки, природа яких відома, однак при цьому від них не можна позбутися. Такі похибки можуть бути зумовлені недосконалістю методики вимірювань та вимірювальних приладів. У останньому випадку говорять про так звані **інструментальні похибки**. Будь-яка інструментальна похибка визначається **класом точності**  $\gamma$  вимірювального приладу, який залежить від вимог до його виробництва та завжди зазначається на вимірювальному приладі. Величина такої похибки визначається як

$$\Delta a = \pm \frac{\gamma}{100\%} a_H, \quad (5)$$

$$C_M = \frac{M}{m} \frac{\delta Q}{dT}, \quad (8)$$

де  $\delta Q$  – нескінченно мала кількість теплоти, передана тілу, що спричиняє зміну його температури на  $dT$ .

Згідно з першим законом термодинаміки підведена до системи теплота  $\delta Q$  витрачається на зміну внутрішньої енергії  $dU$  та виконання роботи  $\delta A$  над зовнішніми тілами ( $dU + \delta A = \delta Q$ ). При цьому зміна температури відповідно до співвідношення (6) пов'язана лише зі зміною внутрішньої енергії. Тому теплоємність ідеального газу буде залежати від характеру процесу в ньому. У найбільш простих випадках, коли тиск або об'єм газу залишається сталим під час процесу, теплоємність може бути виражена у відносно простий спосіб. Розглянемо зазначені випадки.

Якщо  $V = \text{const}$  (ізохорний процес), робота газу буде дорівнювати нулю, і вся підведена теплота витратиться на його нагрівання ( $\delta Q = dU$ ). Тоді відповідно до співвідношень (6) та (8) теплоємність при сталому об'ємі становить

$$C_V = \frac{i}{2} R. \quad (9)$$

Якщо  $p = \text{const}$  (ізобарний процес), підведена теплота витрачається на його нагрівання та на виконання роботи. Відповідно до рівняння Менделєєва-Клапейрона (2)  $\delta A = pdV = mRdT/M$ . З урахуванням співвідношень (6) та (8) теплоємність при сталому тиску становить

$$C_p = \left( \frac{i}{2} + 1 \right) R. \quad (10)$$

Порівняння виразів (9) та (10) дозволяє записати

$$C_p = C_V + R. \quad (11)$$

Співвідношення (11) ще називають **формулою Масера**.

## Лабораторна робота 1

### ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛ ПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

#### 1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися із принципами проведення вимірювань.
2. На прикладі визначення густини тіл правильної геометричної форми засвоїти основи методики обробки результатів експерименту.

#### 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

##### 2.1. Експеримент та обробка одержаних результатів

**Експеримент** (від лат. *experimentum* – проба, дослід) – метод дослідження деякого явища в керованих умовах. Відрізняється від спостереження активною взаємодією з досліджуваним об'єктом. Експеримент проводиться в рамках наукового дослідження і служить для перевірки гіпотези та встановлення причинних зв'язків між феноменами. Експеримент покладено в основу емпіричного підходу до одержання знань. У фізиці первинна роль відводиться саме експерименту: будь-яка теорія за своєю сутністю є узагальненням експериментальних даних, а будь-яка гіпотеза може набути статусу теорії лише після її експериментальної перевірки.

Проведення будь-якого експерименту має на меті одержання конкретних чисельних даних, інтерпретація яких можлива лише за умови об'єктивної оцінки їх достовірності. Для проведення неупередженої оцінки одержаних експериментальних даних користуються наступними поняттями.

**Абсолютна похибка** вимірювання фізичної величини – це різниця між її точним значенням  $A$  та значенням, одержаним у  $i$ -му вимірюванні

$$\Delta a_i = A - a_i. \quad (1)$$

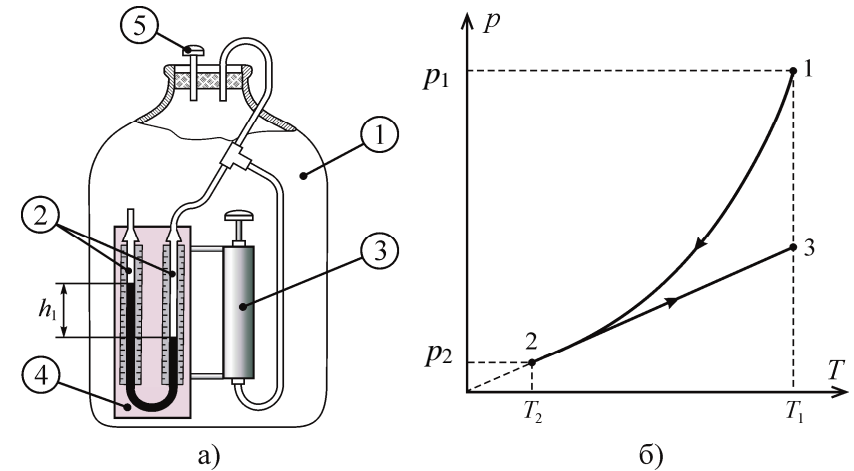


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки (а);  $pT$ -діаграма процесів, що в ній відбуваються (б)

ність зазначеного методу полягає у наступному. У балон 1 за допомогою насоса 3 закачується з оточуючої атмосфери повітря. Відразу після накачування тиск і температура газу в балоні збільшуються. Але через певний час завдяки теплообміну температура газу в балоні зрівнюється з температурою повітря в лабораторії, тобто  $T_1 = T_0$ . У той самий час тиск повітря у балоні зменшиться лише частково, до величини  $p_1$ , що перевищує атмосферний тиск  $p_0$ . Стан повітря в балоні, що характеризується параметрами  $p_1$  та  $T_1$ , зображений на діаграмі рисунка 1б точкою 1.

Тиск  $p_1$  можемо виміряти експериментально за допомогою манометра

$$p_1 = p_0 + \rho gh_1, \quad (14)$$

де  $\rho$  – густина рідини у манометрі;  $h_1$  – перепад рівнів рідини в манометрі, який знаходимо експериментально (див. рис. 1а);  $g$  – прискорення вільного падіння.

Якщо клапан 5 відкрити на дуже короткий час, тиск у балоні зрівнюється з атмосферним. Процес виходу повітря з балона відбувається досить швидко і його можна вважати адіабатним, оскільки теплообмін при цьому буде незначним. Після адіабатного

## ЗМІСТ

<b>Лабораторна робота 1. ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛ ПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ.....</b>	<b>С. 8</b>
1. МЕТА РОБОТИ .....	8
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	8
2.1 Експеримент та обробка одержаних результатів.....	8
2.2 Інструменти для вимірювання лінійних розмірів тіл.....	13
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	18
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	18
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	20
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ .....	22
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	22
<b>Лабораторна робота 2. ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ.....</b>	<b>23</b>
1. МЕТА РОБОТИ .....	23
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	23
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	24
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	25
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	28
5.1. Перевірка залежності величини прискорення від сили при сталій масі системи .....	28
5.2. Перевірка залежності величини прискорення від маси системи при сталій величині рушійної сили.....	30
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ .....	31
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	32
<b>Лабораторна робота 3. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ У ПОВІТРІ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСУ .....</b>	<b>33</b>
1. МЕТА РОБОТИ .....	33
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	33
2.1. Поняття хвилі .....	33
2.2. Поняття звуку.....	35
2.3. Використання звуку у природі та техніці .....	37
2.4. Стоячі хвилі.....	40
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	42
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	42
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	44
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ .....	46
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	47

$$\left(1 + \frac{\rho g h_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{\rho g h_3}{p_0}\right)^{\gamma}.$$

З урахуванням відомого співвідношення  $(1 + \alpha)^n \approx 1 + n\alpha$ , а також умови, що  $\rho g h_1 \ll 1$  і  $\rho g h_3 \ll 1$ , одержимо

$$1 + (\gamma - 1) \frac{\rho g h_1}{p_0} \approx 1 + \gamma \frac{\rho g h_3}{p_0} \Rightarrow \gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_3}. \quad (19)$$

Вираз (19) є розрахунковою формулою лабораторної роботи. Вимірюючи  $h_1$  та  $h_3$ , за її допомогою можна визначити шукане відношення теплоємностей (12).

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Відкрийте клапан і визначте початкове значення рівня рідини в одному з колін манометра. Відлік ведіть по нижній частині меніска рідини.
3. Закрийте клапан (у ненатиснутому стані клапан закритий), накачайте в балон повітря з таким розрахунком, щоб різниця рівнів у колінах манометра була не більше 150 мм.
4. Приблизно через одну хвилину після припинення накачування (рівні рідини в манометрі перестануть змінюватися) визначте різницю рівнів  $h_1$ . Виміри висоти рівня рідини в одному коліні відносно іншого можна виконувати у такий спосіб: спочатку знаходять висоту поточного рівня рідини відносно початкового рівня, а потім отриману величину множать на 2. Результат запишіть у таблицю 1.
5. Зрівняйте тиск у балоні з атмосферним. Для цього відкрийте клапан 5 (натисніть на нього), а потім швидко, коли тиск у балоні стане атмосферним, закрийте його (відпустіть клапан).



ББК 52.818.1я7  
УДК 53(076.5)  
Л 96

Рецензенти:

д-р. фіз.-мат. наук, проф. І. Ю. Проценко  
(Сумський державний університет);  
канд. фіз.-мат. наук, доцент О. В. Лисенко  
(Сумський державний університет)

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Сумського державного університету  
(протокол № 7 від 09.02.2012 )*

Л 96 **Лютий Т. В.**, Лабораторний практикум з фізики: навч.  
посіб. / Т. В. Лютий, О. С. Денисова. – Суми: Сумський  
державний університет, 2012. – 70 с.

Посібник містить опис лабораторних робіт з курсу загальної фізики для напряму підготовки 6.040106 – **екологія, охорона навколишнього середовища та збалансованого природокористування**, факультет технічних систем та енергоефективних технологій. Кожна робота супроводжується ґрунтовним викладенням теоретичного матеріалу, необхідного для вмотивованого виконання вимірювань та розрахунків. Детальні та проілюстровані пояснення процесу виконання робіт дозволяють підвищити ступінь самостійності студента на лабораторних заняттях, що значно підвищує ефективність бригадного методу виконання робіт.

**ББК 52.818.1я7**  
**УДК 53(076.5)**

© Лютий Т. В., Денисова О. С., 2012  
© Сумський державний університет, 2012

12. Знайдіть загальну величину абсолютної похибки вимірювання

$$\Delta\gamma = \sqrt{(\Delta_1\gamma)^2 + (\Delta_2\gamma)^2},$$

де як систематичну складову абсолютної похибки  $\Delta_1\gamma$  слід брати максимальне значення з усіх  $\Delta_1\gamma_i$ , обчислених у відповідності до виразу (20).

13. Запишіть отриманий експериментальний результат у вигляді  $\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma$ , порівняйте його із теоретичним значенням показника адіабати, у відповідності до класичної теорії теплоємності газів (вважати, що повітря складається лише з двоатомних азоту та кисню, а зв'язок між атомами – жорсткий).
14. Зробити висновки до лабораторної роботи.

## 6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

### На оцінку “задовільно”

1. Перелічити основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини.
2. Який процес називають адіабатним?
3. Що називають показником адіабати? Як він визначається?
4. Що таке ідеальний газ?
5. Послідовність виконання лабораторної роботи.

### На оцінку “добре”

6. Що називають ступенями вільності та як визначається їх кількість?
7. У який спосіб визначається внутрішня енергія ідеального газу? Довести.
8. Показати зв'язок між рівнянням Менделєєва-Клапейрона (2) та основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії газів (1).
9. Накреслити діаграму рисунка 1б у координатах  $p$ - $V$ .
10. Чому після накачування тиск газу в балоні дещо зменшується?

### На оцінку “відмінно”

Навчальне видання

Лютий Тарас Володимирович,  
Денисова Олена Станіславівна

## Лабораторний практикум з фізики

Навчальний посібник

Укладач	Т. В. Лютий
Дизайн обкладинки	Т. В. Лютого
Редактор	Н. В. Лисогуб
Комп'ютерний набір та верстання	Т. В. Лютого

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк.    Обл.-вид. арк.    Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Р.-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.