



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



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. 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: 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.І. Курс фізики. – М.: Высш. шк., 1990.

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

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

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

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

8. Відповідно до виразу (19) визначте значення γ_i для кожного досліду. Запишіть ці значення у таблицю 1.
9. 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.

10. 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 Δh – інструментальна похибка шкали манометра.

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

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

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 адиабатичного 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

Лабораторна робота 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ В РІДИНАХ..... 48

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

Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ МЕТОДОМ АДІАБАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ..... 60

1. МЕТА РОБОТИ.....	60
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	60
2.1. Ідеальний газ.....	60
2.2. Адиабатний 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

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-

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.

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**

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 флуктуючим 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 вірізняються 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

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 короткочасних абсолютно пружних зіткнень; **3)** молекули ідеального газу вважаються матеріальними точками, а їх об'єм нехтується порівняно з об'ємом посудини.

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

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

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

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.

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

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.

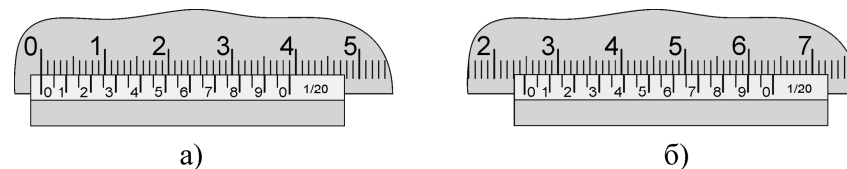


Рисунок 2 – Шкала ноніуса у нульовому (а) та ненульовому (б) положеннях

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-

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 ρ та рідини ρ_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.

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.

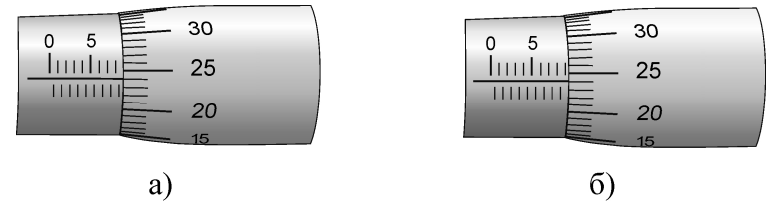


Рисунок 4 – Щодо зчитування результатів вимірювання зі шкали мікрометра

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.

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 η , 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 ~ 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 проградуїзовану шкалу, як показано на рисунку 4. Підставка з кулькою позиціонується так, щоб перехрестя збігалось 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).

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

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 Δm 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 Δm_C , ΔD , Δh – 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 Δm_P , Δa , Δb , Δc – 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-

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

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.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№	a , мм (D , мм)	Δa , мм (ΔD , мм)	b , мм (h , мм)	Δb , мм (Δh , мм)	c , мм	Δc , мм
1						
2						
3						
4						
5						

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

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

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

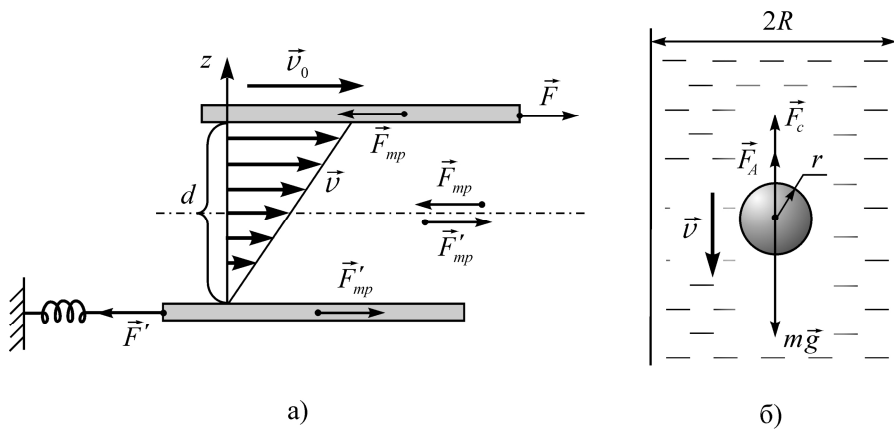


Рисунок 2 – До пояснення механізму виникнення в'язкого тертя (а); схематичне зображення руху кульки у в'язкій рідині (б)

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 приконттактних 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

Лабораторна робота 2

ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

1. МЕТА РОБОТИ

Експериментально перевірити справедливості 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

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 кожну 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.

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_0 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

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.

Припустимо, що масу вантажу m_2 штучно збільшили на величину $\Delta m = F_{mp}/g$. Потенціальна енергія Δm 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 $I = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot r^2$. Згідно з відомостями з кінематики рівноприскореного руху $H = \frac{1}{2} \cdot a t^2$, $v = at$. Оскільки маса додаткового вантажу Δm мала порівняно з m_1 та m_2 , її величиною у подальших розрахунках можна знехтувати. В кінцевому підсумку рівність (10) набуває вигляду

$$\frac{1}{2} \cdot (m_2 - m_1) g a t^2 = \frac{1}{2} \cdot (m_1 + m_2) a^2 t^2 + \frac{1}{4} \cdot m_0 r^2 a^2 t^2 / r^2. \quad (11)$$

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

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

$$M_e = 2m + m_n + \frac{1}{2} \cdot m_0. \quad (13)$$

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

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

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

№	t, c	m_{n1}, Γ	H, m	№	t, c	m_{n2}, Γ	H, m
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.

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 рухомим 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,

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} ?

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

$$\xi_1 = \xi_0 \cos(\omega t - kx + \alpha_1),$$

$$\xi_2 = \xi_0 \cos(\omega t + kx + \alpha_2).$$

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

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. **Поперечною** називається хвиля, в якій елементи середовища коливаються у напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення

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

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

де ρ – густина газу; p – його тиск; γ – 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