



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Т. В. Лютий, О. С. Денисова**



# ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ з ФІЗИКИ

для напрямку підготовки 6.040106 -  
екологія, охорона навколишнього  
середовища та збалансованого  
природокористування

**ЧАСТИНА 1**



**Навчальний посібник**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Т. В. Лютий, О. С. Денисова**

## **Лабораторний практикум із фізики**

*Рекомендовано вченою радою  
Сумського державного університету  
як навчальний посібник*

Суми  
Сумський державний університет  
2012

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

## Графік виконання лабораторних робіт

### I модульний цикл

Номер бригади	Тиждень 1	Тиждень 2	Тиждень 3	Тиждень 4	Тиждень 5	Заліковий тиждень
I	1	2	3	<i>ІЗ</i>	4	<i>ІЗ</i>
II	1	2	3	<i>ІЗ</i>	4	<i>ІЗ</i>
III	1	4	2	5	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>
IV	1	4	2	5	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>
V	1	3	4	<i>ІЗ</i>	5	<i>ІЗ</i>
VI	1	3	4	<i>ІЗ</i>	5	<i>ІЗ</i>
VII	1	2	5	3	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>
VIII	1	2	5	3	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>

*ІЗ* – індивідуальний захист виконаних лабораторних робіт

## 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

<b>Лабораторна робота 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ В РІДИНАХ.....</b>	<b>48</b>
1. МЕТА РОБОТИ.....	48
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	48
2.1. Загальні відомості про рідини .....	48
2.2. Механізм виникнення в'язкого тертя .....	49
2.3. Рух тіл у рідині. Сила Стокса .....	51
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ .....	52
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	52
4.1. Метод Стокса для визначення коефіцієнта в'язкості.....	52
4.2. Визначення розмірів кульок за допомогою мікроскопа .....	54
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	56
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	58
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	59
<b>Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ МЕТОДОМ АДАБАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ.....</b>	<b>60</b>
1. МЕТА РОБОТИ.....	60
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	60
2.1. Ідеальний газ.....	60
2.2. Адіабатний процес.....	64
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ .....	64
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	64
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	67
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	69
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	70

## 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

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



Оскільки точне значення є невідомою величиною, на практиці замість нього користуються **середньоарифметичним значенням** величини з серії повторних  $N$  вимірювань

$$A \approx \langle a \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i. \quad (2)$$

**Відносна похибка** вимірюваної фізичної величини – це відношення абсолютної похибки  $i$ -го вимірювання до точного (або середньоарифметичного) значення цієї величини, помножене на 100 %

$$\delta a_i = \frac{\Delta a_i}{\langle a \rangle} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Наявність похибки обумовлює відповідний формат для запису знайденої у вимірюваннях величини. Основою зазначеного формату є експоненціальне подання чисел

$$n = M \cdot 10^p, \quad (4)$$

де  $n$  – число, яке потрібно записати;  $M$  – так звана **мантиса** числа  $n$ ;  $p$  – ціле число, яке називається порядком величини  $n$ . Зазначене подання чисел є зручним для запису дуже великих і дуже малих чисел, а також для уніфікації запису. Особливо це простежується у випадку **нормалізованого** запису, де порядок  $p$  вибирається таким, щоб для мантиси виконувалась умова  $1 \leq M < 10$ . У цьому випадку усі цифри, що утворюють мантису, називаються **значущими**. Наприклад, замість 0,002406 у нормалізованій формі слід писати  $2,406 \cdot 10^{-3}$ , де мантисою є «2,406», а порядок дорівнює «- 3».

Усі цифри мантиси, розряд яких менший від старшого розряду абсолютної похибки (у форматі запису  $a = \langle a \rangle \pm \Delta a$ ), не несуть у собі достовірної інформації і тому не записуються. Цифра, розряд якої збігається зі старшим розрядом абсолютної похибки, називається **сумнівною**. Наприклад, у запису  $a = 3,456 \pm 0,03$  цифра «5» є сумнівною, а наявність цифри «6» взагалі безпідставна.

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  $28,25 \approx 28,2$ .

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

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

де  $a_H$  – верхня межа вимірювання приладу.

**3)** Похибки, що є наслідком неправильного уявлення про об'єкт дослідження або виходу з ладу вимірювального пристрою. Природа, як і можлива наявність, таких похибок не відома.

**Випадковими** називаються похибки, поява яких пов'язана з факторами ймовірнісного характеру, такими, як взаємодія об'єкта дослідження та вимірювальних приладів з флюктуючим середовищем. Також даний клас похибок може бути зумовленим суб'єктивними факторами, такими, як ступінь професіоналізму, уважності та зосередженості оператора вимірювальної установки.

**Грубі** помилки (або **грубі промахи**) – це результати, які істотно відрізняються з-поміж серії результатів, одержаних за аналогічних умов. Як правило, такий результат відкидається, а процедура вимірювання здійснюється повторно.

Оцінити випадкову похибку можна лише в рамках методів математичної статистики. Введемо ряд необхідних для подальшого розгляду понять.

**Середньоквадратичним відхиленням окремого вимірювання** називається величина

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_i - \langle a \rangle)^2}. \quad (6)$$

Визначена у такий спосіб характеристика показує, на скільки (в середньому) результати довільно взятого вимірювання відрізняються від середньоарифметичного значення. Тобто чим меншим є  $S_a$ , тим результати вимірювання знаходяться ближче до свого середньоарифметичного значення.

У математичній статистиці доводиться, що ймовірність потрапляння точної величини  $A$  в інтервал  $[\langle a \rangle - 3S_a; \langle a \rangle + 3S_a]$  за умови  $N \rightarrow \infty$  становить 0,997. Оскільки названа ймовірність практично дорівнює 1, зазначений інтервал називають **довірчим**, а випадкова похибка визначається як

$$\Delta a = 3S_a. \quad (7)$$

У той самий час

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

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

$$F = C \cdot a_1^{b_1} \cdot a_2^{b_2} \cdot \dots \cdot a_K^{b_K}, \quad (13)$$

оцінити абсолютну похибку можна таким способом. Злогарифмуємо вираз (13), а потім продиференціюємо одержаний вираз

$$\begin{aligned} \ln F &= \ln C + b_1 \ln a_1 + b_2 \ln a_2 + \dots + b_K \ln a_K, \\ \frac{dF}{F} &= b_1 \frac{da_1}{a_1} + b_2 \frac{da_2}{a_2} + \dots + b_K \frac{da_K}{a_K}. \end{aligned} \quad (14)$$

Показники степені  $b_1, b_2, \dots, b_K$  можуть бути як додатними, так і від'ємними, однак похибка має властивість накопичуватися. Тому у подальшому кожен доданок у (14) потрібно брати за модулем. Тоді

$$\Delta F = \langle F \rangle \left( |b_1| \frac{\Delta a_1}{\langle a_1 \rangle} + |b_2| \frac{\Delta a_2}{\langle a_2 \rangle} + \dots + |b_K| \frac{\Delta a_K}{\langle a_K \rangle} \right). \quad (15)$$

У даній лабораторній роботі непрямому вимірюванню підлягає густина тіла. При цьому за допомогою прямих вимірювань визначається маса тіла та його розміри. Вимірювання розмірів тіл є одним з найпоширеніших та найпростіших вимірювань у техніці, тому доцільно розглянути методи та інструменти визначення розмірів тіл більш детально.

## 2.2. Інструменти для вимірювання лінійних розмірів тіл

У найпростішому випадку вимірювання розмірів здійснюється приладами без стабілізуючої основи: масштабними лінійками, металевими вимірювальними лінійками, рулетками та ін. Як правило, ціна поділки цих приладів є не меншою 1 мм, а, отже, інструментальна похибка становить не менше ніж 0,5 мм. Методика застосування лінійки для визначення розмірів є очевидною, тому не будемо на ній зупинятися.

Підвищення точності вимірювань можна забезпечити використанням додаткових шкал, призначених для уточнення результату в межах ціни поділки основної шкали.

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 сталюї лінійки – штанги 1 з міліметровими 6 та дюймовими 7 поділками, відносно якої переміщається рамка 2. За допомогою губок 3, 4, а також щупа 5 штангенциркуля здатний вимірювати розміри у всіх значущих з практичної точки зору ситуаціях і тому є достатньо універсальним.

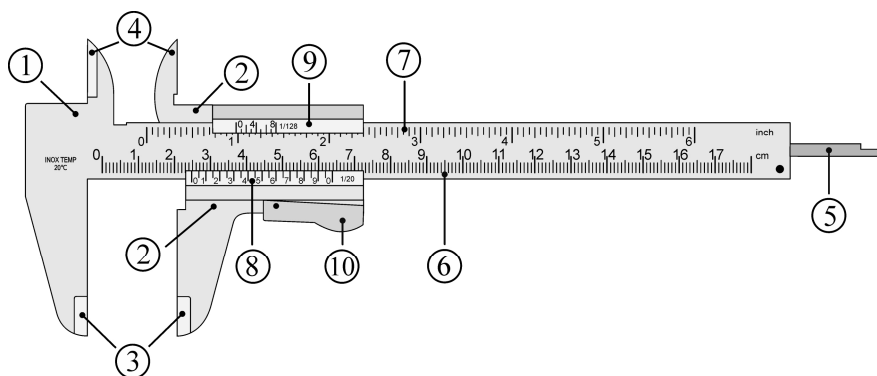


Рисунок 1 – Будова штангенциркуля: 1 – штанга; 2 – рухома рамка; 3 – зовнішні губки для вимірювання зовнішніх розмірів; 4 – внутрішні губки для вимірювання внутрішніх розмірів; 5 – щуп для вимірювання глибини; 6 – основна шкала, см; 7 – основна шкала, дюймів; 8 – ноніус для визначення десятих частин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

Якщо нульова позначка ноніуса збігається з однією з поділок основної шкали, то наступні вісімнадцять позначок ноніуса не будуть точно збігатися з позначками основної шкали. При цьому остання, двадцята, позначка знову буде збігатися з однією з позначок основної шкали (див. рис. 2а). Коли нульова позначка шкали ноніуса знаходиться між позначками основної шкали штангенциркуля (див. рис. 2б), збігатися з позначкою основної шкали буде  $j$ -та позначка ноніуса. Тоді для визначення розміру вимірюваного тіла потрібно до цілої кількості поділок основної шкали, що залишилися поза нульовою позначкою ноніуса, додати величину  $0,05 \cdot j$ , яка виражає двадцяті частини міліметра. У прикладі, зображеному на рисунку 2б, покази становлять 24,75 мм.

Для штангенциркулів, точність яких є більшою, або меншою від точності приладу, розглянутого у прикладі, принцип діє ноніуса залишається, лише зміняться чисельні коефіцієнти.

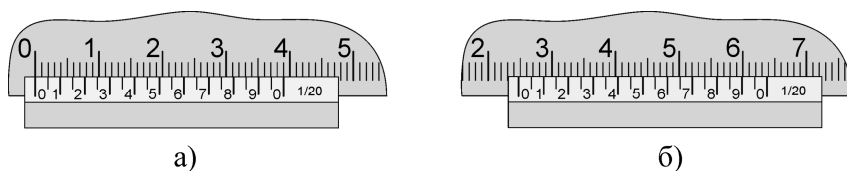


Рисунок 2 – Шкала ноніуса у нульовому (а) та ненульовому (б) положеннях

Як було зазначено, точність ноніуса визначається товщиною штрихів, яку не можна необмежено зменшувати з огляду на укладення візуального зчитування результатів вимірювання. Позбутися зазначеного недоліку та збільшити точність можна у випадку, якщо додаткова шкала буде рухатися не вздовж основної, а обертатися навколо неї по спіралі. Даний принцип реалізований у приладі, який називається *мікрометром*. Точність цього інструмента знаходиться у межах від 10 мкм до 1 мкм.

Основу приладу становить сталевий скоба 1 (див. рисунок 3), на одному з кінців якої знаходиться нерухома опорна п'ята 2, поверхня якої відполірована. З іншої сторони скоби знаходиться зовнішня частина мікрометричного гвинта 3, який переміщуєть-

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 градуювання, рівномірно нанесені на барабан поділкі 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.

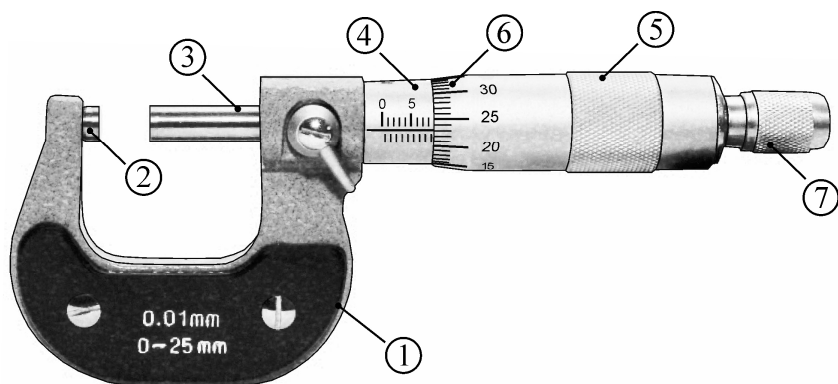


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд та будова мікрометра: 1 – сталева скоба; 2 – опорна п'ята; 3 – мікрометричний гвинт; 4 – гільза з внутрішнім різьбленням; 5 – барабан; 6 – додаткова шкала; 7 – ручка тріскачки

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



6 визначаються частини міліметра, які завершують формування результату вимірювання. Наприклад, на рисунку 4а покази приладу становлять 8,74 мм, у той час коли на рисунку 4а – 9,24 мм.

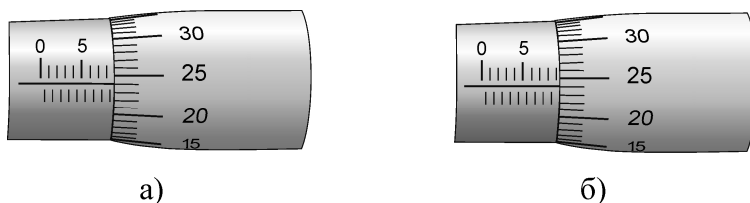


Рисунок 4 – Щодо зчитування результатів вимірювання зі шкали мікрометра

Сучасні моделі мікрометрів обладнані цифровим дисплеєм (див. рисунок 5), на якому автоматично відображаються результати вимірювань. Така конструкція дозволяє не лише збільшити точність вимірювання, але й робить процедуру вимірювання більш зручною.



Рисунок 5 – Зовнішній вигляд мікрометра з цифровим дисплеєм

Точність вимірювання, вищу за  $10^{-6}$  м, забезпечити у рамках контактних методів вимірювання дуже важко з огляду на деформацію вимірюваного об'єкта. Тому більш точні вимірювання реалізуються за допомогою безконтактних методик з використанням спеціальних вимірювальних мікроскопів або лазерної вимірювальної техніки.

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Металеve 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

$$\langle \rho_P \rangle = \frac{\langle m_P \rangle}{\langle a \rangle \langle b \rangle \langle c \rangle}, \quad (20)$$

де  $\langle m_P \rangle$ ,  $\langle a \rangle$ ,  $\langle b \rangle$ ,  $\langle c \rangle$  – середні за серією вимірювань значення маси, довжини, ширини та висоти паралелепіпеда.

Для визначення маси використовуються важільні терези. З метою підвищення точності, зважуване тіло спочатку кладуть на одну шальку терезів, а на другу кладуть важки заданої маси до зрівноваження; потім важки та зважуване тіло міняють місцями. Тоді результат вимірювання маси подається у вигляді

$$\langle m \rangle = 0,5 \cdot (m_1 + m_2), \quad (21)$$

де  $m_1$  та  $m_2$  – результати зважування тіла відповідно на правій та лівій шальках терезів. Як похибку  $\Delta m$  визначення маси на рівноплечих терезах слід брати масу найменшого важка.

Похибка непрямого вимірювання густини у відповідності до виразу (12) для циліндра визначається як

$$\Delta \rho_C = \langle \rho_C \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta m_C}{\langle m_C \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta D}{\langle D \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{\langle h \rangle}\right)^2}, \quad (22)$$

де  $\Delta m_C$ ,  $\Delta D$ ,  $\Delta h$  – абсолютні похибки вимірювань маси, діаметра та висоти відповідно. Для паралелепіпеда похибка становитиме

$$\Delta \rho_P = \langle \rho_P \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta m_P}{\langle m_P \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2}, \quad (23)$$

де  $\Delta m_P$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$  – абсолютні похибки вимірювань маси, довжини, ширини та висоти паралелепіпеда.

Для формування необхідних навичок щодо проведення процедури вимірювань та обробки одержаних даних лінійні розміри тіла правильної форми вимірюються у три різних способи: за допомогою лінійки, штангенциркуля та мікрометра. При цьому будуть одержані три значення густини зі своїми довірчими інтер-

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.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№	$a$ , мм ( $D$ , мм)	$\Delta a$ , мм ( $\Delta D$ , мм)	$b$ , мм ( $h$ , мм)	$\Delta b$ , мм ( $\Delta h$ , мм)	$c$ , мм	$\Delta c$ , мм
1						
2						
3						
4						
5						

$\langle \dots \rangle$		–		–		–
$\Delta$ вип.	–		–		–	
$\Delta$ сист.	–		–		–	
$\Delta$ рез.	–		–		–	

$m_1 =$	, г	$m_2 =$	, г	$\langle m \rangle =$	, г	$\Delta m =$	, г
$\langle \rho \rangle =$			, кг/м <sup>3</sup>	$\Delta \rho =$			, кг/м <sup>3</sup>

- Визначте похибку визначення маси  $\Delta m$  як масу важка, що відхиляє стрілку терезів на 5 поділок. Результат запишіть у таблиці.
- Приведіть у належний вигляд вимірювальний інструмент та здайте його викладачу.
- За допомогою формули (21) знайдіть масу тіла. Результат запишіть у таблиці.
- Для усіх одержаних даних знайдіть середні значення та обчисліть абсолютні похибки окремих вимірювань відповідно до виразу (1). Результати запишіть у відповідні стовпці таблиць.
- Визначте густину досліджуваного тіла для усіх трьох серій вимірювань у відповідності до співвідношень (19) або (20). Результати запишіть у відповідні таблиці.
- У відповідності до рівності (9) розрахувати абсолютні похибки вимірювань лінійних розмірів з урахуванням систематичної та випадкової складових.
- Розрахуйте похибки одержаних значень густини відповідно до виразів (22) або (23).
- Зробіть висновки до лабораторної роботи.

## 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.

## Лабораторна робота 2

### ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

#### 1. МЕТА РОБОТИ

Експериментально перевірити справедливість другого закону Ньютона за допомогою машини Атвуда.

#### 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Динаміка** – це розділ механіки, який вивчає рух матеріальних тіл як наслідок взаємодії між ними. Чисельною характеристикою інтенсивності взаємодії є сила. **Сила** – це векторна величина, що описує характер та ступінь впливу одних тіл на інші. Позначається сила найчастіше як  $\vec{F}$ . Окрім напрямку та модуля, сила характеризується ще конкретною точкою прикладання. Одиницею вимірювання сили в системі СІ є Ньютон ( $[F]_{\text{СІ}} = \text{Н} = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$ ). Якщо на тіло діють кілька сил, то вони складаються за правилом додавання векторів (трикутника або паралелограма). У цьому випадку сумарна сила називається **рівнодійною** силою.

Встановлено, що під дією однієї й тієї самої сили різні тіла по-різному змінюють свій стан руху. Тобто прискорення, отримане тілом, залежить не лише від сили, а й від такої властивості самого тіла як інертність. Властивість тіл зберігати свій стан руху називається **інертністю**. Кількісною мірою інертності є **маса** тіла, яка позначається літерою  $m$  та у системі СІ вимірюється у кілограмах:  $[m]_{\text{СІ}} = \text{кг}$ .

В основу динаміки покладено теорію руху матеріальної точки, яка ґрунтується на трьох законах Ньютона.

**Перший закон** (або **закон інерції**): існують такі системи відліку, у яких будь-яке тіло знаходиться у стані спокою або рівномірного та прямолінійного руху, поки дія на нього зі сторони інших тіл не змусить його змінити цей стан. Такі системи називаються **інерціальними**.

**Другий закон** (або **закон руху**): швидкість зміни імпульсу тіла дорівнює рівнодійній силі, що діє на тіло

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

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.



#### 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Машина Атвуда – це пристрій, який дозволяє вивчати основні закони кінематики та динаміки поступального руху. Основу його будови становить блок, через який перекинута нитка, на кінцях якої кріпляться вантажі масами  $m_1$  та  $m_2$  (див. рис. 1а). Знайдемо прискорення вантажів у рамках таких припущень: 1) маса блоку  $m_\delta$  нескінченно мала; 2) сили тертя відсутні; 3) нитка невагома та нерозтяжна. За другим законом Ньютона

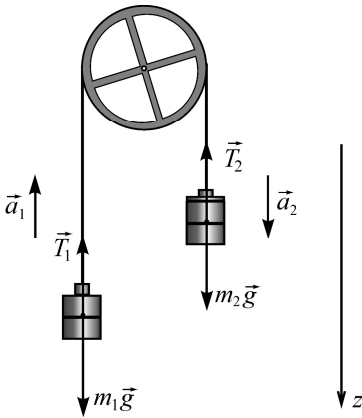
$$\begin{cases} m_1 \vec{g} + \vec{T}_1 = m_1 \vec{a}_1, \\ m_2 \vec{g} + \vec{T}_2 = m_2 \vec{a}_2. \end{cases} \quad (4)$$

Спроектували вирази у системі (4) на вісь  $oz$  з урахуванням того, що  $a_1 = -a_2 = a$  та  $T_1 = T_2$ , одержимо

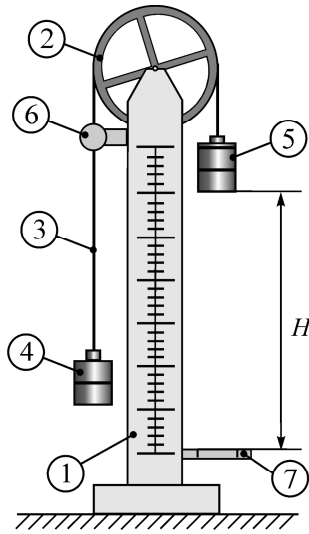
$$a = \frac{g(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}. \quad (5)$$

З іншого боку, має виконуватися співвідношення  $a = F/m$ . Таким чином, чисельник правої частини виразу (5) є нічим іншим як силою, що зумовлює рух у системі, а  $(m_1 + m_2)$  – масою системи. При цьому можна змінити одночасно  $m_1$  та  $m_2$  у такий спосіб, що їх сума залишиться сталою, а різниця зміниться. Відповідно зміниться сила, що діятиме на систему, а маса залишиться сталою. З іншого боку, одночасну зміну можна провести таким чином, що різниця  $m_1$  та  $m_2$  залишиться незмінною, а сума – зміниться. Відповідно зміниться маса за незмінної сили. Такі властивості розглянутої системи дають можливість перевірити експериментально пропорційність прискорення до сили та його обернену пропорційність до маси.

Вираз (5) одержано для ідеального випадку, що не відповідає реальній ситуації. Для удосконалення експериментального методу скористаємося законом збереження енергії. Нехай кожен з вантажів подолав від нерухомого положення за певний час  $t$  відстань  $H$ . Потенціальна енергія  $W_p$  при цьому змінилася на величину



a)



б)

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

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

Припустимо, що масу вантажу  $m_2$  штучно збільшили на величину  $\Delta m = F_{mp}/g$ . Потенціальна енергія  $\Delta m$  компенсує роботу сил тертя, і вираз (9) можна переписати у такій формі

$$(m_2 - m_1)gH = \frac{1}{2} \cdot (m_1 + m_2 + \Delta m) v^2 + \frac{1}{2} \cdot I \omega^2. \quad (10)$$

За умови, що нитка не проковзує по блока,  $\omega = v/r$ , де  $r$  – радіус блока. Якщо блок являє собою диск, то  $I = \frac{1}{2} \cdot m_6 \cdot r^2$ . Згідно з відомостями з кінематики рівноприскореного руху  $H = \frac{1}{2} \cdot a t^2$ ,  $v = at$ . Оскільки маса додаткового вантажу  $\Delta m$  мала порівняно з  $m_1$  та  $m_2$ , її величиною у подальших розрахунках можна знехтувати. В кінцевому підсумку рівність (10) набуває вигляду

$$\frac{1}{2} \cdot (m_2 - m_1) g a t^2 = \frac{1}{2} \cdot (m_1 + m_2) a^2 t^2 + \frac{1}{4} \cdot m_6 r^2 a^2 t^2 / r^2. \quad (11)$$

Різниця мас вантажів праворуч та ліворуч блока буде задаватися за допомогою спеціального вантажу перевантаження  $m_n$ , що додається до однієї з платформ 3 або 4 масами  $m$  (див. рис. 1а). Тоді вираз (11) можна подати у вигляді

$$m_n g = M_e a, \quad (12)$$

$$M_e = 2m + m_n + \frac{1}{2} \cdot m_6. \quad (13)$$

Тут величина  $M_e$  називається **еквівалентною масою системи** і характеризує узагальнені інертні властивості системи.

Насамкінець прискорення під час рівноприскореного руху без початкової швидкості може бути визначено як

$$a = 2H/t^2. \quad (14)$$

Якщо вантаж  $m_2$  у кожному вимірюванні піднімати на одну й ту саму висоту, то згідно з рівністю (14) відношення прискорень для будь-яких двох вимірювань буде дорівнювати оберненому відношенню квадратів часових проміжків, протягом яких відбувається рух

$$\frac{a_i}{a_j} = \frac{t_j^2}{t_i^2}, \quad (15)$$

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 6 відпускає нитку 3, і таким чином починається рух. Щойно спрацьовує фотоелемент приймального столика 7, секундомір автоматично зупиняє відлік, а затискач 6 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 6 відпустить нитку й почнеться рух.
7. Після спрацювання фотоелемента приймального столика 7 та зупинки системи запишіть до відповідного стовпчика таблиці 1 час, виміряний секундоміром.

Таблиця 1 – Перевірка залежності  $a \sim F$  при  $M_e = const$

№	$t$ , с	$m_{n1}$ , г	$H$ , м	№	$t$ , с	$m_{n2}$ , г	$H$ , м
1				6			
...				...			
5				10			
Середнє				Середнє			
$\frac{a_1}{a_2} =$		$\frac{F_1}{F_2} =$		$\delta_F = \frac{ a_1/a_2 - F_1/F_2 }{F_1/F_2} 100\% =$			

8. Повторіть процедуру вимірювання часу, описану у попередніх трьох пунктах, ще 4 рази. Результати вимірювань запишіть до таблиці 1. Також запишіть значення висоти  $H$  та маси перевантаження ( $m_{n1} = 2$  г).
9. Перекладіть з лівої платформи на праву вантаж масою 1 г, збільшивши тим самим масу перевантаження ( $m_{n2} = 4$  г), а отже, і рушійну силу у два рази. При цьому маса системи залишається незмінною.
10. Повторіть вимірювання часу руху системи за цих умов п'ять разів у спосіб, аналогічний вищенаведеному.
11. Знайдіть середнє значення часу руху для обох серій експериментів.
12. Підрахуйте відношення прискорень вантажів для обох випадків згідно з виразом (15). Порівняйте це відношення з відношенням сил  $F_1/F_2 = m_{n1}/m_{n2}$ .
13. Результати обчислень занесіть до таблиці 1.
14. Знайдіть відносне відхилення перевірки пропорційності прискорення до сили за формулою

$$\delta_F = \frac{|a_1/a_2 - F_1/F_2|}{F_1/F_2} 100\%. \quad (16)$$

15. Результати обчислень занесіть до таблиці 1.

## 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			
$\frac{a_1}{a_2} =$		$\frac{M_{e2}}{M_{e1}} =$		$\delta_M = \frac{ a_1/a_2 - M_{e2}/M_{e1} }{M_{e2}/M_{e1}} 100\% =$			

8. Результати обчислень занесіть до таблиці 2.
9. Запишіть висновки до лабораторної роботи.

## 6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

### На оцінку “задовільно”

1. Дати визначення поняттям сила та маса.
2. Сформулювати перший закон Ньютона.
3. Сформулювати другий закон Ньютона.
4. Сформулювати третій закон Ньютона.
5. Викласти порядок виконання лабораторної роботи.

### На оцінку “добре”

6. Пояснити будову машини Атвуда та принцип її дії.
7. Одержати вираз для прискорення вантажів у машині Атвуда. Тертям та масою блока знехтувати.
8. Пояснити принцип перевірки другого закону Ньютона в даній роботі.
9. Як враховується сила тертя під час експерименту?
10. Сформулювати другий закон Ньютона з використанням поняття імпульсу.

### На оцінку “відмінно”

11. Що таке еквівалентна маса?
12. Одержати розрахункову формулу (12), спираючись на закон збереження енергії.
13. Чим зумовлені похибки експерименту у даній роботі?
14. Як змінюється з часом імпульс системи вантажів у машині Атвуда під час руху? Одержати точний вираз.
15. Як зміниться рушійна сила у машині Атвуда, якщо її розмістити у ліфті, що рухається у вертикальному напрямку з прискоренням  $\vec{a}$ ?

## 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: 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.



## Лабораторна робота 3

# ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ У ПОВІТРІ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСУ

### 1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися із поняттям звуку та особливостями поширення звукових хвиль у газах.
2. Ознайомитися з поняттям стоячої хвилі.
3. Визначити швидкість поширення звукових хвиль у повітрі методом резонансу.

### 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

#### 2.1. Поняття хвилі

**Хвилею** називається процес поширення коливань у просторі. У випадку механічних хвиль у пружному середовищі (так званих пружних хвиль) причиною передачі коливального руху є взаємодія між структурними елементами середовища. При цьому швидкість залучення наступних елементів середовища до коливального процесу визначається виключно властивостями середовища і не залежить від характеристик початкового джерела коливань. Така швидкість ще називається **швидкістю хвилі**.

Іншою важливою характеристикою хвилі є **довжина хвилі** – відстань, яку проходить хвиля за один період коливань

$$\lambda = vT = v/f, \quad (1)$$

де  $v$  – швидкість хвилі;  $T$  – період;  $f$  – частота.

За фізичною природою розрізняють механічні, електромагнітні хвилі, хвильові процеси у провідних середовищах, гравітаційні хвилі. В подальшому будемо розглядати саме механічні. Залежно від відносного спрямування напрямку коливань та напрямку поширення хвилі розрізняють поперечні та поздовжні хвилі. **Попереочною** називається хвиля, в якій елементи середовища коливаються у напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення

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

$$v = \sqrt{\gamma p / \rho} . \quad (6)$$

де  $\rho$  – густина газу;  $p$  – його тиск;  $\gamma$  – показник адіабати. З урахуванням рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT' \Rightarrow p \frac{V}{m} = \frac{RT'}{M} \Rightarrow \frac{p}{\rho} = \frac{RT'}{M} ,$$

(де  $m$  – маса;  $M$  – молярна маса;  $R = 8,41$  Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;  $T'$  – абсолютна температура) вираз (6) можна подати у вигляді

$$v = \sqrt{\gamma RT' / M} . \quad (7)$$

## 2.2. Поняття звуку

Пружні хвилі, які розповсюджуються у будь-якому пружному середовищі та мають частоту в діапазоні від 16 Гц до 20 кГц, називають **звуковими хвилями**. В широкому сенсі під **звуком** розуміють саме звукові хвилі. У вузькому сенсі звуком вважається відчуття, яке виникає у тварин та людей завдяки дії на органи слуху звукових хвиль у середовищі існування. Пружні хвилі з частотою, меншою, ніж 16 Гц, називають **інфразвуком**, а хвилі з частотою, більшою, ніж 20 кГц, – **ультразвуком**.

Звуки розрізняють за висотою, тембром та гучністю. Власне, всі перелічені оцінки мають суб'єктивний характер, однак кожній з них відповідає визначена характеристика звукової хвилі. Для трактування зазначених характеристик спочатку розглянемо особливості реальних звукових хвиль.

Такі хвилі, як правило, є немонохроматичними і являють собою суперпозицію монохроматичних хвиль з різними частотами та амплітудами. Множина частот коливань, що переносяться звуковою хвилею, називається **акустичним спектром**. Якщо в спектрі наявна вся неперервна множина частот у визначеному діапазоні від  $f'$  до  $f''$ , то спектр називають суцільним. Якщо спектр

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.

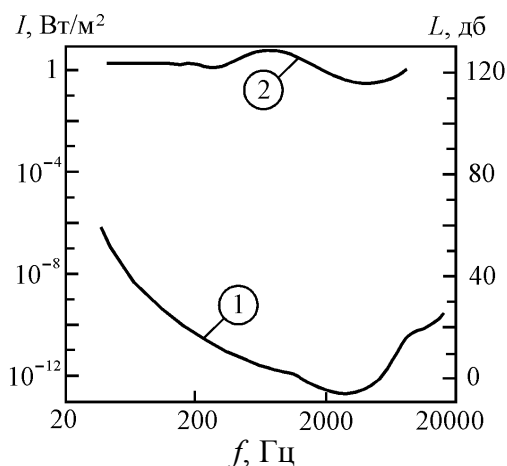


Рисунок 1 – Усереднені слухові характеристики людського вуха: 1 – поріг чутності; 2 – поріг больового відчуття

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-

строї ультразвукової хірургії. Перевагою цих інструментів є можливість видалення м'яких тканин без руйнування кровоносних судин, оскільки еластичні оболонки їх клітин добре поглинають енергію звукових хвиль, що унеможлиблює їх кавітаційне руйнування. Тому сам процес операції є практично безкровним, що робить дані інструменти незамінними у хірургії головного мозку та внутрішніх органів.

Інформаційна дія звуку також широко застосовується в техніці як основа багатьох методів діагностики, таких, як ультразвукова дефектоскопія у промисловості, ультразвукова діагностика внутрішніх органів у медицині та ветеринарії. В основу цих методів покладено аналіз особливостей поширення та поглинання ультразвуку в різних середовищах, його відбивання на межах поділу. Застосування саме ультразвуку обумовлено тим, що його можна одержувати у вигляді вузьких спрямованих пучків, на кшталт променів світла, що дозволяє з високою роздільною здатністю вивчати внутрішню структуру об'єктів. Важливою особливістю ультразвукової діагностики є її неруйнівний характер, що особливо важливо у медицині.

Іншим прикладом застосування інформаційної дії звуку у техніці є ультразвукова локація (або ехолокація) – метод визначення положення об'єкта шляхом вимірювання сумарного часу поширення звукової хвилі до об'єкта та часу поширення назад відбитої від нього хвилі. Якщо швидкість поширення хвилі відома, то точність визначення відстані обмежується лише точністю вимірювання часу. Найбільшого поширення такий метод локації набув у морському флоті для виявлення об'єктів під водою та дослідження рельєфу морського дна. Прилади, які використовуються при цьому, називаються сонарами.

У живій природі інформаційна дія звуку є основою безпосереднього спілкування. Звукова локація також зустрічається у природі. Відстань до об'єктів у воді за допомогою ультразвуку визначають китоподібні тварини. Ехолокацію як засіб навігації використовують птахи гуахаро, що мешкають у темних гірських печерах Південної Америки. При цьому вони видають звуки тривалістю близько 2 мс та частотою 7 кГц, які відбиваються від рельєфу печери та сприймаються потім птахами. Це дозволяє

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.

## 2.4. Стоячі хвилі

Метод резонансу, який використовується для вимірювання довжини хвилі, базується на дослідженні стоячих звукових хвиль. Розглянемо поняття стоячої хвилі більш детально.

Якщо в середовищі поширюються декілька хвиль одночасно, то зміщення частинок середовища від положення рівноваги визначається як сума зміщень, зумовлених кожною хвилею окремо. Розглянемо найпростіший, проте дуже важливий випадок поширення двох однакових хвиль у протилежних напрямках. Їх рівняння

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \xi_0 \cos(\omega t - kx + \alpha_1), \\ \xi_2 &= \xi_0 \cos(\omega t + kx + \alpha_2).\end{aligned}$$

Користуючись формулою суми косинусів, одержимо **рівняння стоячої хвилі**

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2\xi_0 \cos(kx + 0,5(\alpha_2 - \alpha_1)) \cos(\omega t + 0,5(\alpha_2 + \alpha_1)). \quad (9)$$

Якщо вибрати відповідним чином початок координат та початок відліку часу, то різниця  $\alpha_1 - \alpha_2$ , як і сума  $\alpha_1 + \alpha_2$ , буде дорівнювати 0. Тоді результат запишеться як

$$\xi(x, t) = A(x) \cos \omega t, \quad \text{де } A(x) = 2\xi_0 \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}. \quad (10)$$

Характер коливань ділянок середовища залежно від координати за наявності стоячої хвилі проілюстровано на рисунку 2. В момент часу  $t = 0$  величина  $\zeta(x, t)$  досягає амплітудних значень  $A(x)$ . За час, що дорівнює половині періоду  $T$ , положення кожної точки  $x$  **синхронно** змінюється від  $A(x)$  до  $-A(x)$ . За другу половину періоду ситуація повторюється з точністю до навпаки.

Точки, в яких амплітуда коливань сягає максимального значення, називаються **пучностями** стоячої хвилі. Координати пучностей  $x_n$  визначаються з умови  $|\cos(2\pi x/\lambda)| = 1$  (при цьому  $|A(x)|$  досягає максимального значення). Неважко показати, що



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

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

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

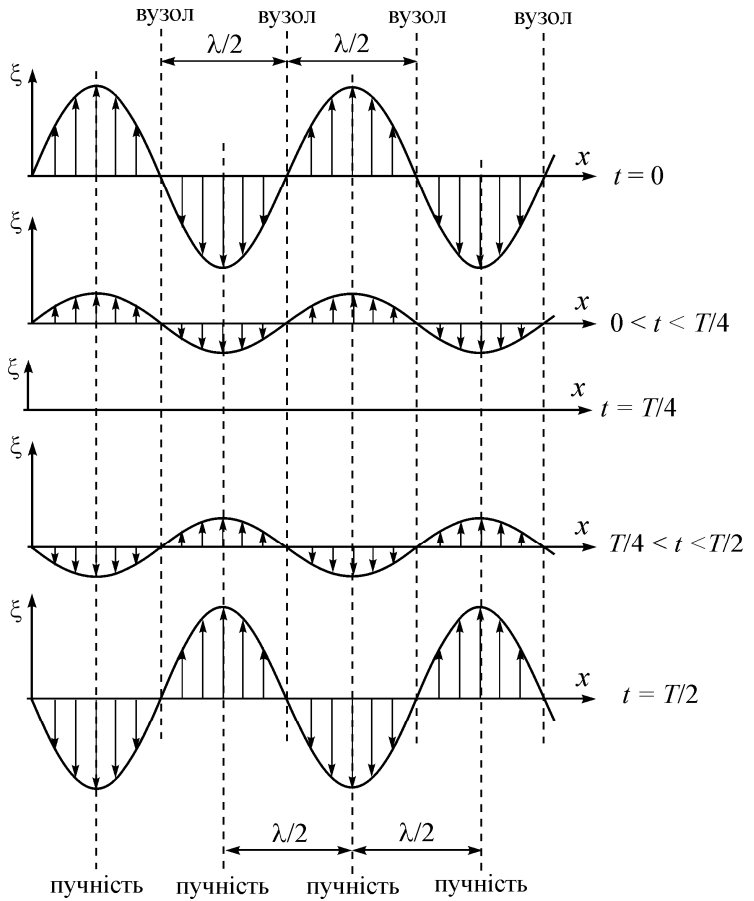


Рисунок 2 – “Моментальні фотознімки” ( $t = \text{const}$ ) стоячої хвилі для різних фаз

Основні відмінності стоячої хвилі, що описується виразом (10), від біжучої такі: **1)** стояча хвиля не переносить енергії через вузли; **2)** амплітуда коливань стоячої хвилі змінюється з координатою від нуля до подвійного максимального значення амплітуди хвиль, з яких вона утворена; **3)** стояча хвиля може бути локалізованою в певній частині простору.

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Відрізок скляної труби з джерелом звуку та рухомих екраном на торцях.
2. Генератор звукової частоти.
3. Термометр.

### 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Основу лабораторної установки складає відрізок циліндричної труби 1 (див. рис. 3), встановлений вертикально. На нижньому торці труби розміщений дифузор 2, який виконує роль джерела звукових хвиль. З верхнього торця розміщено рухомий металевий екран 3, площина якого перпендикулярна осі труби. За допомогою нитки 4 і блоків 5 та 6 екран може вільно переміщатися всередині труби.

Якщо екран розмістити у місці, де знаходиться пучність стоячої хвилі, то коливання повітря максимально можливої амплітуди за рахунок взаємодії будуть зумовлювати коливання максимальної амплітуди в матеріалі екрана. Таким чином, екран стає своєрідним джерелом хвиль, які будуть збігатися за фазою з прямими хвилями від дифузора та відбитими від самого екрана хвилями. У результаті відбуватиметься конструктивна інтерференція та відчутне збільшення амплітуди стоячої звукової хвилі в трубі, яке отримало назву *резонансу* системи. Резонанс легко ідентифікувати на слух.

Пучності стоячої хвилі у відповідності до виразу (11) розміщені одна від одної на відстані половини довжини біжучої хвилі. Тому під час руху екрана у трубі буде спостерігатися періодичне збільшення гучності звуку. Координати положень екрана,

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.

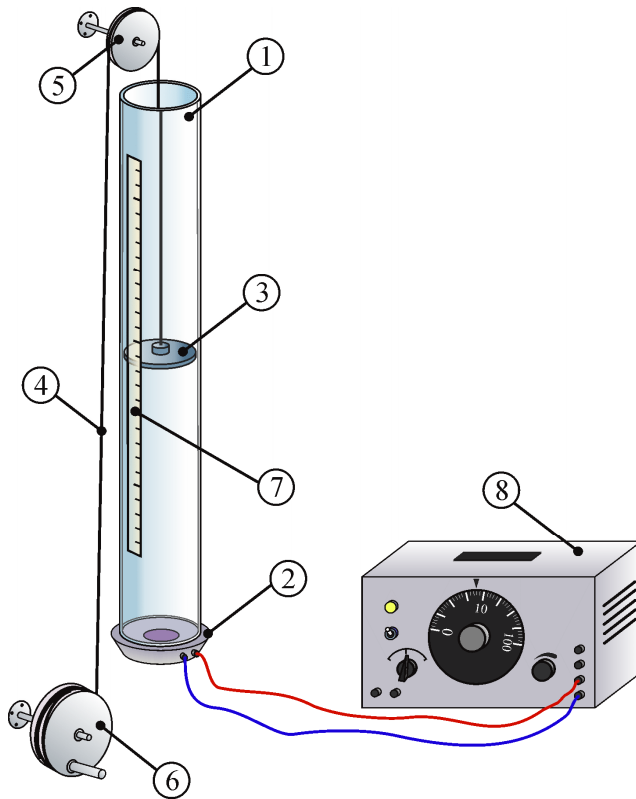


Рисунок 3 – Схематичне зображення експериментальної установки: 1 – скляна труба; 2 – дифузор; 3 – рухомий металевий екран; 4 – нитка; 5 – блок; 6 – блок з рукояткою для намотування нитки; 7 – шкала для визначення положення екрана; 8 – звуковий генератор

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Увімкніть звуковий генератор та прогрійте його впродовж 5 хвилин. При цьому регулятор гучності має бути у мінімальному положенні.
3. Одержіть у викладача три значення частоти та запишіть їх у таблицю 1.
4. Виставте на генераторі необхідну частоту та встановіть гучність звуку на розумному рівні.
5. Установіть рухомий екран у нижнє положення. В процесі повільного і рівномірного піднімання екрана стежте за гучністю звуку. Положення екрана, де гучність набуває максимуму, запишіть у таблицю 1.
6. Виміряйте та запишіть температуру  $T'$  в аудиторії.
7. Повторіть попередній пункт для інших частот, заданих викладачем. Результати записати у таблицю 1.
8. Визначте відстані між пучностями стоячих хвиль для всіх частот у відповідності до виразу

$$\delta x_{ij} = x_{ij} - x_{i(j+1)}.$$

9. Визначте середнє значення відстаней між пучностями для кожної частоти як

$$\langle \delta x_i \rangle = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} \delta x_{ij},$$

де  $N_i$  – кількість пучностей для  $i$ -ї частоти.

10. Визначте швидкість звуку для кожної частоти у відповідності до виразу

$$v_i = f_i \lambda_i = 2 f_i \langle \delta x_i \rangle. \quad (13)$$

Таблиця 1 – Результати вимірювань

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

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

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

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

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

$\langle \delta x_3 \rangle =$ = ....., 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

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

де  $\Delta_1 x_i$  – інструментальна складова похибки, за яку необхідно брати величину ціни поділки шкали для визначення положення екрану; а  $\Delta_2 x_i$  – випадкова складова абсолютної похибки, яка розраховується у відповідності до правила «трьох сигм»

$$\Delta_2 x_i = 3 \sqrt{\frac{1}{N_i - 2} \sum_{j=1}^{N_i-1} (\Delta x_{ij})^2}. \quad (16)$$

Тут  $\Delta x_{ij} = \langle \delta x_i \rangle - \delta x_{ij}$  – різниця середнього значення відстані між пучностями для  $i$ -ї частоти та поточним значенням відстані між  $j$ -ю та  $(j + 1)$ -ю пучностями.

12. Остаточне значення визначеної швидкості подайте у вигляді

$$v = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 v_i \pm \max(\Delta v_i). \quad (17)$$

13. Порівняйте одержаний експериментально результат з теоретичним значенням, розрахованим відповідно до виразу (7). Мольну масу повітря вважати такою, що становить 29 г/моль.

14. Зробити висновки до лабораторної роботи.

## 6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

### На оцінку “задовільно”

1. Сформулювати поняття звуку.
2. Що називають хвилею? Як класифікують хвилі?
3. Перелічити характеристики хвилі та дати їм означення.
4. Записати хвильове рівняння та рівняння плоскої монохроматичної хвилі.
5. Послідовність виконання лабораторної роботи.

### На оцінку “добре”

6. Показати, що рівняння плоскої монохроматичної хвилі задовольняє хвильове рівняння.

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>.

## Лабораторна робота 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ В РІДИНАХ

#### 1. МЕТА РОБОТИ

1. Експериментально переконатися у наявності сил в'язкого тертя у рідинах.
2. Визначити в'язкість досліджуваної рідини методом Стокса.

#### 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

##### 2.1. Загальні відомості про рідини

Рідкий агрегатний стан речовини характеризується здатністю до зберігання об'єму, як і твердий стан, однак при цьому рідини, як і гази, не зберігають своєї форми. Здатність зберігати об'єм свідчить про наявність взаємодії між молекулами рідини, і цією взаємодією не можна нехтувати. У той самий час взаємодія не є настільки інтенсивною, щоб локалізувати кожен молекулу рідини у певному положенні у просторі та забезпечити зберігання ще й форми. За рахунок теплових флуктуацій або під дією зовнішніх сил молекули рідини змінюють своє положення, що у макроскопічних масштабах призводить до **текучості** рідин.

**Сили тертя** – це дисипативні сили, які перетворюють механічну енергію на внутрішню. Такі сили завжди спрямовані проти напрямку руху тіла. Під час руху твердого тіла у рідині за рахунок взаємодії між молекулами рідини та молекул твердого тіла у приконтатному шарі тверде тіло втрачає свою кінетичну енергію, що свідчить про наявність сил тертя. Аналогічна ситуація має місце у течії рідини, оскільки текуча рідина так чи інакше завжди обмежена твердим тілом. Таке тертя називається **внутрішнім**, або **в'язким**, а механізм його виникнення буде охарактеризований далі.

Характер внутрішнього тертя залежить від типу течії рідини. Розрізняють два типи течії: ламінарний та турбулентний.



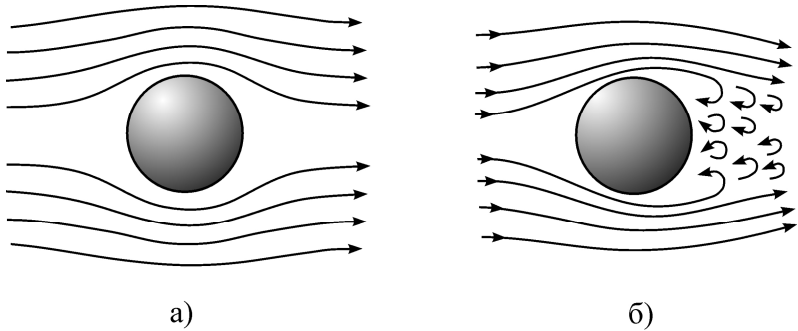


Рисунок 1 – Схематичне зображення ліній течії для ламінарного (а) та турбулентного (б) рухів

**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 **нестабільністю** (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 нерухокої 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 відірвалась від пластини, віддає горизонтальну складову імпульсу. У сукупності такий механізм призводить до передачі частини імпульсу

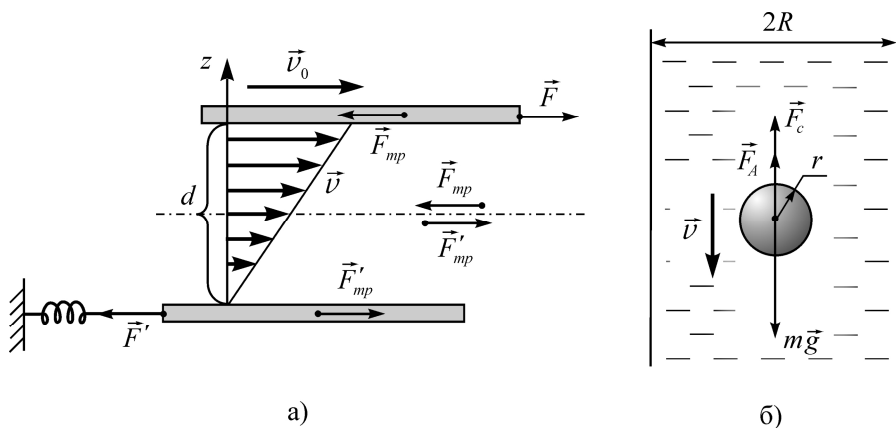


Рисунок 2 – До пояснення механізму виникнення в'язкого тертя (а); схематичне зображення руху кульки у в'язкій рідині (б)

від пластини до прилеглих шарів рідини. Швидкість верхньої пластини при цьому повинна зменшуватися, що свідчить про дію певної сили на пластину зі сторони рідини. Така сила називається силою в'язкого тертя  $\vec{F}'_{mp}$ . Для підтримання швидкості пластини на рівні  $v_0$  до неї потрібно прикласти силу  $\vec{F}$ . За третім законом Ньютона сила  $\vec{F}$  має дорівнювати силі в'язкого тертя  $\vec{F}'_{mp}$ .

Вищенаведений механізм передачі імпульсу буде працювати не лише у приконтактних з пластинами шарах рідини, а й між шарами рідини в будь-якій точці між пластинами. В результаті рух верхньої пластини спричинить рух рідини зі швидкістю, яка залежить лише від вертикальної координати, за умови, що течія буде ламінарною (див. рис. 2а).

Нижня пластина при цьому поглинає імпульс, що переноситься молекулами рідини у вертикальному напрямку під час їх прилипання до пластини. Отже, нижня пластина має знаходитись під дією сили  $\vec{F}'_{mp}$ . Для того щоб пластина залишалася нерухомою, протидіяти силі  $\vec{F}'_{mp}$  має сила пружності  $\vec{F}'$ . За третім законом Ньютона повинна виконуватися рівність

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

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 кількість 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  $\eta$  ( $[\eta]_{\text{Cl}} = \text{Па} \cdot \text{с}$ ) – 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

$$A = 1; B + C - A = 1; -A - C = -2 \Rightarrow \\ A = B = C = 1. \quad (4)$$

З урахуванням виразу (4) сила опору (3) набуває вигляду

$$F = \lambda \eta r v. \quad (5)$$

Конкретний вигляд сили опору був встановлений англійським фізиком Дж. Стоксом, і на честь свого першовідкривача вона називається **силою Стокса**

$$F_C = 6\pi\eta r v. \quad (6)$$

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Скляна посудина з досліджуваною рідиною.
2. Штатив.
3. Набір кульок різного діаметра.
4. Секундомір.
5. Мікроскоп.
6. Лінійка.

### 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

#### 4.1. Метод Стокса для визначення коефіцієнта в'язкості

Пропорційність сили в'язкого тертя до швидкості згідно з рівністю (6) покладена в основу методу для визначення коефіцієнта в'язкості, який ще називається методом Стокса. Якщо виконується умова  $F_C \sim v$ , то є підстави для припущення, що після певного перехідного періоду руху швидкість кульки стає константою. Дійсно, за другим законом Ньютона (див. рисунок 2б)

$$mg - F_A - F_C = ma, \quad (7)$$

де  $m$  – маса кульки;  $a = a(t)$  – прискорення кульки, яке залежить від часу;  $F_A$  – сила Архімеда. На початку руху швидкість кулі дорівнює нулю, сила Стокса відсутня, а прискорення максимальне.

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

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

Остання рівність і є розрахунковою формулою у роботі. Теоретичне її обґрунтування виходить за рамки матеріалу, що вивчається, однак із загальних міркувань зрозуміло, що чим більше співвідношення  $d/D$ , тим більшу роль у русі кульки відіграватимуть стінки посудини. Тому значення  $\eta$ , одержане за співвідношенням (10), буде дещо завищеним, що і враховується наявністю величини  $1 + d/D$  у знаменнику рівності (11). При цьому коли  $D \rightarrow \infty$ , вираз (11) переходить у рівність (10).

#### **4.2. Визначення розмірів кульок за допомогою мікроскопа**

Для того щоб швидкість руху була прийнятною для визначення часу падіння, розміри кульок мають бути за порядком  $\sim 1$  мм. Точно визначити діаметри кульок можна за допомогою мікрометра, однак при цьому вимірювання являє собою складний та кропіткий процес. До того ж у процесі вимірювання кульки можуть деформуватися. Тому у даній роботі використовується безконтактний метод визначення діаметра – за допомогою мікроскопа (див. рис. 3).

Методика вимірювань полягає у наступному. Кулька розміщується на спеціальній підставці 6 під об'єктивом 5 мікроскопа (див. рис. 3). Поле зору окуляра 3 має проградуйовану шкалу, як показано на рисунку 4. Підставка з кулькою позиціонується так, щоб перехрестя збігалося з центром кульки. Діаметр при цьому визначається в поділках шкали для двох взаємно перпендикулярних положень шкали. Такий підхід дозволяє працювати з об'єктами, форма яких дещо відрізняється від сферичної. Потім виміряний у поділках діаметр переводиться у міліметри шляхом множення на ваговий коефіцієнт, який залежить від висоти підняття тубуса та визначається за допомогою спеціальної таблиці (див. таблицю 1).

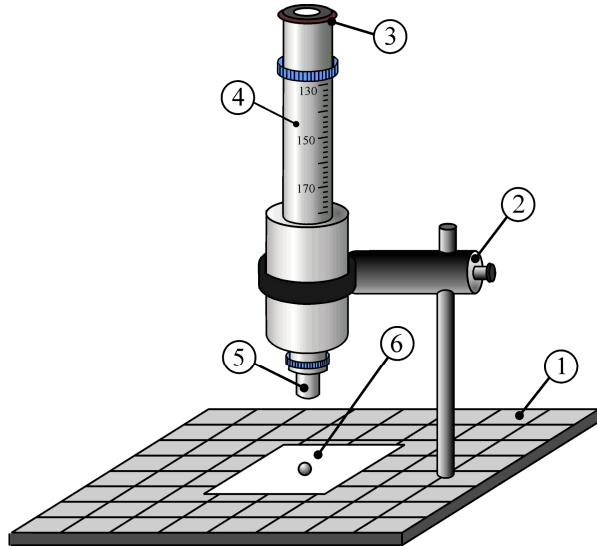


Рисунок 3 – Схематичне зображення мікроскопа: 1 – станина штатива; 2 – штатив; 3 – окуляр мікроскопа; 4 – проградуїований тубус; 5 – об’єктив; 6 – підставка з досліджуваним об’єктом

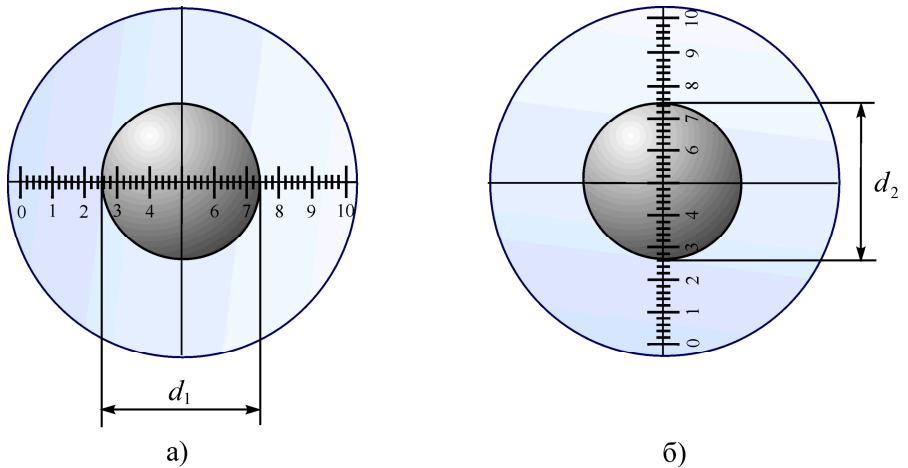


Рисунок 4 – Схематичне зображення виду в окулярі для горизонтального (а) та вертикального (б) положень шкали

Таблиця 1 – Залежність ціни поділки від висоти підняття тубуса

№	Довжина тубуса $X$ , мм	Ціна поділки $Y$ , мм
1	130	0,058
2	140	0,053
3	150	0,049
4	160	0,045
5	170	0,041
6	180	0,038
7	190	0,036

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтесь із попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Підберіть 5-7 кульок та виміряйте діаметр кожної з них за допомогою мікроскопа. При цьому діаметр слід вимірювати для двох положень шкали (див. рис. 4). Поворот шкали здійснюється обертанням окуляра 3 (див. рис. 3). Результати занесіть до таблиці 2.
3. Виміряйте відстань  $l$  від нижньої позначки на посудині до верхньої позначки, з якої швидкість руху вважається сталою, за допомогою лінійки. Результат занесіть до таблиці 2.
4. Виміряйте діаметр  $D$  посудини за допомогою лінійки. Результат занесіть до таблиці 2.
5. Запишіть у таблицю 2 значення густини речовини кульки  $\rho$  та рідини  $\rho_0$ .
6. Запишіть у таблицю 2 значення температури  $T$  в аудиторії.
7. Підготуйте секундомір до роботи. Розмістіть кульку над центром посудини з рідиною та акуратно відпустіть її. Щойно кулька перетне першу умовну позначку, увімкніть секундомір. Щойно кулька перетне другу умовну позначку – вимкніть його. Вимірний час запишіть у таблицю 2.



**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, скористайтеся 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.

10. Визначте середнє значення  $\langle \eta \rangle$  та випадкову похибку  $\Delta \eta_i$  визначення коефіцієнта  $\eta$  як

$$\Delta \eta_i = \langle \eta \rangle - \eta_i. \quad (13)$$

Результат занесіть до таблиці 2.

11. Похибку вимірювань визначте за допомогою правила «трьох сигм»:

$$\Delta \eta = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta \eta_i)^2} \quad (N = 5). \quad (14)$$

12. Порівняйте одержаний результат з табличним значенням.  
13. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

## 6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

### На оцінку “задовільно”

1. Охарактеризувати рідкий стан речовини.
2. Що називається в’язким тертям?
3. Охарактеризувати ламінарний та турбулентний типи течії.
4. Записати формулу для сили Стокса та пояснити усі величини, що входять до виразу.
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

### На оцінку “добре”

6. Які сили діють на кульку, що падає, в рідині? Чому дорівнює кожна з цих сил? Як рухається кулька в рідині, починаючи від її поверхні?
7. Чому сила опору середовища залежить від форми тіла, що рухається?
8. Пояснити, чому рух тіл у в’язкому середовищі має відбуватися зі сталою швидкістю.
9. Який фізичний зміст коефіцієнта в’язкості? Від чого він залежить? Одиниці вимірювання.

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 не-обмеженому середовищі (11).

### **СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Савельєв І.В. Курс фізики. Том 1. Механіка. Молекулярна 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, 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.

## Лабораторна робота 5

# ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ МЕТОДОМ АДАБАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ

### 1. МЕТА РОБОТИ

1. Експериментально переконатися у справедливості основних закономірностей молекулярно-кінетичної теорії та термодинаміки газів.
2. Визначити відношення теплоємності при сталому тиску до теплоємності при сталому об'ємі для повітря.

### 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

#### 2.1. Ідеальний газ

**Молекулярна фізика** – розділ фізики, що вивчає процеси у системах, що складаються з великої множини елементів (т. з. *макросистемах*) з точки зору їх мікроскопічної будови. Відповідно до основних положень молекулярної фізики: **1)** усі тіла складаються з атомів або молекул; **2)** молекули (атоми) безперервно та хаотично рухаються; **3)** між ними існує взаємодія, що має електромагнітну природу.

Існує чотири агрегатних стани речовини: твердий, рідкий, газоподібний та плазма. Вони різняться між собою характером та інтенсивністю взаємодії молекул між собою. Найменша інтенсивність такої взаємодії притаманна газоподібному стану, тому для досить розріджених газів можна користуватися моделлю **ідеального газу**. Зазначена модель характеризується тим, що: **1)** нехтується потенціальна енергія взаємодії молекул порівняно з кінетичною енергією їх хаотичного теплового руху; **2)** взаємодія молекул між собою та зі стінкою посудини має характер короточасних абсолютно пружних зіткнень; **3)** молекули ідеального газу вважаються матеріальними точками, а їх об'єм нехтується порівняно з об'ємом посудини.

Відповідний теоретичний розрахунок показує, що така модель описується рівнянням

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

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

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

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

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

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

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

де параметр  $i$  залежно від геометрії молекули визначається у наступний спосіб

$$i = N_n + N_{об} + 2N_k. \quad (5)$$

Тут  $N_n$  – кількість ступенів вільності поступального руху (для тривимірного простору завжди  $N_n = 3$ );  $N_{об}$  – кількість ступенів вільності обертального руху (для одноатомних молекул  $N_{об} = 0$ , для двохатомних молекул  $N_{об} = 2$ , для трьох- і більше атомних молекул  $N_k = 3$ );  $N_k$  – кількість ступенів вільності коливального руху (для одноатомних молекул  $N_k = 0$ , для двохатомних молекул  $N_k = 1$ , для трьох- і більше атомних молекул  $N_k = 3N_0 - 6$ ,  $N_0$  – кількість атомів у молекулі). Множник «2» перед  $N_k$  зумовлений тим фактом, що коливальний рух характеризується як кінетичною, так і потенціальною енергією, середні значення яких однакові.

Зручною інтегральною характеристикою ідеального газу, як і будь-якої іншої макроскопічної системи, є **внутрішня енергія** (див. теоретичні відомості до лабораторної роботи 6). Для ідеального газу внутрішня енергія буде визначатися лише кінетичною енергією хаотичного теплового руху його молекул. Тоді з урахуванням рівності (4) **внутрішня енергія**  $U$  ідеального газу запишеться як

$$U = N\langle\varepsilon\rangle = \frac{i}{2} \frac{m}{M} N_A k_B T = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (6)$$

У процесі зміни стану ідеального газу він здатний виконувати роботу над зовнішніми тілами. Елементарна **робота** ідеального газу визначається як  $\delta A = p dV$ , або, з урахуванням рівності (2),

$$\delta A = \frac{mRT}{MV} dV. \quad (7)$$

Як правило, процеси перетворення енергії спричиняють зміни стану газу. Зокрема, змінюється його температура. Для кількісного опису таких процесів зручно користуватися такою величиною, як **молярна теплоємність**

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

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 витратиться 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 Масра*.

## 2.2. Адіабатний процес

Ще одним поширеним видом процесів у макросистемах є т.з. **адіабатний процес**, або процес, який відбувається без теплообміну, тобто  $\delta Q = 0$  або  $dU = -\delta A$ . З урахуванням рівностей (6) та (7)

$$\frac{i}{2} \frac{m}{M} R dT + p dV = 0 \Rightarrow C_V \frac{m}{M} dT + p dV = 0,$$

а з урахуванням рівняння Менделєєва-Клапейрона (2) маємо

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} = 0 \Rightarrow \ln T + \frac{R}{C_V} \ln V = \text{const} \Rightarrow TV^{R/C_V} = \text{const}.$$

Застосувавши позначення

$$\gamma = C_p/C_V \quad (12)$$

та за допомогою виразів (11) і (2), рівняння адіабати в кінцевому підсумку можна записати у два способи

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}; \quad pV^\gamma = \text{const}. \quad (13)$$

Остання рівність у (13) ще називається **формулою Пуассона**. Оскільки  $\gamma > 1$ , то під час адіабатичного стискання газ буде нагріватися, а під час адіабатичного розширення – навпаки, охолоджуватися. Нагрівання газу стисканням, наприклад, застосовується у дизельних двигунах для займання пальної суміші.

## 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Балон з герметичним краном.
2. Диференціальний манометр.
3. Насос.

## 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Показник адіабати можна визначити експериментально в рамках методу Клемана-Дезорма. Відповідно до цього методу використовується установка, що зображена на рисунку 1а. Сут-



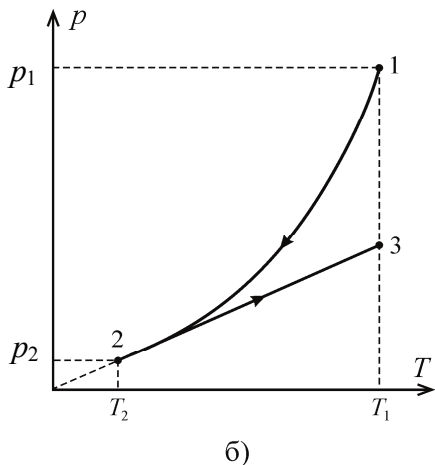
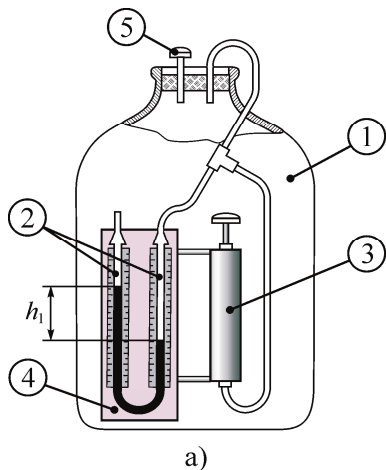


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки (а);  $pT$ -діаграма процесів, що в ній відбуваються (б)

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

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1, \quad (14)$$

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 розширення тиск газу в балоні буде дорівнювати атмосферному,

тобто  $p_2 = p_0$ , а температура  $T_2$  буде нижчою за температуру  $T_1 = T_0$ . Стан після адіабатичного розширення характеризується параметрами  $p_2$  та  $T_2$  та зображений на рисунку 1б точкою 2.

З часом температура повітря в балоні за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем підвищиться і стане дорівнювати кімнатній:  $T_3 = T_0$ . Тиск у балоні також підвищиться до певного значення  $p_3$ . Об'єм повітря залишиться незмінним (балон закритий). Стан, що характеризується параметрами  $p_3$  та  $T_3$ , зображений на рисунку 1б точкою 3. Тиск  $p_3$  вимірюється експериментально за допомогою манометра:

$$p_3 = p_0 + \rho gh_3. \quad (15)$$

З математичної точки зору перехід газу зі стану 1 у стан 2 відбувається у відповідності до рівняння (13). Це означає, що

$$\frac{p_1^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{p_2^{\gamma-1}}{T_2^\gamma} \quad \text{або} \quad \frac{p_1^{\gamma-1}}{T_0^\gamma} = \frac{p_0^{\gamma-1}}{T_2^\gamma}, \quad (16)$$

де враховано, що  $T_1 = T_0$ ,  $p_2 = p_0$ . Процес переходу газу, що залишився у балоні, зі стану 2 у стан 3 буде ізохорним. Тоді у відповідності до виразу (2)

$$\frac{p_3}{T_3} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{або} \quad \frac{p_3}{T_0} = \frac{p_0}{T_2}. \quad (17)$$

Виключимо з (16) і (17) температури і отримаємо

$$\left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\gamma-1} = \left( \frac{p_3}{p_0} \right)^\gamma. \quad (18)$$

Підставивши в рівняння (17) вирази (14) та (15), одержимо

$$\left( 1 + \frac{\rho gh_1}{p_0} \right)^{\gamma-1} = \left( 1 + \frac{\rho gh_3}{p_0} \right)^\gamma.$$

З урахуванням відомого співвідношення  $(1 + \alpha)^n \approx 1 + n\alpha$ , а також умови, що  $\rho gh_1 \ll 1$  і  $\rho gh_3 \ll 1$ , одержимо

$$1 + (\gamma - 1) \frac{\rho gh_1}{p_0} \approx 1 + \gamma \frac{\rho gh_3}{p_0} \Rightarrow$$
$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_3}. \quad (19)$$

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 ненависнутому 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).
6. Через кілька хвилин після закриття клапана, коли рівні рідини в манометрі перестануть змінюватися, визначте різницю рівнів  $h_3$ . Результат запишіть у таблицю 1.
7. Повторіть дослід, описаний у пунктах 3-6, ще 9 разів, при цьому початкові різниці рівнів потрібно поступово зменшувати.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Номер досліджу	$h_{1i}$ , мм	$h_{3i}$ , мм	$\gamma_i$	$\Delta_1\gamma_i$	$\gamma_i - \langle\gamma\rangle$
1					
2					
...	...	...	...	...	...
$N-1$					
$N$					

$\langle\gamma\rangle =$	$\Delta h =$	$\Delta\gamma =$	$\gamma = \langle\gamma\rangle \pm \Delta\gamma =$
--------------------------	--------------	------------------	--

- Відповідно до виразу (19) визначте значення  $\gamma_i$  для кожного досліджу. Запишіть ці значення у таблицю 1.
- Визначте середнє значення показника адіабати  $\langle\gamma\rangle$  у відповідності до виразу

$$\langle\gamma\rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i,$$

де  $N$  – число вимірювань.

- Для усіх одержаних результатів знайдіть систематичну складову абсолютної похибки  $\Delta_1\gamma_i$  у відповідності до виразу

$$\Delta_1\gamma_i = \Delta h \sqrt{\frac{h_{3i}^2 + h_{1i}^2}{(h_{1i} - h_{3i})^4}}, \quad (20)$$

де  $\Delta h$  – інструментальна похибка шкали манометра.

- У відповідності до правила «трьох сигм» знайдіть випадкову складову абсолютної похибки

$$\Delta_2\gamma = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\gamma_i - \langle\gamma\rangle)^2}.$$

- 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”

11. Чому в процесі накачування температура газу в балоні збільшується?
12. Одержати формулу Маєра (11).
13. Одержати рівняння адіабати (13).
14. Одержати розрахункову формулу (19).
15. Одержати вираз для розрахунку похибки (20).

## 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: Ален ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.

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.

