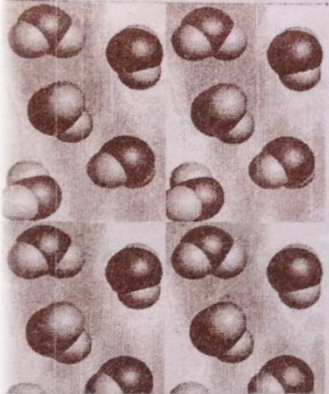


Механіка



Молекулярна фізика



Електрика

# ФІЗИКА

Механіка.  
Молекулярна фізика  
та термодинаміка. Електрика

*Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт*

Ужгородський національний університет  
Інженерно-технічний факультет  
2008



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

# ФІЗИКА

Механіка.  
Молекулярна фізика та термодинаміка.  
Електрика

*Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт*

УЖГОРОД-2008



Турянця І.І., Козусенок О.В., Жогова О.І. Фізика: Механіка. Молекулярна фізика та термодинаміка. Електрика. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2008. – 68 с.

**Укладачі:** Турянця Іван Іванович, кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри приладобудування Ужгородського національного університету, декан інженерно-технічного факультету

Козусенок Олександр Веніамінович, старший викладач кафедри приладобудування Ужгородського національного університету

Жогова Ольга Іванівна, викладач кафедри приладобудування Ужгородського національного університету

**Рецензенти:** Різак Василь Михайлович, доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри твердотільної електроніки Ужгородського національного університету

Жихарєв Володимир Миколайович, кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики напівпровідників Ужгородського національного університету

**Відповідальний за випуск:** Турянця Іван Іванович, кандидат фіз.-мат. наук, завідувач кафедри приладобудування Ужгородського національного університету

Затверджено до видання на засіданні кафедри приладобудування протокол №3 від 28 листопада 2007 р.  
та на засіданні методичної комісії інженерно-технічного факультету протокол № 10 від 4 грудня 2007 р.

## ЗМІСТ

	стор.
Вступ .....	4
1. Визначення прискорення сили ваги за допомогою фізичного маятника .....	5
2. Вивчення законів прямолінійного руху на машині Атвуда.....	9
3. Вивчення обертового руху за допомогою маятника Обербека.....	16
4. Визначення моменту інерції тіла довільної форми та перевірка теореми Гюйгенса-Штейнера методом крутильних коливань.....	20
5. Визначення сталої Больцмана.....	26
6. Визначення середньої довжини вільного пробігу молекул повітря.....	29
7. Визначення відношення теплоємностей газу $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ методом Клемана-Дезорма.....	32
8. Визначення відношення теплоємностей газу $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ акустичним методом.....	37
9. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву краплі.....	42
10. Моделювання електростатичних полів з використанням розчину електроліту.....	48
11. Вимірювання опору за допомогою містка постійного струму.....	53
Додаток 1. Обробка експериментальних даних в лабораторному практикумі.....	57
Додаток 2. Таблиці деяких фізичних величин .....	66
Список рекомендованої літератури .....	68



## ВСТУП

Фізика – одна з найважливіших стратегічних галузей сучасного природознавства – вивчає об'єктивні властивості матеріального світу, спираючись насамперед на експеримент. Експеримент, поряд зі спостереженням і узагальненням, є одним із основних методів наукового пізнання, роль якого як критерію істинності наукової гіпотези вирішальна.

Фізичний практикум, де студенти самостійно виконують дослід, не тільки допомагає засвоїти теоретичні знання, але й розвиває вміння їх практичного застосування, навички роботи з вимірювальними приладами, ознайомлює з методикою вимірювання фізичних величин і методами обробки отриманих результатів.

Запропонований методичний посібник написаний на основі відомих лабораторних практикумів з урахуванням навчальних програм підготовки інженерів у вищих навчальних закладах.

У посібнику, крім методичних вказівок до виконання робіт, приведено методику обробки експериментальних даних в лабораторному практикумі, довідкові таблиці та список рекомендованої літератури. До кожної роботи приведено теоретичні відомості, опис установки в цілому і окремих приладів, порядок виконання роботи та обробки результатів вимірювань, питання для самоконтролю. Особливу увагу приділено фізичній суті досліджуваних явищ та змісту параметрів, якими вони описуються. Опис лабораторних установок та завдання до лабораторних робіт розроблені укладачами з урахуванням умов лабораторного практикуму інженерно-технічного факультету Ужгородського національного університету. Роботи здебільшого носять науково-дослідний характер, передбачають можливість розширення завдань з використанням комп'ютерних технологій.

Посібник рекомендований для студентів інженерно-технічного факультету Ужгородського національного університету.

## Лабораторна робота №1

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ВАГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

**МЕТА РОБОТИ:** освоїти методику експериментального визначення прискорення сили тяжіння за допомогою фізичного маятника.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** фізичний маятник, секундомір, лінійка.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Закон всесвітнього тяжіння Ньютона.
2. Закони Кеплера.
3. Сила й маса в механіці.
4. Рух в полі сили тяжіння.
5. Методи визначення прискорення сили тяжіння.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

*Фізичним маятником* називають будь яке тіло, що здійснює коливальний рух навколо осі, яка не проходить через його центр мас (рис.1.1). Період коливань ( $T$ ) такого маятника залежить від моменту інерції ( $I$ ); маси ( $m$ ); віддалі від центру мас до точки підвісу ( $d$ ) (відповідно до рис. 1.1 ця віддаль рівна довжині відрізка  $OC$ ) і визначається за наступною формулою:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{mgd}}, \quad (1.1)$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Таким чином, вимірявши період коливань, та визначивши величини, які входять в цей вираз, можна обчислити значення прискорення сили земного тяжіння.

В даній лабораторній роботі для визначення  $g$  використовують оборотний маятник, зображений на рис. 1.2. Конструктивно він являє собою металевий стержень на якому нерухомо закріплено опорні призми 1 і 2. Вздовж стержня можуть переміщуватись і закріплюватись в тому чи іншому місці тягарці 3, 4 та 5 (сочевинці). Переміщенням сочевинць вздовж стержня змінюється положення центра ваги, що дозволяє змінювати період коливань маятника. Використання оборотного маятника дає можливість виключити визначення величин, які входять в (1.1). Для цього визначають періоди коливань на призмах 1 та 2 які, відповідно, рівні  $T_1$  та  $T_2$ :

$$T_1=2\pi\sqrt{\frac{I_1}{mgd_1}}, \quad T_2=2\pi\sqrt{\frac{I_2}{mgd_2}} \quad (1.2)$$



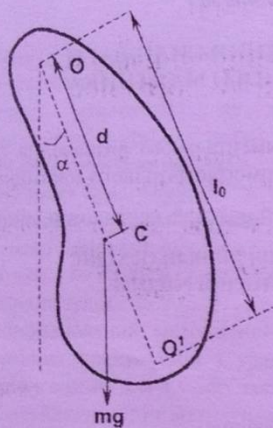


Рис.1.1

Моменти інерції можуть бути знайдені за теоремою Гюйгенса-Штейнера (обертання відбувається навколо осі, що не проходить через центр ваги):

$$I_1 = I_0 + md_1^2; \quad I_2 = I_0 + md_2^2, \quad (1.3)$$

де  $I_0$  – момент інерції маятника відносно осі, яка проходить через центр ваги і паралельна осі обертання. Підставивши (1.3) в систему рівнянь (1.2) та піднісши до квадрату праві та ліві частини рівнянь системи одержимо:

$$\begin{cases} \frac{1}{4\pi^2} mgT_1^2 d_1 = I_0 + md_1^2, \\ \frac{1}{4\pi^2} mgT_2^2 d_2 = I_0 + md_2^2. \end{cases} \quad (1.4)$$

Віднявши від першого рівняння друге, маємо:

$$g(T_1^2 d_1 - T_2^2 d_2) = 4\pi^2 (d_1^2 - d_2^2).$$

Звідси шукана величина прискорення сили ваги:

$$g = 4\pi^2 \frac{d_1^2 - d_2^2}{T_1^2 d_1 - T_2^2 d_2}. \quad (1.5)$$

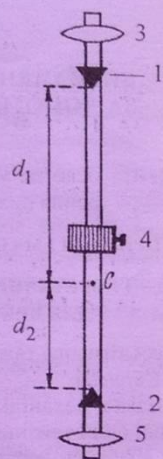


Рис.1.2

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з конструкцією оборотного маятника.
2. Переміщуючи сочевиці, встановити, яка з них найбільш суттєво впливає на період коливань. Для цього визначити період 10÷15 коливань на одній з призм. Кут відхилення маятника від положення рівноваги не повинен перевищувати 7°.
3. Переміщуючи сочевицю, яка найбільше впливає на різницю  $|T_1 - T_2|$ , добитися максимального співпадання періодів з точністю 0,3-0,5 %.
4. Визначити положення центра ваги. Виміряти віддалі  $d_1$  та  $d_2$  (вони мають відрізнятись не менше як 1,5 – 2 рази).
5. Остаточне вимірювання величин  $T_1$  і  $T_2$  виконати для 100 повних коливань маятника. Для цього виміряйте  $m=5$  разів час  $n=20$  коливань на кожній з опорних призм. Виміряти  $d_1$  і  $d_2$  з точністю до 1 мм.
6. Результати вимірювань занести у відповідні графи таблиці 1.1.

### ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Обчислити середні значення періодів на кожній призмі за формулами:

$$\bar{T}_1 = \frac{t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14} + t_{15}}{5 \cdot 20}; \quad \bar{T}_2 = \frac{t_{21} + t_{22} + t_{23} + t_{24} + t_{25}}{5 \cdot 20}.$$

2. Обчислити середні значення часу коливань на кожній призмі:

$$\bar{t}_1 = \frac{t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14} + t_{15}}{5}; \quad \bar{t}_2 = \frac{t_{21} + t_{22} + t_{23} + t_{24} + t_{25}}{5}.$$

3. Обчислити похибки вимірювання часу  $\Delta t_{1m} = |\bar{t}_1 - t_{1m}|$ ;  $\Delta t_{2m} = |\bar{t}_2 - t_{2m}|$ .
4. Визначите середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$S(\bar{\Delta t}) = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^5 (\Delta t_{1m})^2 + \sum_{m=1}^5 (\Delta t_{2m})^2}{10 \cdot 9}}.$$

5. Знайти випадкову похибку вимірювання часу –  $\Delta \bar{t} = 2,3 \cdot S(\bar{\Delta t})$ , де число 2,3 є значенням коефіцієнта Стюдента при 10 вимірюваннях та надійності  $P=0,95$ . Якщо ці величини відрізняються, то коефіцієнт знаходиться за відповідними таблицями.

6. Похибку обчислення періоду знайти за формулою  $\Delta \bar{T} = \frac{\Delta \bar{t}}{20}$ .
7. Прискорення сили ваги обчислити за формулою (1.5).

8. Обчислити відносну похибку вимірювань:  $\xi = \left( \frac{\Delta g}{g} \right) = 2 \frac{\Delta d}{d_1 + d_2} + 2 \frac{\Delta T}{T}$ , де

$\bar{T} = \frac{\bar{T}_1 + \bar{T}_2}{2}$  та абсолютне значення  $\Delta g = \xi \cdot g$ . При розрахунках прийняти, що  $\Delta d = 0,001$  м.



- Результати обчислень занести у відповідні графи таблиці 1.2.
- Записати кінцевий результат у вигляді:  $g = (\overline{g} \pm \Delta g) \left[ \frac{м}{с^2} \right]$ .
- Порівняти одержаний результат з табличним та зробити висновки.

#### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

- Вивести робочу формулу для визначення прискорення сили тяжіння за допомогою фізичного маятника.
- Вивести робочу формулу для визначення похибки прискорення сили тяжіння.
- Пояснити, чому прискорення сили тяжіння має різні значення в різних точках земної кулі? Як воно залежить від висоти над поверхнею Землі?
- Дати визначення ваги тіла. Поясніть відмінність (подібність) у поняттях гравітаційної та інертної маси.
- Використовуючи формулу (1.1), одержати вираз для періоду коливань математичного маятника.

#### Звітні таблиці

Таблиця 1.1

Дані вимірювань									
№ п/п	$t_1$	$t_2$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$S(\Delta \bar{t})$	$\Delta \bar{t}$	$d_1$	$d_2$	$\Delta d$
	с	с	с	с	с	с	м	м	м
1									
2									
3									
4									
5									
C*									0,001

Таблиця 1.2

Результати обчислень								
$T_1$	$T_2$	$\bar{T}$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta \bar{T}$	$g$	$\Delta g$	$\frac{\Delta g}{g} \cdot 100\%$
с	с	с	с	с	с	м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>	%

\* Тут і далі символом «С» позначені середні значення величин

#### Лабораторна робота №2

### ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ НА МАШИНІ АТВУДА

**МЕТА РОБОТИ:** експериментальна перевірка законів рівноприскореного руху і другого закону Ньютона.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** машина Атвуда електрифікована, електронний секундомір.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНЕ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

- Елементарне переміщення матеріальної точки. Шлях. Миттєва та середня швидкості. Прискорення: нормальне, тангенціальне, повне.
- Закони рівнозмінного руху.
- Закон динаміки Ньютона.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

Машина Атвуда дає змогу одержати рівномірний та рівномірно прискорений рух, а також виміряти проміжки часу, протягом яких тягарці проходять задані відстані при рівномірному та рівноприскореному рухах.

Машина Атвуда (рис.2.1) складається з вертикального стояка 2, на якому нанесені сантиметрові поділки. На верхньому кінці стояка закріплено легкий блок, що обертається з досить малим тертям, навколо горизонтальної осі. Через блок перекинута тонка нитка, до кінців якої прикріплено вантажі 3 з однаковими відомими масами  $m$ . Вантажі можуть спиратись на підставки 4, які можна переміщувати вздовж стояка. Для фіксації обох вантажів у певному положенні і для звільнення їх в нижньому положенні на стояку закріплено електромагніт 5. Підставки 4 суцільні, а підставка 1 має отвір, крізь який вільно проходить вантаж. Крім вантажів 3 в комплекті установки є додаткові тягарці 6 і 7, які використовують для приведення системи в рівноприскорений рух.

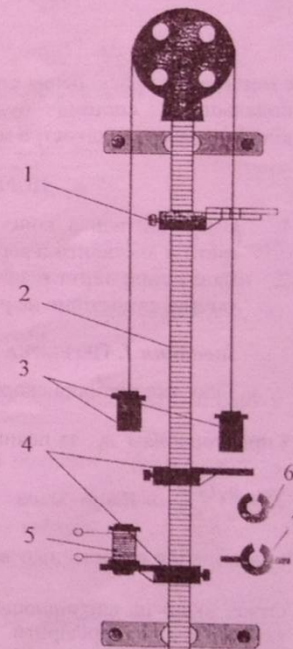


Рис.2.1



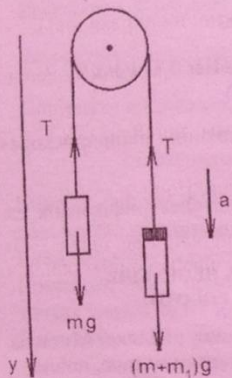


Рис.2.2

З останнього, в результаті розв'язку, слідує, що прискорення:

$$a = g \frac{m_1}{2m + m_1} \quad (2.3)$$

є меншим за прискорення сили тяжіння. Якщо додатковий вантаж зняти, то в подальшому система буде рухатись з постійною швидкістю, яка відповідатиме швидкості в момент зняття вантажу.

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з конструкцією машини Атвуда. За допомогою трьох гвинтів виставити її вертикально.
2. Якщо сили тертя є значними, то їх слід компенсувати. Перевірте, щоб тягарці самостійно не рухались при однакових масах.

**Завдання 1.** ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ШЛЯХУ  $S = \frac{at^2}{2}$ .

Тіло, яке рівноприскорено рухається з нульовою початковою швидкістю і прискоренням  $a_1$ , за певний час  $t_1$  пройде шлях  $S_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}$ . Аналогічно –

$S_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2}$ . Якщо маси вантажів є постійними, то, як слідує з (2.3),

прискорення є постійною величиною, тобто  $a_1 = a_2$  і, відповідно,  $\frac{2S_1}{t_1^2} = \frac{2S_2}{t_2^2}$ .

Отже, якщо це співвідношення виконується, то виконується і закон шляху, який необхідно перевірити.

Для перевірки потрібно виконати наступне.

1. Правий тягарець з поставленим на ньому додатковим важком розмістити біля нульової поділки шкали. Приймальний столик розмістити на відстані  $S_1 = 0,80$  м від нульової поділки шкали. Виміряти час  $t_1$  руху тягарця до суцільної платформи. Вимірювання повторити 10 разів.
2. Змінити віддаль до приймального столика, встановивши  $S_2 = 0,50$  м. Виміряти час  $t_2$  руху тягарця. Вимірювання повторити 10 разів.
3. Результати вимірювань занести у табл. 2.1.

#### ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Обчислити середні значення часів руху вантажів:  $t_1 = \frac{\sum_{m=1}^{10} t_{1m}}{10}$  і  $t_2 = \frac{\sum_{m=1}^{10} t_{2m}}{10}$  та середні значення прискорень  $a_1 = \frac{2S_1}{t_1^2}$  і  $a_2 = \frac{2S_2}{t_2^2}$ .
2. Обчислити похибки вимірювання часу  $\Delta t_{1m} = |t_1 - t_{1m}|$ ;  $\Delta t_{2m} = |t_2 - t_{2m}|$ .
3. Визначити середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$S_1(\overline{\Delta t_1}) = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{10} (\Delta t_{1m})^2}{10 \cdot 9}} \quad \text{і} \quad S_2(\overline{\Delta t_2}) = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{10} (\Delta t_{2m})^2}{10 \cdot 9}}$$

4. Знайти випадкові похибки вимірювання часу –  $\overline{\Delta t_1} = 2,3 \cdot S_1(\overline{\Delta t_1})$  та  $\overline{\Delta t_2} = 2,3 \cdot S_2(\overline{\Delta t_2})$ , де число 2,3 є значенням коефіцієнта Стьюдента при 10 вимірюваннях та надійності  $P = 0,95$ . Якщо число вимірювань інше, то коефіцієнт знаходиться за відповідними таблицями.

5. За формулою  $\xi = \frac{\Delta a}{a} = \sqrt{\left(\frac{2\overline{\Delta t}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\overline{\Delta S}}{S}\right)^2}$  знайти відносну похибку

обчислення прискорення і абсолютне значення похибки –  $\Delta a = \xi \cdot a$  (для обох вимірювань). При обчисленнях прийняти, що  $\overline{\Delta S} = 0,005$  м.

6. Результати обчислень занести у відповідні графи таблиці.

7. Записати кінцевий результат обчислень у вигляді:

$$a_1 = \overline{a_1} \pm \Delta a_1; \quad a_2 = \overline{a_2} \pm \Delta a_2$$

8. Порівняти отримані результати між собою та зробити висновок про виконання закону шляху та ступінь точності.



**Завдання 2.** ПЕРЕВІРКА ФОРМУЛИ ШВИДКОСТІ:  $v=at$ .

1. Правий тягарець з поставленим на ньому додатковим важком (круглої форми) встановити біля нульової поділки шкали.
2. На відстані 30-40 см від тягарця встановити кільцеву платформу, нижче за нею – приймальний столик.
3. Відпустити вантаж і одночасно увімкнути секундомір. Виміряти час руху  $t_1$  до зняття важка (система рухається рівноприскорено). Після зняття важка другим секундоміром вимірюють час рівномірного руху –  $t'_1$  (час руху між платформами 1 і 4).
4. Повторити дослід 10 разів, кожний раз повертаючи правий тягарець у початкове положення.
5. Виміряти відстані  $S_1$  (прискорений рух) та  $S'_1$  (рівномірний рух).
6. Змінити відстань між початковим положенням тягарця та кільцевою платформою.
7. Повторити вимірювання згідно пп. 3-5 і знову визначити  $t_2, t'_2, S_2$  і  $S'_2$ .
8. Результати вимірювань занести у таблицю 2.2.1.

#### ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Вирахувати середні значення  $\bar{t}_1, \bar{t}'_1, \bar{t}_2, \bar{t}'_2$  та похибки результатів вимірювання  $\Delta t_1, \Delta t'_1, \Delta t_2, \Delta t'_2$  за аналогічними формулами завдання 1 (пп. 1-4).
2. За формулою  $a = \frac{v}{t} = \frac{S'}{t \cdot t'}$  для обох випадків ( $t_1, t'_1, S_1$  та  $t_2, t'_2, S_2$ ) знайти середні значення прискорення  $\bar{a}_1$  і  $\bar{a}_2$ .
3. Вирахувати відносні  $\xi = \sqrt{\left(\frac{\Delta S'}{S'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t'}{t'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}$  та абсолютні похибки вимірювання прискорень  $\Delta a = \xi \cdot a$  (при обчисленнях прийняти, що  $\Delta S = 0,005$  м).
4. Результати обчислень занести у відповідні графі таблиць 2.2.1 та 2.2.2.
5. Записати кінцевий результат обчислень у вигляді:  
 $a_1 = \bar{a}_1 \pm \Delta a_1; a_2 = \bar{a}_2 \pm \Delta a_2$ .
6. Враховуючи незмінність маси системи тягарців і діючої на неї сили, з другого закону Ньютона слідує, що прискорення тягарців було однаковим при різних положеннях кільцевої платформи. На підставі одержаних результатів зробити висновок про вірність формули швидкості та точність її виконання.

**Завдання 3.** ПЕРЕВІРКА ДРУГОГО ЗАКОНУ НЬЮТОНА  $F=Ma$ .

Якщо у рівнянні (2.3) загальну масу вантажів  $2m+m_1$  позначити через  $M$ , то його можна записати наступним чином  $F=Ma$ , де  $F=m_1g$  – результуюча сила, прикладена до системи, яка рівна вазі додаткового важка, покладеного на тягарець.

Нехай на лівий тягарець покладено додатковий важок  $m_L$ , а на правий –  $m_R$ , причому  $m_R > m_L$ . Загальна маса системи тоді  $M=2m+m_R+m_L$ , а результуюча сила, прикладена до системи  $F_1=g(m_R-m_L)$ . Прискорення, з яким буде рухатись система:

$$a_1 = \frac{F_1}{M} = \frac{g(m_R - m_L)}{2m + m_R + m_L}. \quad (2.4)$$

Якщо перемістити додатковий лівий важок на правий вантаж, то результуюча маса системи не зміниться, але результуюча сила, яка діє на систему буде рівна  $F_2=g(m_R+m_L)$ .

Прискорення з яким будуть рухатись тягарці буде рівне:

$$a_2 = \frac{F_2}{M} = \frac{g(m_R + m_L)}{2m + m_R + m_L}. \quad (2.5)$$

Розділивши почленно рівність (2.4) на рівність (2.5), отримаємо:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_R - m_L}{m_R + m_L}. \quad (2.6)$$

Прискорення, з якими рухається система можуть бути знайдені з рівняння руху  $S = \frac{at^2}{2}$ . Якщо вантажі проходять однакові шляхи тоді  $a_1 = \frac{2S}{t_1^2}$ ,

$a_2 = \frac{2S}{t_2^2}$ , а рівність (2.6) приймає вигляд:

$$\frac{t_2^2}{t_1^2} = \frac{m_R - m_L}{m_R + m_L}. \quad (2.7)$$

Виконання цієї рівності свідчить про виконання другого закону Ньютона.

1. Встановити приймальний столик на відстані 70-80 см від правого тягарця.
2. На правий тягарець покласти додатковий важок масою  $m_R$ , на лівий –  $m_L$ .
3. Як і в попередніх завданнях виміряти час проходження тягарцем відомої відстані  $S$ . Вимірювання часу  $t_1$  повторити 10 разів.
4. Помістити обидва додаткові важки на правий тягарець і визначити час  $t_2$  проходження системою шляху  $S$ . Вимірювання часу  $t_2$  повторити 10 разів.
5. Результати вимірювань записати у відповідні графі таблиці 2.3.1.



### ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Вирахувати середні значення  $\bar{t}_1, \bar{t}_2$  та похибки результатів вимірювання  $\Delta t_1, \Delta t_2$  за аналогічними формулами завдання 1 (пп. 1-4).

2. Обчислити відношення  $\frac{m_R - m_L}{m_R + m_L} = R$  (права частина рівняння 2.7) та відносну

$$\xi_R = \frac{\Delta R}{R} = 2 \cdot \Delta m_D \cdot \frac{2(m_R^2 + m_L^2)}{(m_R^2 - m_L^2)^2} \text{ і абсолютну } \Delta R = \xi_R \cdot R \text{ похибки}$$

цього відношення. У цьому співвідношенні прийнято, що  $\Delta m_R = \Delta m_L = \Delta m_D$ .

3. Обчислити відношення  $\frac{\bar{t}_2^2}{\bar{t}_1^2} = L$  (ліва частина рівняння 2.7) та відносну

$$\xi_L = \frac{\Delta L}{L} = \left( \frac{2 \cdot \Delta t_1}{\bar{t}_1} \right)^2 + \left( \frac{2 \cdot \Delta t_2}{\bar{t}_2} \right)^2 \text{ і абсолютну } \Delta L = \xi_L \cdot L \text{ похибки.}$$

4. Результати записати у відповідні графі таблиць 2.3.1 та 2.3.2.

5. Записати кінцевий результат у вигляді  $R = \bar{R} \pm \Delta R$ ;  $L = \bar{L} \pm \Delta L$  та встановити ступінь рівності правої та лівої частин рівняння (2.7). Зробити відповідний висновок.

### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

1. Пояснити зміст основних кінематичних понять.
2. Нормальне, тангенціальне та повне прискорення матеріальної точки.
3. Як впливає на точність вимірювання врахування обертового руху блока?
4. Сформулювати закони Ньютона.

### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ШЛЯХУ  $S = \frac{at^2}{2}$ .

Таблиця 2.1

Дані вимірювань та результати обчислень													
№ п/п	$t_1$	$\Delta t_1$	$S_1$	$t_2$	$\Delta t_2$	$S_2$	$\Delta S$	$\bar{a}_1$	$\Delta \bar{a}_1$	$\frac{\Delta \bar{a}_1}{\bar{a}_1}$	$\bar{a}_2$	$\Delta \bar{a}_2$	$\frac{\Delta \bar{a}_2}{\bar{a}_2}$
	с	с	м	с	с	м	м	м	м	с <sup>2</sup>	м	м	с <sup>2</sup>
1			—			—	—	—	—	—	—	—	—
2			—			—	—	—	—	—	—	—	—
...			—			—	—	—	—	—	—	—	—
10			—			—	—	—	—	—	—	—	—
С													

### ПЕРЕВІРКА ФОРМУЛИ ШВИДКОСТІ: $v=at$ .

Таблиця 2.2.1

Дані вимірювань													
№ п/п	$t_1$	$\Delta t_1$	$S_1$	$t'_1$	$\Delta t'_1$	$S'_1$	$t_2$	$\Delta t_2$	$S_2$	$t'_2$	$\Delta t'_2$	$S'_2$	$\Delta S$
	с	с	м	с	с	м	с	с	м	с	с	м	м
1			—			—			—			—	—
2			—			—			—			—	—
...			—			—			—			—	—
10			—			—			—			—	—
С													

Таблиця 2.2.2

Результати обчислень					
$\bar{a}_1$	$\Delta \bar{a}_1$	$\frac{\Delta \bar{a}_1}{\bar{a}_1}$	$\bar{a}_2$	$\Delta \bar{a}_2$	$\frac{\Delta \bar{a}_2}{\bar{a}_2}$
м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>		м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>	

### ПЕРЕВІРКА ДРУГОГО ЗАКОНУ НЬЮТОНА $F=Ma$ .

Таблиця 2.3.1

№ п/п	$t_1$	$\Delta t_1$	$t_2$	$\Delta t_2$	$\bar{m}_L$	$\bar{m}_R$	$\Delta m_D$
	с	с	с	с	кг	кг	кг
1					—	—	—
2					—	—	—
...					—	—	—
10					—	—	—
С							

Таблиця 2.3.2

Результати обчислень					
$\bar{L} = \frac{\bar{t}_2^2}{\bar{t}_1^2}$	$\bar{R} = \frac{m_R - m_L}{m_R + m_L}$	$\varepsilon_L$	$\Delta L$	$\varepsilon_R$	$\Delta R$



**ВИВЧЕННЯ ОБЕРТОВОГО РУХУ  
ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА**

**МЕТА РОБОТИ:** експериментальна перевірка рівняння динаміки обертового руху.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** маятник Обербека, два-три тягарці різної маси, штангенциркуль, секундомір, лінійка з міліметровими поділками.

**ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

1. Рух тіла по колу. Вектори лінійної і кутової швидкостей, лінійного і кутового прискорень.
2. Розклад вектора повного прискорення на тангенціальне і нормальне прискорення.
3. Момент інерції матеріальної точки. Момент інерції тіла відносно осі обертання.
4. Рух тіла закріпленого, на осі. Рівняння моментів.

**ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ**

Маятник Обербека (рис. 3.1) складається з чотирьох спиць 1 і двох співвісних шківів різного радіуса 2 і 3. Вісь маятника закріплена в стіні на висоті близько 1,5 м від підлоги. Вздовж кожної спиці можуть переміщатись регулюючі циліндрики 4 однакової маси. Гвинтами їх можна закріпити в будь-якому положенні.

В залежності від потреби на той чи інший шків намотується тонка нитка 5. Якщо до її кінця прикріпити вантаж 6 і надати йому можливість падати, він приведе в обертальний рух маятник Обербека. Обертальний рух маятника зумовлений моментом сили прикладеної до шківів. До шківів прикладена сила натягу нитки –  $T$ . Рівняння обертового руху:

$$M = J\varepsilon, \quad (3.1)$$

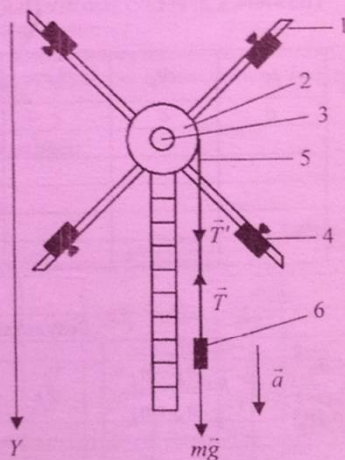


Рис.3.1

де  $M$  – момент сили, який діє на маятник,  $J$  – момент інерції маятника відносно осі обертання,  $\varepsilon$  – кутове прискорення. Якщо знехтувати тертям у вісі маятника, то момент сили:

$$M = R \cdot T, \quad (3.2)$$

де  $R$  – радіус шківів.

Силу натягу нитки можна знайти з рівняння поступального руху тягарця. На падаючий тягарець діють дві сили: сила тяжіння  $P = mg$  і сила натягу нитки  $T$ . Рівняння руху тягарця в проекції на вертикальну вісь  $OY$ :

$$P - T = ma, \quad (3.3)$$

де  $a$  – прискорення поступального руху тягарця. Звідси:

$$T = m(g - a). \quad (3.4)$$

Лінійне прискорення можна знайти, якщо виміряти час  $t$  падіння тягарця з висоти  $h$ :

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (3.5)$$

Тоді момент сили за (3.2) з врахуванням (3.4) і (3.5)

$$M = R \cdot m \left( g - \frac{2h}{t^2} \right). \quad (3.6)$$

Кутове прискорення можна знайти, використовуючи формулу зв'язку його з лінійним прискоренням  $a = \varepsilon \cdot R$ . Звідси, з врахуванням (3.5), одержуємо:

$$\varepsilon = \frac{a}{R} = \frac{2h}{R \cdot t^2}. \quad (3.7)$$

**ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

В цій роботі перевіряється рівняння динаміки обертового руху при постійному моменті інерції.

Для двох різних моментів сил (маса тягарця  $m$ , а радіуси шківів, на які намотується нитка  $R_1$  і  $R_2$ ) з (3.1) маємо

$$\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = J. \quad (3.8)$$

З рівностей (3.6) і (3.7)

$$\frac{R_1^2 \cdot m \cdot \left( g t_1^2 - 2h \right)}{2h} = \frac{R_2^2 \cdot m \cdot \left( g t_2^2 - 2h \right)}{2h}, \quad (3.9)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  – час падіння тягарця масою  $m$  з висоти  $h$ . Рівність (3.9) підлягає перевірці.

Для перевірки потрібно виконати наступне.

1. Штангенциркулем виміряти радіуси обох шківів  $R_1$  і  $R_2$ . Вимірювання провести не менше 5 разів в різних місцях шківів.



- Метровою лінійкою з точністю до 0,01 м виміряти висоту падіння тягарця  $h$  (висота падіння  $h$  під час дослідів залишається постійною).
- З точністю до 0,001 кг визначити масу тягарця.
- На шків меншого радіуса  $R_1$  намотати нитку з підвішеним тягарцем. Відпустити його і одночасно ввімкнути секундомір. Коли тягарець торкнеться підлоги, секундомір вимкнути. Таким чином вимірюється час  $t_1$  падіння тягарця з висоти  $h$ . Вимірювання часу  $t_1$  повторити 10 разів.
- Виконати аналогічні вимірювання, намотавши нитку на шків більшого радіуса  $R_2$ . Вимірювання часу  $t_2$  повторити 10 разів.
- Результати вимірювань занести у відповідні графі таблиці 3.1.

#### ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

- Обчислити середні значення радіусів обох шківів за формулами:

$$\bar{R}_i = \frac{\sum_{m=1}^5 R_{im}}{5}, \text{ де } (i=1; 2) \text{ та відповідні похибки } \Delta R_i = 2,3 \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^5 (R_{im} - \bar{R}_i)^2}{4 \cdot 5}}$$

- Обчислити середні значення часів опускання тягарця за формулами:

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{m=1}^{10} t_{1m}}{10}; \quad \bar{t}_2 = \frac{\sum_{m=1}^{10} t_{2m}}{10} \text{ та відповідні похибки } \Delta t_i = 2,3 \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{10} (t_{im} - \bar{t}_i)^2}{9 \cdot 10}}$$

(тут 2,3 коефіцієнт Стьюдента для числа вимірювань 10 та коефіцієнта надійності рівного 0,95).

- Обчислити середні значення моментів сил та кутового прискорення для кожного досліді за формулами:

$$\bar{M}_i = mR_i \left( g - \frac{2h}{\bar{t}_i^2} \right), \quad \varepsilon_i = \frac{2h}{R_i \bar{t}_i^2}$$

- Обчислити відносну та абсолютну похибки вимірювань:

$$\xi_{\varepsilon} = \left( \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) = \left( \frac{\Delta h}{h} \right)^2 + \left( \frac{\Delta R_i}{R_i} \right)^2 + \left( \frac{2(\Delta t)_i}{t_i} \right)^2; \quad \Delta \varepsilon_i = \xi_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_i;$$

$$\xi_M = \left( \frac{\Delta M_i}{M_i} \right) = \sqrt{\left( \frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left( \frac{\Delta R_i}{R_i} \right)^2 + \left( \frac{2 \bar{t}_i^2 \Delta h + 2 \bar{t}_i h \Delta t_i}{g \bar{t}_i^2 - 2h} \right)^2}; \quad \Delta M_i = \xi_M \cdot M_i$$

$$\xi_i = \frac{\Delta \left( \frac{M_i}{\varepsilon_i} \right)}{\left( \frac{M_i}{\varepsilon_i} \right)} = \sqrt{\left( \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right)^2 + \left( \frac{\Delta M_i}{M_i} \right)^2}; \quad \Delta \left( \frac{M_i}{\varepsilon_i} \right) = \xi_i \left( \frac{M_i}{\varepsilon_i} \right)$$

- Результати обчислень занести у відповідні графі звітної таблиці 3.2.

- Перевірити виконання умови  $\left( \frac{M_1}{\varepsilon_1} \right) \pm \Delta \left( \frac{M_1}{\varepsilon_1} \right) = \left( \frac{M_2}{\varepsilon_2} \right) \pm \Delta \left( \frac{M_2}{\varepsilon_2} \right)$  та зробити висновки.

#### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

- Сформулювати та записати, що називається моментом сили, моментом інерції, моментом кількості руху матеріальної точки і тіла? Яка їх розмірність?
- Вивести рівняння динаміки обертового руху та формулу, за якою визначається кінетична енергія при обертальному русі.
- Вивести робочу формулу та формули, за якими визначаються похибки у цій роботі.
- Пояснити як визначається напрям векторів кутових швидкості, прискорення, моментів сили, кількості руху.
- Пояснити можливість перевірки рівняння динаміки обертового руху при постійному моменті сили.

#### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

Таблиця 3.1

Дані вимірювань												
№ п/п	$m$	$\Delta m$	$h$	$\Delta h$	$R_1$	$\Delta R_1$	$t_1$	$\Delta t_1$	$R_2$	$\Delta R_2$	$t_2$	$\Delta t_2$
	кг	кг	м	м	м	м	с	с	м	м	с	с
1	-	-	-	-								
2	-	-	-	-								
...	-	-	-	-								
10	-	-	-	-								
С												

Таблиця 3.2

Дані обчислень									
№ п/п	$M_i$	$\Delta M_i$	$\xi_M$	$\varepsilon_i$	$\Delta \varepsilon_i$	$\xi_{\varepsilon}$	$\frac{M_i}{\varepsilon_i}$	$\Delta \left( \frac{M_i}{\varepsilon_i} \right)$	$\xi_i$
	Н·м	Н·м		с <sup>-2</sup>	с <sup>-2</sup>		кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	
1									
2									



**ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ТІЛА ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ  
ТА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕМИ ГЮЙГЕНСА-ШТЕЙНЕРА  
МЕТОДОМ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ**

**МЕТА РОБОТИ:** вивчення одного з методів експериментального визначення моменту інерції.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** трифілярний підвіс, секундомір, штангенциркуль, набір тіл, моменти інерції яких потрібно визначити.

**ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНЕ  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

1. Рівняння динаміки обертового руху тіла навколо нерухомої осі. Момент інерції.
2. Момент кількості руху і його фізичний зміст.
3. Кінетична енергія обертового руху.
4. Моменти інерції тіл правильної геометричної форми.
5. Теорема Гюйгенса-Штейнера.

**ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ**

Моменти інерції тіл правильної геометричної форми можна обчислити за допомогою відповідних аналітичних співвідношень. Для тіл довільної форми що фізичну величину визначають експериментально. Одним з експериментальних методів є метод трифілярного підвісу.

Трифілярний підвіс являє собою плоску платформу *1* у вигляді круглого диска, підвішену на трьох симетрично розміщених по вершинах рівнобічного трикутника металевих нитках *2* (рис. 4.1). Радіус платформи  $R_0$ . Верхні кінці ниток прикріплені до диска меншого радіуса  $r_0$  *3*. Цей диск вмонтований в стіну за допомогою спеціального кронштейна.

Платформа може здійснювати крутильні коливання навколо вертикальної осі, яка перпендикулярна до її площини і проходить через її центр.

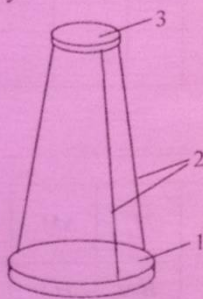


Рис.4.1

При крутильних коливаннях платформи її центр мас переміщується вертикально вздовж осі обертання, набуваючи найвищого положення ( $h_{max}$ ) при максимальному відхиленні платформи від положення рівноваги та найнижчого при проходженні через положення рівноваги (рис.4.2).

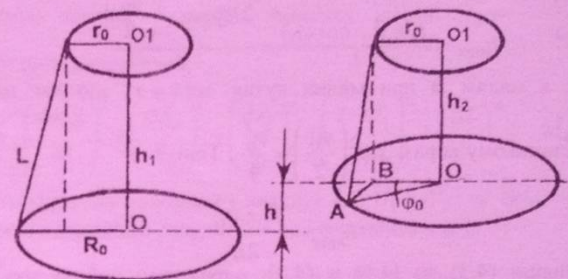


Рис.4.2

При відсутності зовнішніх сил, які діють на трифілярний підвіс, і малих кутах відхилення від положення рівноваги, платформа коливається за гармонічним законом:

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t) = \varphi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \quad (4.1)$$

де  $\varphi_0$  – максимальний кут відхилення;  $\omega$  – частота коливань;  $T$  – період коливань.

Нехтуючи роботою сил тертя, за законом збереження енергії маємо:

$$\frac{I_{\Pi} \omega_{max}^2}{2} = m_{\Pi} g h_{max}, \quad (4.2)$$

де  $I_{\Pi}$  і  $m_{\Pi}$  – момент інерції платформи відносно осі обертання і її маса;  $\omega_{max}$  – кутова швидкість при проходженні платформою положення рівноваги;  $g$  – прискорення сили ваги.

З закону коливання диска (4.1) максимальне значення кутової швидкості:

$$\omega_{max} = \frac{2\pi\varphi_0}{T}. \quad (4.3)$$

Висота  $h_{max}$ , на яку підніметься диск при повороті на кут  $\varphi_0$ ,

$$h_{max} = h_1 - h_2 = \frac{(h_1 - h_2) \cdot (h_1 + h_2)}{(h_1 + h_2)} = \frac{h_1^2 - h_2^2}{h_1 + h_2}. \quad (4.4)$$

З рис.4.2 видно, що

$$h_1^2 = L^2 - (R_0 - r_0)^2; \quad h_2^2 = L^2 - (AB)^2 = L^2 - (R_0^2 + r_0^2 - 2R_0r_0 \cos \varphi_0).$$

Можна вважати, що  $h_1 + h_2 \approx 2L$ , тоді, підставивши значення  $h_1^2$  і  $h_2^2$  в (4.3), матимемо:



$$h_{max} = \frac{R_0 r_0 (1 - \cos \varphi_0)}{L} = \frac{2R_0 r_0 \sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)}{L}$$

Кут  $\varphi_0$  є малим, а при малих кутах  $\sin x \approx x$ , що дає можливість

замінити в останньому виразі  $\sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \approx \frac{\varphi_0^2}{4}$ . Тоді

$$h_{max} = \frac{R_0 r_0 \varphi_0^2}{2L} \quad (4.5)$$

Підставивши (4.3) та (4.5) в (4.2), одержуємо робочу формулу для визначення моменту інерції методом крутильних коливань:

$$I_{II} = \frac{m_{II} g R_0 r_0 T^2}{4\pi^2 L} \quad (4.6)$$

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Виміряти радіус нижньої платформи  $R_0$ , радіус верхньої платформи  $r_0$ , маси платформи  $M$  та циліндра  $m$ , довжину нитки підвісу  $L$ . Визначити похибки цих вимірювань та заповнити відповідні графі таблиці 4.0.

#### Завдання 1. Визначення моменту інерції платформи

1. Обчислити теоретичне значення моменту інерції ненавантаженої платформи  $I_{II.T.} = \frac{m_{II} R_0^2}{2}$  та похибки його визначення:

$$\xi_{II.T.} = \frac{\overline{\Delta I_{II.T.}}}{I_{II.T.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m_{II}}{m}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta R_0}{R_0}\right)^2}; \quad \overline{\Delta I_{II.T.}} = \xi_{II.T.} \cdot I_{II.T.}$$

2. Виміряти  $m=5$  разів час 20 повних коливань ненавантаженої платформи.
3. Результати вимірювань занести у відповідні графі таблиці 4.1.
4. Обчислити середні значення: періоду коливань за формулою

$$\overline{T_1} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5 \cdot 20}; \quad \text{часу повних коливань } t_1 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5} \text{ та їх}$$

$$\text{похибки } \Delta t_1 = 2,8 \cdot \frac{\sum_{m=1}^5 (t_1 - t_m)^2}{4 \cdot 5} \quad (2,8 - \text{коєфіцієнт Стюдента для } 5$$

$$\text{вимірювань і надійності } 0,95), \quad \Delta T_1 = \frac{\Delta t_1}{20}$$

5. Обчислити середнє значення моменту інерції  $\overline{I_1} = \frac{m_{II} g R_0 r_0 \overline{T_1}^2}{4\pi^2 L}$  та похибки його визначення:

$$\xi_{II} = \frac{\Delta I_1}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m_{II}}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_0}{r_0}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta T_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2}; \quad \Delta I_1 = \xi_{II} \cdot I_1$$

6. Записати кінцевий результат у вигляді  $I_1 = (\overline{I_1} \pm \overline{\Delta I_1}) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .
7. Порівняти одержаний результат з розрахунком у п.1.

#### Завдання 2. Визначення моменту інерції циліндра

1. Обчислити теоретичне значення моменту інерції циліндра  $I_{II.T.} = \frac{m_{II} R_{II}^2}{2}$  та

$$\text{похибки: } \xi_{II.T.} = \frac{\overline{\Delta I_{II.T.}}}{I_{II.T.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m_{II}}{m}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta R_0}{R_0}\right)^2}; \quad \overline{\Delta I_{II.T.}} = \xi_{II.T.} \cdot I_{II.T.}$$

2. Виміряти  $m=5$  разів час 20 повних коливань навантаженої платформи з двома циліндрами розташованими по центру.
3. Виконати обчислення за пунктами 3, 4, 5 досліді №1. При обчисленнях у формули підставляти наступні значення: масу платформи  $m$  – замінити на  $M = m_{II} + 2 \cdot m_{II}$ ;  $\Delta m$  – на  $\Delta M = \Delta m_{II} + 2 \cdot \Delta m_{II}$  та відповідне значення періоду.
4. Записати кінцевий результат у вигляді  $I_2 = (\overline{I_2} \pm \overline{\Delta I_2}) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .
5. Знайти величину експериментального визначеного значення моменту інерції циліндра за формулою  $I_{II} = \frac{I_2 - I_1}{2}$ . Порівняти отриманий результат з розрахунком у п.1 цього досліді.

#### Завдання 3. ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕМИ ГЮЙГЕНСА-ШТЕЙНЕРА

1. Обчислити теоретичне значення моменту інерції циліндрів, які обертаються навколо осі, що не проходить через їх центр мас  $I'_{II.T.} = \frac{m_{II} R_{II}^2}{2} + m_{II} a^2$ , де  $a$  – відстань від осі обертання до осі, що проходить через центр мас циліндрів.

2. Обчислити абсолютну  $\overline{\Delta I'_{2II.T.}} = \Delta m_{II} \left( \frac{R_{II}^2}{2} + 2a^2 \right) + m_{II} (R_{II} \Delta R_{II} + 2a \Delta a)$ ; та

$$\text{відносну } \xi'_{2II.T.} = \frac{\overline{\Delta I'_{2II.T.}}}{I'_{2II.T.}} \text{ похибки.}$$



- Виміряти  $m=5$  разів час 20 повних коливань навантаженої платформи з двома циліндрами, розташованими на відстані  $a$  від центру платформи.
- Провести обчислення за пунктами 3, 4, 5 дослідів №1. При обчисленнях у формули підставляти наступні значення: замінити масу платформи  $m$  на  $M = m_{\text{п}} + 2 \cdot m_{\text{ц}}$ ;  $\Delta m$  - на  $\Delta M = \Delta m_{\text{п}} + 2 \cdot \Delta m_{\text{ц}}$  та відповідне значення періоду.
- Записати кінцевий результат у вигляді  $I_3 = (\bar{I}_3 \pm \Delta \bar{I}_3) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .
- Знайти величину експериментального визначеного значення моменту інерції циліндра за формулою  $I'_{\text{ц}} = \frac{I_3 - I_1}{2}$ . Порівняти одержаний результат з розрахованим у п.1 цього дослідів.
- Зробити загальний висновок щодо виконання теореми Гюйгенса-Штейнера.

#### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

- Сформулювати та довести теорему Штейнера-Гюгенса.
- Порівняти закони динаміки обертового руху з другим законом Ньютона: у чому полягає аналогія між ними?
- Вивести робочу формулу та формули, за якими визначаються похибки у цій роботі.
- Вивести формулу для моменту інерції циліндра. Записати чому рівний момент інерції різних тіл правильної геометричної форми.
- Записати чому рівна кінетична енергія тіла, яке приймає участь одночасно у поступальному та обертовому рухах.

#### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

Таблиця 4.0

$m_{\text{п}}$	$\Delta m_{\text{п}}$	$m_{\text{ц}}$	$\Delta m_{\text{ц}}$	$L$	$\Delta L$	$R_0$	$\Delta R_0$	$r_0$	$\Delta r_0$
кг	кг	м	м	м	м	м	м	м	м

#### ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ПЛАТФОРМИ

Геометрія дослідів:  
Невантажена платформа

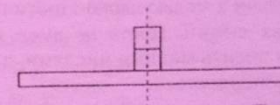


Таблиця 4.1

№ п/п	$t_1$	$\Delta t_1$	$\bar{T}_1$	$\Delta \bar{T}_1$	$\overline{I_{\text{п.т.}}}$	$\overline{\Delta I_{\text{п.т.}}}$	$\xi_{\text{п}}$	$\overline{I_{\text{п}}}$	$\overline{\Delta I_{\text{п}}}$	$\xi_{\text{п}}$
	с	с	с	с	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	—	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	—
1			—	—	—	—	—	—	—	—
2			—	—	—	—	—	—	—	—
...			—	—	—	—	—	—	—	—
С										

#### ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ЦИЛІНДРА

Геометрія дослідів:  
Навантажена платформа

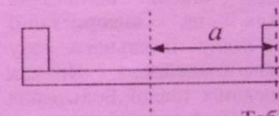


Таблиця 4.2

№ п/п	$t_2$	$\Delta t_2$	$\bar{T}_2$	$\Delta \bar{T}_2$	$I_{\text{цт}}$	$\Delta I_{\text{цт}}$	$\xi_{\text{цт}}$	$I_{\text{ц}}$	$\Delta I_{\text{ц}}$	$\xi_{\text{ц}}$
	с	с	с	с	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	—	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	—
1			—	—	—	—	—	—	—	—
2			—	—	—	—	—	—	—	—
...			—	—	—	—	—	—	—	—
С										

#### ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕМИ ГЮЙГЕНСА-ШТЕЙНЕРА

Геометрія дослідів:  
Навантажена платформа  
 $a = (a \pm \Delta a) \text{ м}$



Таблиця 4.3

№ п/п	$t_3$	$\Delta t_3$	$\bar{T}_3$	$\Delta \bar{T}_3$	$I'_{\text{цт}}$	$\Delta I'_{\text{цт}}$	$\xi'_{\text{цт}}$	$I'_{\text{ц}}$	$\Delta I'_{\text{ц}}$	$\xi'_{\text{ц}}$
	с	с	с	с	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	—	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	—
1			—	—	—	—	—	—	—	—
2			—	—	—	—	—	—	—	—
...			—	—	—	—	—	—	—	—
С										



### ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ БОЛЬЦМАНА

**МЕТА РОБОТИ:** експериментальне визначення сталої Больцмана.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** термостатований скляний балон місткістю 5-20 л; медичний шприц на 1-2 см<sup>3</sup>, ефір, манометр.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Газові закони. Рівняння Менделєєва-Клапейрона.
2. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

Виходячи з молекулярно-кінетичної теорії, температуру слід вимірювати в одиницях енергії. Проте це дуже незручно на практиці, оскільки необхідно оперувати досить малими числами, а сама процедура вимірювання при цьому значно ускладнюється.

Множник  $k$ , який виражає співвідношення між одиницями енергії та температури, називають *сталою Больцмана*. Її числове значення встановлюють експериментально.

Найточніше значення сталої Больцмана дістаємо з рівності  $k = R N_A$ , де  $R$  – універсальна стала газу,  $N_A$  – число Авогадро. Визначення сталої Больцмана ґрунтується на використанні рівняння стану ідеального газу Менделєєва-Клапейрона. Прилад для визначення сталої Больцмана (рис. 5.1) складається зі скляного товстостінного балона 1, що з'єднаний через вивідну трубку 3 з рідинним манометром 4. Балон закупорений корком, в якому закріплено медичну голку 2 для введення через неї шприцом ефіру.

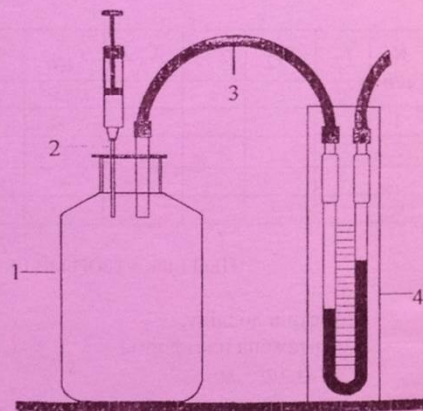


Рис.5.1 Прилад для визначення сталої Больцмана: 1 – товстостінний балон; 2 – корок зі шприцом; 3 – трубка; 4 – манометр

Після введення ефіру тиск у балоні збільшується на величину парціального тиску  $\Delta P$  газоподібного ефіру, який визначають манометром.

В основу дослідного визначення сталої Больцмана покладено рівняння стану ідеального газу:

$$\Delta P = \frac{\Delta m}{\mu V} RT, \quad (5.1)$$

з якого маємо:

$$\Delta P = \frac{\Delta m}{\mu} \cdot \frac{RT}{V} = \frac{\Delta m}{\mu} \cdot \frac{k N_A T}{V} = knT \quad (5.2)$$

де  $\frac{\Delta m}{\mu}$  – число молів введеного в балон ефіру;  $V$  – заданий робочий об'єм балона;  $n = \frac{\Delta m N_A}{\mu V}$  – концентрація молекул (кількість молекул ефіру в одиниці об'єму балона);  $T$  – температура газової суміші в балоні (для ефіру  $\mu = 76 \cdot 10^{-3}$  кг моль).

З рівняння 5.2 знайдемо сталу Больцмана  $k$ :

$$k = \frac{\Delta P V \mu}{\Delta m N_A T} \quad (5.3)$$

Парціальний тиск  $\Delta P$  парів ефіру в балоні врівноважується різницею висот  $h$  стовпчиків рідини у манометрі:

$$\Delta P = \rho gh \quad (5.4)$$

де  $\rho$  – густина манометричної рідини (задається наперед при відповідних температурах дослідів).

Маса ефіру:

$$\Delta m = \rho_e V_e \quad (5.5)$$

де  $\rho_e, V_e$  – густина і об'єм введеного ефіру, відповідно.

Підставляючи (5.4) і (5.5) у (5.3), отримаємо:

$$k = \frac{\rho gh V \mu}{\rho_e V_e N_A T} = B \cdot \frac{h}{V_e T} \quad (5.6)$$

Де  $B = \frac{\rho g V \mu}{\rho_e N_A}$  – сталий в умовах дослідів коефіцієнт.

Таким чином, вводячи ефір в об'єм  $V$  і фіксуючи покази манометра  $h$  при відповідній температурі  $T$ , за формулою (5.6) знаходимо сталу Больцмана.



**ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА  
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ**

1. Забезпечити надійне термостатування балона прозорим теплозахисним екраном.
2. Наповнити медичний шприц з голкою 0,1-0,5 см<sup>3</sup> ефіру. Зняти голку з шприца і вставити його в голку 2 балона; при цьому рівні манометричної рідини в колінах манометра повинні бути однаковими.
3. Натискаючи на поршень шприца, ввести в балон ефір об'ємом  $V_e$ ; для забезпечення герметизації залишити шприц у голці 2.
4. Після випаровування ефіру зафіксувати тиск при відповідній температурі.
5. Дослід повторити 3-5 разів, кожний раз дозуючи різні об'єми ефіру, який вводитьься в балон.
6. Результати вимірювань занести в таблицю 5.1.
7. За формулою  $k = \frac{\rho g h V \mu}{\rho_e V_e N_A T}$  знайти середнє значення сталої Больцмана.
8. Знайти відносну і абсолютну похибки вимірювань за формулами:

$$\xi = \frac{\Delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta h}{h_1+h_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_e}{V_e}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad \Delta k = \xi \cdot \bar{k}$$

9. Порівняти отримане експериментально значення сталої Больцмана з табличним. Зробити висновки щодо методики та результатів вимірювань.

**ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ**

1. Що таке парціальний тиск газу? Сформулювати та довести закон Дальтона.
2. Який фізичний зміст універсальної газової сталої?
3. Описати відомі Вам методи визначення універсальної газової сталої.
4. Навести закони, в яких фігурує стала Больцмана.
5. Вивести формулу для обчислення відносної та абсолютної похибок. Які джерела похибок в цій лабораторній роботі?

**ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ**

№ п/п	$h$	$\Delta h$	$V$	$\Delta V$	$V_e$	$\Delta V_e$	$T$	$\Delta T$	$k$	$\Delta k$	$\frac{\Delta k}{k}$
	м	м	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	К	К	$\frac{Дж}{К}$	$\frac{Дж}{К}$	
1											
2											
...											
5											
С											

*Лабораторна робота №6*

**ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ  
ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ**

**МЕТА РОБОТИ:** експериментальне визначення середньої довжини вільного пробігу молекул газу та коефіцієнта внутрішнього тертя.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** установка для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул повітря; секундомір.

**ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

1. Зіткнення. Довжина вільного пробігу.
2. Середньоарифметична, середньоквадратична, найбільш імовірна та максимальна швидкості молекул.
3. Явища переносу в газах.
4. Течія в'язких рідин

**ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ**

При течії газів, між шарами якого існує градієнт швидкості  $\frac{dv}{dx}$ , між ними виникає сила внутрішнього тертя, яка визначається за формулою:

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} \quad (6.1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості, який згідно з молекулярно-кінетичною теорією визначається за формулою:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v \lambda \quad (6.2)$$

де  $\rho$  – густина газу при даній температурі;  $\lambda$  – середня довжина вільного пробігу молекул та  $v$  – їх середня арифметична швидкість, яка визначається за формулою:

$$v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (6.3)$$

Знайдемо вираз для обчислення середньої довжини вільного пробігу молекул. З формули (6.2):

$$\lambda = \frac{3\eta}{\rho v} \quad (6.4)$$

де  $R$  – універсальна газова стала;  $\mu$  – молярна маса газу;  $T$  – його температура.

Густину газу можна знайти з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT. \text{ Звідси}$$



$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu P}{RT} \quad (6.5)$$

де  $P$  – тиск газу.

Коефіцієнт внутрішнього тертя  $\eta$  для стаціонарної ламінарної течії газів і рідин через капіляр визначається з закону Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi \Delta P r^4 t}{8 l V} \quad (6.6)$$

де  $r, l$  – радіус і довжина капіляра, по якому протікає газ,  $V$  – об'ємна витрата рідини за час  $t$ ,  $\Delta P$  – різниця тисків на вході і виході капіляра, яку можна знайти, знаючи густину рідини в манометричній трубці  $\rho_p$  і різницю висот  $\Delta h = h_1 - h_2$  рівнів рідини в манометрі:

$$\Delta P = \rho_p g \Delta h \quad (6.7)$$

Підставивши (6.7) в (6.6), а потім отриманий вираз для  $\eta$ , вирази для  $\rho$  (6.5) і для  $v$  (6.3) у рівність (6.4), отримаємо:

$$\lambda = \frac{3\pi RT \rho_p g \Delta h r^4 t}{8 l V \mu P \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}}$$

або, після спрощення:

$$\lambda = \frac{3\sqrt{\pi^3}}{8\sqrt{8}} \sqrt{\frac{RT \rho_p g \Delta h r^4 t}{\mu l V P}} \quad (6.8)$$

Схему установки для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул повітря приведена на рис.6.1, де 1 – капіляр, розміри якого приведені на установці, 2 – аспіратор, 3 – водяний манометр, 4 – трубка, через яку засмоктується повітря. Різниця тисків на кінцях капіляра, зумовлена внутрішнім тертям, вимірюється манометром 3, а об'єм повітря  $V$ , яке проходить за час  $t$  через капіляр, – за допомогою мірної посудини 5, або визначається шляхом зважування (густина рідини відома).

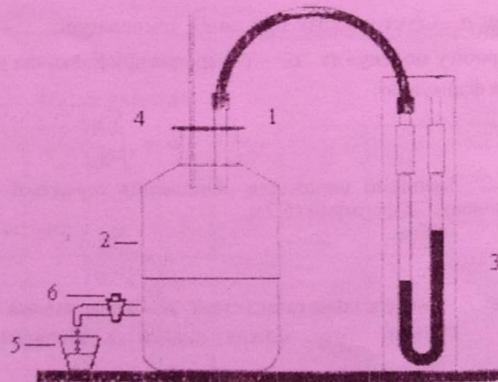


Рис.6.1

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Відкрити кран 6 аспілятора. Вимірювання часу і об'єму починати після встановлення стаціонарної течії повітря через капіляр, що фіксується за відсутністю змін у показках манометра  $\Delta P = \rho_p g \Delta h$ . Вимірювання тривають до витікання 20-50 мл води.
2. Дослід повторити 3-5 разів.
3. Температура і зовнішній тиск фіксуються за допомогою лабораторного термометра і барометра.
4. За формулою (6.8) обчислити довжину вільного пробігу молекул повітря  $\lambda$  та випадкову похибку обчислень згідно додатку 1 (розділ 2 «Обробка результатів прямих вимірювань»). При розрахунках прийняти коефіцієнт надійності  $P=0,95$ .

### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

1. Вивести формулу для обчислення похибок  $\lambda$ . Вимірювання якої з величин вносить найбільш суттєвий вклад у похибку?
2. Як впливає вологість на довжину вільного пробігу молекул та коефіцієнт внутрішнього тертя повітря?
3. Як залежить коефіцієнт внутрішнього тертя газів від тиску і температури?
4. Як залежить середня довжина вільного пробігу молекул газу від тиску і температури?
5. Що таке дифузія газів? Фізичний зміст коефіцієнта дифузії. Зв'язок коефіцієнта дифузії газу із середньою довжиною вільного пробігу молекул?

### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

Таблиця 6.1

$\rho_p$	$\mu$	$r$	$\Delta r$	$P$	$\Delta P$	$T$	$\Delta T$	$l$	$\Delta l$	$V$	$\Delta V$
$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$	м	м	Па	Па	К	К	м	м	$\text{м}^3$	$\text{м}^3$

Таблиця 6.2

№ п/п	$h_1$	$\Delta h_1$	$h_2$	$\Delta h_2$	$\Delta h$	$\Delta(\Delta h)$	$t$	$\Delta t$	$\lambda$	$\Delta \lambda$	$\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$
	м	м	м	м	м	м	с	с	м	м	
1											
2											
...											
5											
С											



ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЕМНОСТЕЙ ГАЗУ  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

МЕТА РОБОТИ: експериментальне визначення співвідношення  $\frac{C_p}{C_v}$

НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ: прилад для визначення відношення  $\gamma$  для повітря методом адіабатного розширення; ручний нагнітальний насос.

ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Середня кінетична енергія поступального руху одноатомної молекули та її зв'язок з температурою.
2. Число ступенів вільності та середня енергія багатоатомної молекули/
3. Внутрішня енергія і теплоємність ідеального газу.
4. Метод термодинаміки.
5. Застосування першого закону термодинаміки до адіабатного процесу.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

Питома теплоємність газів визначається не лише їх фізичною природою, а й умовами нагрівання. Газ можна нагрівати при сталому тиску (ізобарний процес), або при сталому об'ємі (ізохорний процес).

При ізобарному процесі теплота витрачається як на збільшення кінетичної енергії молекул газу, що призводить до підвищення його температури, так і на розширення газу, оскільки при ізобарному процесі об'єм газу зростає. При ізохорному процесі теплота витрачається лише на підвищення температури газу, тобто на збільшення кінетичної енергії газових молекул. Отже, для нагрівання однакової маси газу на однакову кількість градусів при ізобарному процесі треба затратити більшу кількість теплоти, ніж при ізохорному. Таким чином, питома теплоємність при сталому тиску  $C_p$  є більшою за питому теплоємність при сталому об'ємі  $C_v$ .

Безпосереднє визначення  $C_p$  й особливо  $C_v$  для газів пов'язане зі значними труднощами. Тому спочатку експериментально визначають

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  і  $C_p$ , а потім розраховують  $C_v$ . Для визначення  $\gamma$  запропоновано багато методів. Найпростіший з них метод Клемана-Дезорма, що полягає в послідовному проходженні досліджуваного газу через три стани, зумовлені стисненням і розширенням газу, за умов, що забезпечують протікання адіабатного процесу.

Адіабатним називається такий процес, при якому система не одержує і не віддає енергії тілам, які не належать до неї. Тому при протіканні адіабатного процесу робота виконується лише за рахунок внутрішньої енергії. Причому, чим швидше відбувається стиснення або розширення газу, тим більше процес наближається до адіабатного. При адіабатному стисненні газ нагрівається, при розширенні – охолоджується.

Нехай газ за початкових умов знаходиться в посудині під тиском  $p_0$  і займає об'єм  $V_0$  (рис. 7.1). При дальшому нагнітанні в посудину газу його тиск зростатиме і одночасно буде зменшуватися об'єм газу, який знаходився в посудині на початку досліду. Якщо нагнітання здійснювати швидко, рівень рідини в манометрі не відразу займає кінцеве положення, оскільки стиснення газу було адіабатним і температура його підвищилася. Остаточна різниця рівнів рідини в манометрі встановиться лише тоді, коли завдяки теплопровідності стінок посудини температура газу в посудині зрівняється з температурою навколишнього середовища (повітря).

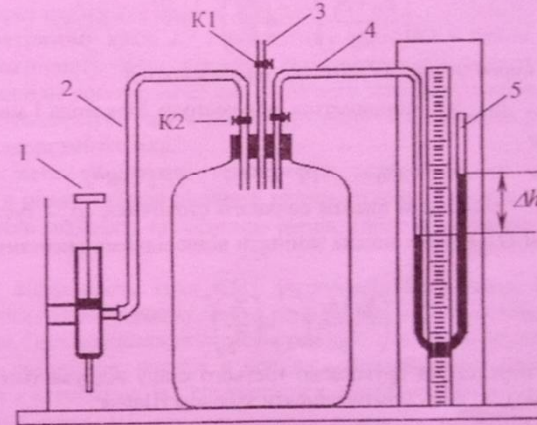


Рис.7.1 Прилад для визначення  $\frac{C_p}{C_v}$ : 1 – насос; 2, 4 – гумові шланги; 3 – трубка; 5 – манометр; K1, K2 – крани;  $\Delta h = h_1$  при адіабатному процесі і  $\Delta h = h_2$  при ізохорному процесі

Нехай абсолютна температура зовнішнього середовища дорівнює  $T_1$ , тиск газу в посудині  $p_0 + p_1$ , де  $p_0$  – атмосферний тиск. Отже, перший стан газу характеризується температурою  $T_1$ , тиском  $p_0 + p_1$  і об'ємом  $V_1$ .



Відкриванням крана  $K1$  забезпечують швидке розширення газу до тиску, що дорівнює атмосферному. Після цього кран закривають. У результаті об'єм газу знову дорівнюватиме  $V_0$ . При розширенні газ охолотиться до температури  $T_2$ , яка є нижчою за  $T_1$ . Таким чином, параметри другого стану газу: температура  $T_2$ , тиск  $p_0$  і об'єм  $V_0$ .

Газ, що охолотується при адіабатному розширенні до температури  $T_2$ , знову нагріватиметься, доки не досягне температури зовнішнього середовища  $T_1$ . Одночасно тиск газу в посудині зростатиме і перевищить атмосферний на величину  $p_2$  при незмінному об'ємі  $V_0$ . Отже, третій стан газу характеризуватиметься температурою  $T_1$ , тиском  $p_0 + p_2$  і об'ємом  $V_0$ .

Перехід газу з першого стану в другий відбувається адіабатно, тому застосуємо рівняння Пуассона:

$$\left(\frac{p_0 + p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma} \quad (7.1)$$

де  $\gamma$  – шукане співвідношення питомих теплоємностей.

Тиски  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  вимірюються манометром Маклеода і можуть бути представлені як

$$p_0 = \rho g h_0; \quad p_1 = \rho g h_1; \quad p_2 = \rho g h_2 \quad (7.2)$$

де  $h_0$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  – відповідні висоти водяного стовпчика,  $\rho$  – густина води. Тому в рівнянні (7.1) тиски можна замінити відповідними висотами водяного стовпчика:

$$\left(\frac{h_0 + h_1}{h_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma} \quad (7.3)$$

Оскільки перехід від другого до третього стану відбувається без зміни об'єму (ізохорно), то його можна описати законом Шарля:

$$\frac{h_0 + h_2}{T_1} = \frac{h_0}{T_2} \quad (7.4)$$

Розв'язавши сумісно рівняння (7.3) і (7.4), одержимо:

$$\left(\frac{h_0 + h_2}{h_0}\right)^{\gamma} = \left(\frac{h_0 + h_1}{h_0}\right)^{\gamma-1} \quad (7.5)$$

Після логарифмування (7.5) матимемо:

$$\gamma = \frac{\ln(h_0 + h_1) - \ln h_0}{\ln(h_0 + h_1) - \ln(h_0 + h_2)} \quad (7.6)$$

Тиски  $h_0 + h_1$  і  $h_0 + h_2$  майже однакові, тому, обмежившись першим наближенням, різниці логарифмів можна замінити різницями самих величин:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (7.7)$$

Таким чином, визначення  $\gamma$  зводиться до вимірювання різниці висот рівнів рідини  $h_1$  і  $h_2$  в колінах манометра.

Установка для визначення  $\gamma$  (див. рис.7.1) це посудина значного об'єму (~25 л), що дає змогу нехтувати зміною об'єму газу при зміні рівнів рідини в колінах манометра. За допомогою трубки 4 посудина (балон) з'єднана манометром 5 (переважно водяним). Вода, якою заповнений манометр забарвлена, що полегшує спостереження за рівнем рідини в його колінах. Верхню частину балона вмонтований кран  $K1$ , яким регулюють надходження атмосферного повітря. Досліджуваний газ нагнітають у балон за допомогою насоса 1 через трубку 2 з краном  $K2$ .

При закритому крані  $K1$  і відкритому крані  $K2$  у балон за допомогою насоса 1 нагнітають певну кількість газу, наприклад повітря, доки різниця рівнів у рідині не досягне 20-25 см. Після того закривають кран  $K1$ . Внаслідок стиснення температура газу в балоні підвищується і різниця рівнів рідини в манометрі дещо змінюється.

Через декілька хвилин температура газу в балоні дорівнюватиме кімнатній, а різниця рівнів рідини в колінах манометра не змінюватиметься. За таких умов знаходять що різницю рівнів, тобто визначають  $h_1$  з точністю до 1 мм.

Знову відкривають кран  $K1$  і закривають його, коли тиск у балоні дорівнюватиме атмосферному, тобто рівні рідини в колінах манометра будуть однаковими. При зрівноваженні тисків гам у балоні охолотується.

Через певний час повітря в посудині нагрівається і його температура зрівняється з кімнатною, що спричинить виникнення різниці рівнів рідини в колінах манометра  $h_2$ , яку визначають також із точністю до 1 мм. За усередненими даними  $h_1$  і  $h_2$  знаходять  $\gamma$ .

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Відкривши кран  $K2$  (кран  $K1$  закритий), накачати в балон повітря, щоб у манометрі була значна різниця рівнів рідини (2000-3000 Па). Зафіксувати різницю рівнів  $h_1$ , що остаточно встановилася в манометрі після охолодження нагрітого при тиску повітря до температури навколишнього середовища.



2. Коли рівні манометричної рідини зрівняються, відкрити і швидко закрити кран  $K1$ . Через 2-3 хв. зафіксувати різницю рівнів  $h_2$ .
3. Дослід повторити не менше 5 разів при різних показах манометра. Отримані результати занести в таблицю. Знайти середні значення  $h_1$ ,  $h_2$  та випадкові похибки їх вимірювань  $\Delta h, \Delta h_1, \Delta h_2$  згідно додатку 1 (розділ 2 «Обробка результатів прямих вимірювань»). При розрахунках прийняти коефіцієнт надійності  $P=0,95$ .
4. За формулою (7.7) обчислити  $\gamma$  для повітря і порівняти з теоретично знайденим, вважаючи повітря двоатомним газом. Обчислити відносну і абсолютну похибки вимірювань за формулами:

$$\xi = \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h_1}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_1}{h_1 - h_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_2}{h_1 - h_2}\right)^2}; \quad \Delta \gamma = \xi \cdot \gamma$$

#### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

1. Навести приклади ізотермічного, ізобарного, ізохорного і адіабатного процесів у газах. Як вони реалізуються?
2. Намалювати в координатах  $p-T$ ,  $p-V$ ,  $T-V$  вище перераховані графіки процесів.
3. Довести рівняння Майєра.
4. Чому  $C_p > C_V$ ?
5. Чому дорівнюють теплоємності газу при ізотермічному і адіабатному процесах?

#### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

№ п/п	$h_1$	$\Delta h_1$	$h_2$	$\Delta h_2$	$\gamma$	$\Delta \gamma$	$\Delta \gamma$
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>			
1							
2							
...							
5							
С							

#### Лабораторна робота №8

### ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЕМНОСТЕЙ ГАЗУ $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

**МЕТА РОБОТИ:** визначення коефіцієнта Пуассона для повітря за швидкістю поширення звуку в газі

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** звуковий генератор ГЛ 36, електричний осцилограф СІ-73, частотомір 43-32, мікрофон, телефон, телескопічна (розсувна) трубка.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Фізичні характеристики звуку.
2. Швидкість поширення звуку в газовому середовищі. Звукові коливання в замкнутих об'ємах.
3. Рівняння адіабати. Теплоємності газу при постійному тиску і при постійному об'ємі, їх взаємозв'язок і методи експериментального визначення.
4. Недоліки класичної теорії теплоємності.
5. Елементи квантової теорії теплоємності.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

Зв'язок макроскопічних параметрів газу  $P$ ,  $V$  і  $T$  при адіабатному процесі, тобто такому, що проходить без обміну теплом з навколишнім середовищем, описується рівнянням адіабати (рівнянням Пуассона):

$$PV^\gamma = const \quad (8.1)$$

Для того, щоб визначити коефіцієнт Пуассона  $\gamma$  (відношення питомої теплоємності газу при постійному тиску  $C_p$  до питомої теплоємності того ж газу при сталому об'ємі  $C_V$ , тобто  $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ , необхідно використати його

зв'язок з якими-небудь іншими характеристиками газу. В даній роботі використовується зв'язок  $\gamma$  з швидкістю поширення звуку в повітрі, який задається наступною формулою:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{\mu}{RT} \cdot v^2 \quad (8.2)$$

де  $\mu$  – молярна маса газу, в якому поширюється звук;  $v$  – швидкість звуку в цьому газі;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура газу.



Таким чином, для визначення показника адиабати  $\gamma$  достатньо виміряти температуру газу і швидкість поширення звуку в ньому. Швидкість звуку  $v$  в повітрі визначається акустичним методом за допомогою установки, зображеної на рис.8.1.

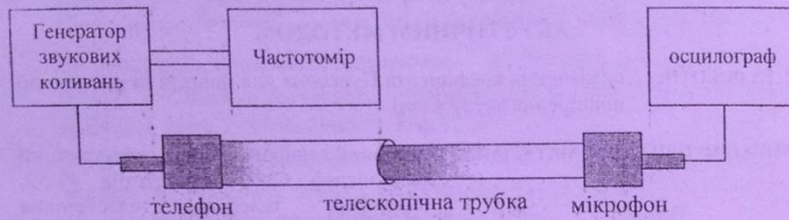


Рис.8.1

Звукові коливання в трубці, які збуджуються мембраною телефону, вловлюються мікрофоном. Мембрана телефону приводиться у рух змінним струмом звукової частоти. Джерелом змінної е.р.с. служить звуковий генератор ГЗ-36, а частота струму визначається за частотоміром 43-32. Сигнал, що виникає в мікрофоні, спостерігається на осцилографі СІ-73. Довжина труби може змінюватися за рахунок телескопічного з'єднання двох трубок.

Звукова хвиля, яка поширюється вздовж трубки, зазнає багаторазове відбивання від торців. Звукові коливання в середині трубки є результатом накладанням усіх відбитих хвиль і є, взагалі кажучи, дуже складними. Картина суттєво спрощується, якщо довжина труби стає рівною цілому числу півхвиль, тобто тоді, коли виконується умова:

$$L = \frac{\lambda}{2} n \quad (8.3)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі звуку в трубці,  $n$  – кількість півхвиль, що вкладаються в довжину труби  $L$ . Якщо умова (8.3) виконана, то хвиля, яка відбилася від протилежного торця трубки і повернулася до її початку, знову відбилася, тепер вже від переднього торця трубки, співпадає за фазою з хвилею, що в даний момент часу генерується телефоном.

Аналогічним чином співпадають за фазою і хвилі, які рухаються від заднього торця до переднього після першого, другого і всіх наступних відбивань від заднього торця. Хвилі, що співпадають за фазою, посилюють одна одну. Амплітуда звукових коливань при цьому різко зростає, тобто настає резонанс. Крім того, для випадку накладання двох однакових хвиль, що рухаються назустріч одна одній, формула (8.3) є умовою утворення так званих стоячих хвиль, коли гребні хвилі не переміщуються у просторі, а їх амплітуда змінюється з часом за гармонічним законом.

Швидкість звуку  $v$  зв'язана з його частотою  $f$  і довжиною хвилі  $\lambda$  відношенням:

$$v = \lambda \cdot f \quad (8.4)$$

Підбір умов, при яких виникає резонанс, можна проводити двома шляхами.

1. При незмінній частоті звукового генератора (а отже і довжини звукової хвилі) можна змінювати довжину трубки  $L$ . Для цього у роботі застосовується телескопічна (розсувна) труба. Довжина її поступово збільшується (труба повільно розсувається) і фіксується ряд послідовних резонансів. Виникнення резонансу легко спостерігати на осцилографі за різким збільшенням амплітуди коливань. Для послідовних резонансів маємо:

$$L_n = n \cdot \frac{\lambda}{2}; \quad L_{n+1} = (n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}; \quad \text{і так далі} \quad L_{n+k} = (n+k) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (8.5)$$

де  $k$  – номер резонансу, що спостерігається.

Із (8.4) і (8.5) отримуємо вираз для швидкості звуку:

$$v = f \cdot \lambda = 2f \cdot \frac{\lambda}{2} = 2f(L_{n+1} - L_n) = 2f \cdot \frac{(L_{n+2} - L_n)}{2} = 2f \cdot \frac{(L_{n+k} - L_n)}{k} \quad (8.6)$$

Таким чином, вимірявши довжину трубки  $L$ , при якій спостерігається резонанс, можна визначити швидкість звуку.

2. З формули (8.3) слідує, що умова резонансу буде періодично наставати, якщо плавно змінювати не довжину трубки  $L$ , а довжину звукової хвилі  $\lambda$ . Тоді при сталій довжині трубки необхідно вимірювати частоту звукових коливань, при яких настає резонанс. Для послідовних резонансів маємо:

$$\begin{aligned} \lambda_n &= \frac{2L}{n} \quad \text{або} \quad \frac{v}{f_n} = \frac{2L}{n} \\ \lambda_{n+1} &= \frac{2L}{n+1} \quad \text{або} \quad v(n+1) = 2L \cdot f_{n+1} \\ \lambda_{n+k} &= \frac{2L}{n+k} \quad \text{або} \quad v(n+k) = 2L \cdot f_{n+k} \end{aligned} \quad (8.7)$$

Із формул (8.7) отримаємо:

$$v = 2L(f_{n+k} - f_n) = 2L \cdot \frac{(f_{n+2} - f_n)}{2} = 2L \cdot \frac{(f_{n+k} - f_n)}{k} \quad (8.8)$$

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Ознайомитися з приладами, що використовуються при вимірюваннях, і електричною схемою їх підключення. Вивчити функціональне призначення перемикачів і засобів керування приладами на їх панелях.
2. Увімкнути в мережу осцилограф СІ-73, звуковий генератор ГЗ-36 і частотомір, дати їм прогрітися упродовж 4-5 хвилин. Після цього увімкнути тумблер «промінь» на панелі осцилографа і повернути тумблер «яскравість». На екрані осцилографа має бути видно світлу лінію, накреслену електронним променем.



- Тумблером «регулювання вихідної напруги» на звуковому генераторі підібрати напругу на його виході так, щоб на осцилографі спостерігались коливання достатньої амплітуди. Зупинити біжучу картину на екрані осцилографа, змінюючи частоту розгортки. Переконайтеся в тому, що коливання мають неспотворену синусоїдальну форму. Якщо форма коливань спотворена, слід зменшити амплітуду сигналу, який поступає з генератора.
- Виходячи з приблизного значення швидкості звуку 300 м/с, розрахувати, в якому діапазоні частот слід вести виміри, щоб при видовженні трубки можна було спостерігати 2-3 резонанси.
- При сталій частоті звуку, плавно змінюючи довжину трубки, послідовно пройти через усі доступні для спостережень точки резонансу. Для кожного резонансу виміряти відповідне видовження трубки. Провести виміри спочатку збільшуючи довжину трубки, а потім зменшуючи її. Повторити виміри при інших частотах (для 3-5 значень частоти).
- Визначити температуру повітря  $T$ .
- Визначити коефіцієнт Пуассона  $\gamma$  за формулою:

$$\gamma = \frac{\mu \cdot 4f^2}{RT \cdot k^2} (L_{n+k} - L_n)^2$$

- Обчислити відносну та абсолютну похибки вимірювань:

$$\xi = \frac{\Delta\gamma}{\bar{\gamma}} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta L_{k+n}}{L_{k+n} - L_n}\right)^2 + \left(-\frac{2\Delta L_k}{L_{k+n} - L_n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta f}{f}\right)^2}; \Delta\gamma = \xi \cdot \bar{\gamma}$$

де  $\Delta L_{k+n} = \Delta L_k = \Delta L$  – систематична похибка вимірювального приладу.

- При постійній довжині трубки плавно збільшуючи частоту генератора, отримати ряд послідовних резонансних значень частоти, відмічаючи момент резонансу за збільшенням амплітуди коливань на екрані осцилографа. Відповідне резонансу значення частоти визначити за допомогою частотоміра. Переконатися у повторюваності результатів, провівши вимірювання при зменшенні частоти.
- Обчислити значення  $\gamma$  для повітря за формулою:

$$\gamma = \frac{\mu \cdot 4L^2}{RT \cdot k^2} (f_{n+k} - f_n)^2$$

- Обчислити відносну та абсолютну похибки вимірювань:

$$\xi = \frac{\Delta\gamma}{\bar{\gamma}} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta f_{k+n}}{f_{k+n} - f_n}\right)^2 + \left(-\frac{2\Delta f_k}{f_{k+n} - f_n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta L}{L}\right)^2}; \Delta\gamma = \xi \cdot \bar{\gamma}$$

- Всі результати вимірювань і обчислень занести у відповідні таблиці.
- Порівняти отримані результати з табличними даними, пояснити можливі причини розходження. Зробити висновки, що впливають з отриманих результатів.

- Дати пропозиції щодо можливого вдосконалення установки та проведення експерименту.

#### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

- Що називається теплоємністю тіла, питомою теплоємністю, молярною теплоємністю?
- Чому  $C_p$  більше  $C_v$ ?
- Який фізичний зміст має універсальна газова стала  $R$ ?
- Записати формулу для теплоємності одного моля ідеального газу при сталому тиску:
- Записати рівняння Пуассона.
- Як залежить швидкість поширення звуку від його частоти:  
а)  $v \approx f$ ; б) не залежить; в)  $v \approx 1/f$ ; г)  $v \approx \lambda \cdot f$
- Які особливості акустичних коливань в замкнутих об'ємах?
- Що таке ступінь вільності молекули? Скільки ступенів вільності мають одноатомні, двоатомні, багатоатомні молекули?
- Як залежать  $C_p$  і  $C_v$  від числа ступенів вільності молекул?
- Чи змінюється коефіцієнт Пуассона при зміні відносної вологості газу?
- Чому дорівнює коефіцієнт Пуассона для ідеального одноатомного газу?
- Яка умова виникнення стоячих хвиль у замкнутому об'ємі?

#### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

Таблиця 1

№ п/п	$T$	$\Delta T$	$f$	$\Delta f$	$L_n$	$L_{n+1}$	...	$L_{n+k}$	$\gamma$	$\Delta\gamma$	$\xi$
	К	К	Гц	Гц	м	м		м			
1											
2											
...											
5											
С											

Таблиця 2

№ п/п	$T$	$\Delta T$	$L$	$\Delta L$	$f_n$	$f_{n+1}$	...	$f_{n+k}$	$\gamma$	$\Delta\gamma$	$\xi$
	К	К	м	м	Гц	Гц		Гц			
1											
2											
...											
5											
С											



### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ МЕТОДОМ ВІДРИВУ КРАПЛІ

**МЕТА РОБОТИ:** вивчення будови і властивостей рідин та експериментальне визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин різними методами.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** бюретка; штатив; вимірювальний мікроскоп; аналітичні терези; еталонна рідина; досліджувані рідини.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Молекулярна будова рідин. Характер теплового руху в рідинах.
2. Властивості поверхневого шару рідини. Поверхнева енергія. Поверхневий натяг.
3. Поверхневий тиск. Капілярні явища. Формула Лапласа.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

Рідкий стан виникає тоді, коли потенціальна енергія притягання молекул переважає за абсолютним значенням їх кінетичну енергію. Сили притягання між молекулами в рідині значні і забезпечують утримання молекул в об'ємі рідини. Таким чином, у рідині утворюється поверхня, яка обмежує її об'єм. Величина поверхні залежить від форми тіла і мінімальну поверхню при тому ж об'ємі має куля.

На частинки, що знаходяться в тонкому поверхневому шарі, діють з боку інших молекул сили притягання. Так як ці сили в рідині значно більші за сили притягання між поверхневими молекулами і молекулами повітря та пари біля поверхні рідини, то їх рівнодійна спрямована всередину рідини, нормально до її поверхні. При збільшенні поверхні рідини деяка кількість молекул з її об'єму повинна перейти в поверхневий шар, виконуючи при цьому роботу проти рівнодійної поверхневих сил ( $-\delta A$ ), а отже збільшуючи свою потенціальну енергію (на  $dU$ ). Прагнучи повернутись до мінімуму потенціальної енергії, поверхня рідини намагається скорочуватись. Виникають сили напрямлені вздовж поверхні рідини, які зумовлюють це скорочення – сили поверхневого натягу. Подолати рівнодійну сил притягання можуть лише найбільш швидкі («гарячі») молекули. Отже, при збільшенні поверхні без підведення тепла ззовні (адіабатично) рідина повинна охолоджуватися. Якщо збільшення поверхні рідини відбувається без зміни температури (ізотермічно), то вся кількість теплоти, що надходить ззовні до рідини йде на утворення поверхні (поверхневої плівки рідини). Її називають слюваною теплою утворення поверхні  $L$ .

При ізотермічних процесах, використовуючи перший принцип термодинаміки ( $dU = \delta Q + \delta A$ ), вираз для роботи молекул проти рівнодійної сил при виході їх з об'єму на поверхню рідини можна записати у такому виді:

$$\delta A = -dU + \delta Q = -dU + TdS = -d(U - TS) = -dF \quad (9.1)$$

де  $F = U - TS$  – вільна енергія системи молекул в поверхневому шарі рідини (вільна поверхнева енергія)  $S$  – ентропія. Ця вільна енергія пропорційна величині поверхні  $s$ :

$$F = \alpha \cdot s, \text{ або } dF = \alpha \cdot ds \quad (9.2)$$

де  $\alpha$  – густина вільної енергії поверхні.

Згідно (9.1), за абсолютною величиною  $\delta A = dF$ , тоді:

$$\delta A = f \, dx = \alpha \, ds = \alpha \, dx \, dy \quad (9.3)$$

де  $f$  – сила поверхневого натягу (рівна рівнодійній сил, що діє на поверхневу молекулу), яка спричинює переміщення на величину  $dx$  границі поверхневої плівки рідини довжиною  $dy$ .

Таким чином, густина вільної енергії поверхні рідини або коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює зміні поверхневої вільної енергії при зміні площі поверхні рідини на одиницю (енергетичне визначення  $\alpha$ ,  $[Дж \, м^2]$ , або дорівнює силі, напрямленій перпендикулярно до межі поверхні рідини, віднесеній до одиниці довжини цієї межі (силове визначення  $\alpha$ ,  $[Н/м]$ ):

$$\alpha = \frac{dF}{ds} = \frac{f}{dy} \quad (9.4)$$

Поверхневий натяг залежить від температури рідини, зокрема температури її поверхневої плівки. Наприклад, для всди ця залежність виражається наближеною формулою:

$$\alpha = \alpha_0 \left( \frac{3}{2} - \frac{T}{2T_0} \right) = \alpha_0 \left( 1 - \frac{\Delta T}{2T_0} \right) \quad (9.5)$$

де  $\alpha_0$  – значення коефіцієнта поверхневого натягу при абсолютній температурі  $T_0$ ,  $\Delta T$  – приріст температури.

На межі дотику твердих тіл з рідинами спостерігається викривлення поверхні рідини (меніск). В широких посудинах меніск біля стінки посудини істотної ролі не відіграє. Якщо ж опустити в рідину капілярну трубку, то залежно від природи рідини, рівень рідини в трубці підніметься або опуститься на деяку висоту над рівнем рідини в посудині (рис.9.1).

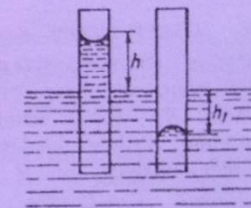


Рис.9.1



Це явище пояснюється зміною внутрішнього молекулярного тиску в залежності від форми поверхні рідини. Поверхня рідини в капілярі внаслідок взаємодії молекул рідини з молекулами твердої поверхні стінки набуває викривленої форми.

Меніск буде вгнутиим, якщо рідина змочуюча (наприклад, вода-скло) і опуклим, якщо рідина не змочує тверду поверхню (ртуть-скло). Намагаючись скоротитись до мінімальної площі (стати плоскою), опукла плівка збільшує тиск на рідину, а вгнута зменшує його (рис.9.2).

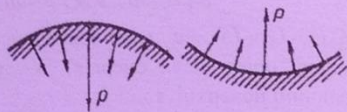


Рис.9.2

Залежність внутрішнього молекулярного тиску від викривлення поверхні рідини описується формулою Лапласа:

$$p = p_0 \pm \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (9.6)$$

де  $p$  – тиск під викривленою поверхнею;  $p_0$  – тиск під плоскою поверхнею;  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини;  $R_1, R_2$  – радіуси кривизни поверхні рідини в двох взаємно перпендикулярних напрямках. У випадку, коли поверхня рідини має сферичну форму, тобто для капілярної трубки, рівняння Лапласа приймає вид:

$$p = p_0 \pm \frac{2\alpha}{R} \quad (9.7)$$

Знак «+» стосується опуклої поверхні рідини, знак «-» – вгнутої. Таким чином, для змочуючих рідин тиск під вгнутиим меніском в капілярі буде меншим, ніж під плоскою поверхнею рідини в широкій посудині, на величину  $\Delta p = p_0 - p$ , а для незмочуючої рідини, навпаки – більшим на ту ж величину.

Цим і пояснюється те, що рідина в капілярних трубках при змочуванні піднімається, а при незмочуванні опускається.

Якщо опустити капіляр в змочуючу рідину, то під дією лапласового тиску рідина в капілярі піднімається. Між рідиною в капілярі і широкій посудині встановлюється така різниця рівнів, при якій капілярний тиск зрівноважується гідростатичним:

$$\frac{2\alpha}{R} = \rho g h \quad (9.8)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $h$  – висота підняття рідини в капілярній трубці відносно рівня рідини в широкій посудині;  $R$  – радіус меніска. При повному змочуванні стінок капіляра рідиною  $R$  дорівнює радіусу  $r$ . В іншому випадку

$$R = \frac{r}{\cos \theta}, \text{ де } \theta \text{ – кут змочування (рис.9.3).}$$

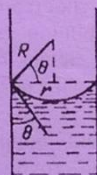


Рис.9.3

Якщо яким-небудь чином збільшити зовнішній тиск над поверхнею змочуючої рідини в капілярі, то можна досягнути такого положення, при якому рівень рідини в широкій посудині і капілярі зрівноважиться. Нехай з цією метою зовнішній тиск потрібно збільшити на деяку величину  $\Delta p$ , тоді

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R} \quad (9.9)$$

Отже, вимірявши цей додатковий зовнішній тиск, можна визначити коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини.

На практиці одним з поширених методів вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу є *метод відриву крапель*. При порівняно невеликій швидкості витікання рідин з вузької трубки утворюються краплі майже сферичної форми. Перед відривом краплі виникає «нитка», по якій і відбувається розрив (рис. 9.4). Нехай діаметр нитки в момент відриву краплі дорівнює  $2r$ , а вага краплі, що відривається,  $P$ . Тоді справедлива рівність  $2\pi r\alpha = P$ . Звідси

$$\alpha = \frac{P}{2\pi r} \quad (9.10)$$

Для більш точного визначення коефіцієнта  $\alpha$  знаходять вагу певної кількості крапель, а потім середнє значення ваги окремої краплі. Використовується також варіант підрахунку числа крапель  $n$  певного об'єму  $V$  витікаючої рідини. Розрізняють абсолютний і відносний способи визначення коефіцієнта  $\alpha$ .

*Абсолютний спосіб* полягає в заміні у формулі (9.10) ваги краплі  $P$  її значенням через об'єм, визначений по шкалі бюретки,  $V$ , густину рідини  $\rho$  і кількість крапель  $n$ :

$$\alpha = \frac{\rho g V}{2\pi n r} \quad (9.11)$$

*Відносний спосіб* полягає в порівнянні коефіцієнта поверхневого натягу досліджуваної рідини  $\alpha$  і еталонної  $\alpha_0$ . Записавши (9.13) для однакових об'ємів цих рідин, отримаємо:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{\rho r_0 n_0}{\rho_0 r n} \quad (9.12)$$

де  $\rho_0, n_0, r_0$  – відповідно густина, кількість крапель, радіус шийки краплі еталонної рідини;  $\rho, n, r$  – аналогічні параметри досліджуваної рідини. Еталонною рідиною рекомендують брати дистильовану воду. Густина рідин слід визначити пікнометричним методом.

На рис.9.5 приведено схему приладу для визначення коефіцієнта поверхневого натягу  $\alpha$  рідини методом відриву краплі. Рідину наливають у бюретку 3, закріплену в штативі 2. Рідину, що витікає з бюретки збирають в скляному кристалізаторі 4. Радіус шийки краплі вимірюють відліковим мікроскопом 1.



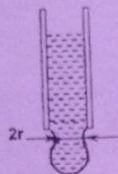


Рис.9.4

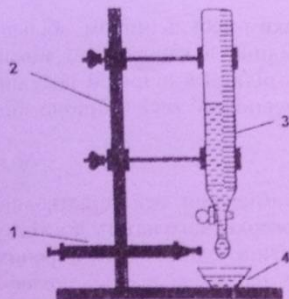


Рис.9.5

**ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА  
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ**

**Завдання 1**

1. Визначити пікнометричним методом густину досліджуваної рідини (або знайти за таблицями).
2. Заповнити мікробюретку досліджуваною рідиною, зафіксувати об'єм рідини.
3. Відкривши кран, підрахувати кількість крапель  $n$  і знайти об'єм рідини  $V$ , яка витекла.
4. Визначити мікроскопом середнє значення радіуса шийки краплі  $r$ .
5. Дослід повторити 5-8 разів.
6. За формулою (9.11) обчислити коефіцієнт поверхневого натягу.
7. Обчислити відносну та абсолютну похибки вимірювань:

$$\xi = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2}; \quad \overline{\Delta\alpha} = \xi \cdot \bar{\alpha}$$

8. Результати вимірювань і обчислень записати у таблицю 9.1.
9. Оцінити точність результатів вимірювання.

**Завдання 2**

1. Заповнивши мікробюретку еталонною рідиною (дистильована вода), зафіксувати об'єм рідини.
2. Відкрити кран і підрахувати кількість крапель  $n_0$ . Дослід повторити 3-5 разів.
3. Визначити мікроскопом середнє значення радіуса шийки краплі  $r_0$ .
4. Заповнити мікробюретку досліджуваною рідиною. Повторити аналогічні вимірювання, як і для еталонної рідини, 5-8 разів для того самого об'єму.
5. Значення  $\rho_0$ ,  $\alpha_0$  взяти з таблиць. За формулою (9.12) обчислити  $\alpha$ .
6. Обчислити відносну та абсолютну похибки вимірювань:

$$\xi = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\rho_0}{\rho_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_0}{r_0}\right)^2}; \quad \overline{\Delta\alpha} = \xi \cdot \bar{\alpha}$$

7. Результати вимірювань і обчислень записати у таблицю 9.2.
8. Оцінити точність результатів вимірювання.
9. Порівняти значення  $\alpha$ , знайдені двома способами. Результати вимірювання віднести до температури досліду.
10. Зробити висновки відносно методів і результатів вимірювання.

**ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ**

1. Будова рідини згідно молекулярної теорії. Пояснити стисливість рідин.
2. Що таке поверхневий натяг рідини? Чому поверхня рідини має властивості, відмінні від властивостей всієї маси рідини?
3. Вказати і пояснити залежність сили поверхневого натягу від тиску пари над рідиною, температури кипіння.
4. Дати силове визначення коефіцієнта поверхневого натягу. В якому напрямку діє сила поверхневого натягу.
5. Дати енергетичне визначення коефіцієнта поверхневого натягу.
6. Як і чому змінюється коефіцієнт поверхневого натягу із зміною температури?
7. Який тиск називають лапласівським?
8. Назвіть приклади використання поверхневих властивостей рідини в техніці.

**ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ**

Таблиця 9.1

№ п/п	$\rho$	$\Delta\rho$	$r$	$\Delta r$	$V$	$\Delta V$	$n$	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$
	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\text{м}$	$\text{м}$	$\text{м}^3$	$\text{м}^3$		$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$
1.										
2.										
...										
8.										
С										

Таблиця 9.2

$$V = V_0 = (V \pm \Delta V) \text{ м}^3$$

№ п/п	$\rho_0$	$r_0$	$\Delta r_0$	$n_0$	$\rho$	$r$	$\Delta r$	$n$	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$
	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\text{м}$	$\text{м}$		$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\text{м}$	$\text{м}$		$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$
1.											
2.											
...											
8.											
С											



## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИХ ПОЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗЧИНУ ЕЛЕКТРОЛІТУ

**МЕТА РОБОТИ:** вивчення просторового розподілу напруженості і потенціалу електростатичного поля, знаходження його еквіпотенціальних поверхонь і силових ліній.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** лабораторний макет, вольтметр, електронно-променевий осцилограф, ванночка з електролітом, з'єднувальні провідники.

### ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Основні характеристики електростатичного поля.
2. Теорема Остроградського-Гауса.
3. Принцип суперпозиції електричних полів.
4. Зв'язок між напруженістю електричного поля і потенціалом.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

Взаємодія заряджених тіл, які перебувають на певній відстані одне від одного, відбувається за посередництвом електричного поля: електричне поле, створене одним із заряджених тіл, діє на внесені в це поле інші заряджені тіла і навпаки.

*Силову характеристику* електричного поля є *вектор напруженості електричного поля*  $\vec{E}$ . Він дорівнює відношенню сили  $\vec{F}$ , з якою поле діє на точковий позитивний заряд  $q_0$ , розміщений у даній точці поля, до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (10.1)$$

Пробний заряд повинен бути настільки малим, щоб не спотворювати досліджуване поле. За одиницю напруженості електричного поля в системі СІ взято напруженість у такій точці поля, у якій на пробний заряд 1 Кл з боку поля діє сила 1 Н:  $[E] = 1 \frac{Н}{Кл}$ .

Основне завдання електростатики полягає у тому, щоб за заданими величиною і розміщенням зарядів визначити напруженість електричного поля в будь-якій точці простору. Це завдання вирішується за допомогою принцип суперпозиції електричних полів: *напруженість електричного поля системи зарядів дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених кожним зарядом окремо:*

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (10.2)$$

48

де  $\vec{E}_i$  – напруженість електричного поля, створеного  $i$ -м електричним зарядом,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $n$  – число зарядів, які входять до складу системи.

Напрямки векторів напруженості електричного поля у просторі можна представити за допомогою неперервних ліній, які називаються *силовими лініями* (*лініями напруженості*). Це лінії, дотичні до яких у будь-якій точці співпадають з напрямком напруженості поля в цій точці (рис. 10.1). Силові лінії мають напрям, який збігається з напрямом сили, що діє на позитивний заряд. Вони починаються на позитивних зарядах, закінчуються на негативних. Силові лінії є незамкнутими і ніде не перетинаються (рис. 10.2). Густина ліній напруженості, які пронизують одиницю площі поперечного перерізу, пропорційна модулю вектора  $\vec{E}$ .



Рис. 10.1

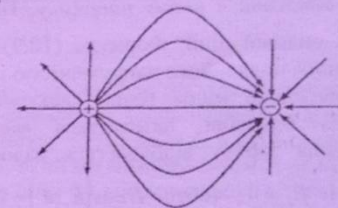


Рис. 10.2

*Енергетичною характеристикою* електростатичного поля є його потенціал. *Потенціалом електростатичного поля* називається фізична величина  $\varphi$ , яка дорівнює відношенню потенціальної енергії  $W_{\Pi}$  пробного точкового заряду  $q$ , розміщеного в даній точці поля, до величини цього заряду:

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q} \quad (10.3)$$

Потенціал чисельно дорівнює роботі кулонівських сил з переміщення одиничного позитивного заряду з даної точки простору в нескінченність.

Згідно принципу суперпозиції: *потенціал результуючого поля дорівнює сумі потенціалів, які створюються в даній точці окремими зарядами:*

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (10.4)$$

Робота переміщення заряду з точки 1 у точку 2 електростатичного поля:

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (10.5)$$

Звідси різниця потенціалів:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A_{12}}{q} \quad (10.6)$$

Потенціал і різниця потенціалів вимірюються у вольтах:  $[\varphi] = 1В = 1 \frac{Дж}{Кл}$ .

Робота сил поля, яка виконується при малому переміщенні заряду  $q$  в електростатичному полі:



$$dA = q(\vec{E}, d\vec{l}) = qE_l dl \quad (10.7)$$

де  $E_l = E \cos(\vec{E}, d\vec{l})$  – проекція вектора  $\vec{E}$  на напрямок переміщення  $d\vec{l}$ .  
З іншого боку:

$$dA = -q d\varphi \quad (10.8)$$

Зіставляючи вирази (10.7) і (10.8), маємо:

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl} \quad (10.9)$$

Тобто проекція  $E_l$  вектора напруженості електричного поля на довільний напрямок чисельно дорівнює швидкості зменшення поля на одиницю довжини в цьому напрямку. Найбільшого значення  $E_l$  набуває в напрямку силової лінії. Формула (10.9) дає зв'язок між характеристиками електричного поля – його напруженістю і потенціалом.

Геометричне місце точок електростатичного поля, в яких значення потенціалу однакові, називається *еквіпотенціальною поверхнею*. Якщо переміщення заряду відбувається вздовж еквіпотенціальної поверхні, то  $\frac{d\varphi}{dl} = 0$  і  $E_l = 0$ , тобто  $E \cos(\vec{E}, d\vec{l}) = 0$ , отже  $\vec{E} \perp d\vec{l}$  – у кожній точці еквіпотенціальної поверхні вектор напруженості  $\vec{E}$  перпендикулярний до неї.

Електростатичні поля можна зображати не тільки за допомогою силових ліній, але й за допомогою еквіпотенціальних поверхонь (рис. 10.3).

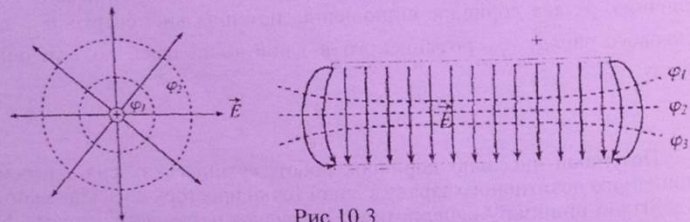


Рис.10.3

На рис. 10.4 зображено схему установки для моделювання електростатичного поля в розчині електроліту. На дні ванни (штрихова лінія на рис.10.4), виготовленої з електроізоляційного матеріалу, розміщують електроізоляційний папір з нанесеною координатною сіткою, який ізолюють від попадання на нього електроліту. Металеві електроди  $A$  і  $B$  занурюють в електроліт на кінцях координатного поля ванни. Напруга на електроди подається через знижувальний трансформатор. У вимірвальну частину схеми входять вольтметр  $V$  для вимірювання відносного потенціалу, потенціометр  $R$ , за допомогою якого встановлюють різні значення потенціалу відносно електрода та осцилограф, який служить нуль-індикатором.

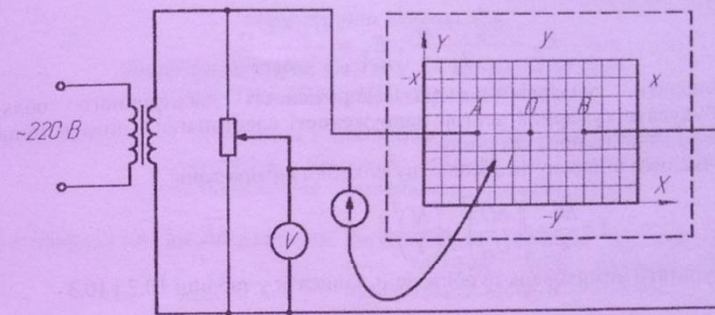


Рис.10.4

Переміщуємо зонд в електричному полі доки не досягнемо мінімального відхилення на електропроменевому індикаторі (осцилографі). При цьому покази вольтметра відповідають потенціалу точки поля  $L$ , в якій знаходиться зонд, відносно потенціалу електрода  $B$ , який ми можемо вибрати за нульовий (точка  $M$ ). Координати точки  $L$  знаходимо за координатною сіткою ванни. При незмінному положенні рухомого контакту потенціометра  $R$  переміщуємо зонд  $L$  навколо електродів і шукаємо нові точки з таким самим потенціалом. Відмічаємо координати цих точок і, з'єднавши їх, отримуємо еквіпотенціальну поверхню. Змінюючи положення контакту на потенціометрі, дістанемо сім'ю еквіпотенціальних поверхонь для даної пари електродів.

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Скласти електричне коло за схемою рис.10.4 з циліндричними електродами.
2. Поставити зонд-щуп на відстані 2 см від одного з електродів і помістити повзунок реостата в положення, коли осцилограф вказує на мінімальне відхилення.
3. Переміщуючи зонд, визначити ряд точок (6-8 точок), що відповідають цьому потенціалу. Координати точок занести в таблицю 10.1.
4. Перемістити зонд на 1,5-2 см в напрямі другого електрода і повторити вимірювання пп.2-3.
5. На міліметровому папері нанести координатну сітку і накреслити систему еквіпотенціальних поверхонь. Біля кінців кожної лінії, що відповідає певній еквіпотенціальній поверхні на графіку, записати відповідні значення напруги.
6. Виміряти потенціали  $U_{xy}$  в довільній точці  $M(x, y)$  і точках  $M(x+l, y)$  та  $M(x, y+l)$ , де  $l=1-2$  см.



7. За формулами

$$E_x = \frac{U_x - U_{xy}}{l_x}; E_y = \frac{U_y - U_{xy}}{l_y}$$

Обчислити складові вектора напруженості електричного поля. Побудувати сумарний вектор напруженості електричного поля в точці  $M(x, y)$  і знайти його величину.

8. Обчислити відносну та абсолютну похибки вимірювань:

$$\xi = \frac{\overline{\Delta E}}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2}; \quad \overline{\Delta E} = \xi \cdot \overline{E}$$

9. Результати вимірювань та обчислень записати у таблиці 10.2 і 10.3

#### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

1. Основні характеристики електростатичного поля та зв'язок між ними. Одиниці вимірювання.
2. Сформулювати та записати закон Кулона в системі СІ у векторному вигляді.
3. В чому полягає принцип суперпозиції полів?
4. Яке поле називається потенціальним? Показати, що електростатичне поле є потенціальним.
5. Що розуміють під силовою лінією електростатичного поля? Показати, що силові лінії напруженості перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь.

#### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

Таблиця 10.1

№ п/п	$U = V$		$U = V$	
	$x, м$	$y, м$	$x, м$	$y, м$
1.				
2.				
...				
8.				

Таблиця 10.2

№ п/п	$U_{xy}$	$U_{x+l}$	$U_{y+l}$	$\Delta U$	$l_x$	$l_y$	$\Delta l$
	$B$	$B$	$B$	$B$	$м$	$м$	$м$
1							

Таблиця 10.3

№ п/п	$E_x$	$E_y$	$E$	$\Delta E$	$\frac{\Delta E}{E}$
	$B/м$	$B/м$	$B/м$	$B/м$	
1.					

#### Лабораторна робота №11

### ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ЗА ДОПОМОГОЮ МІСТКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**МЕТА РОБОТИ:** ознайомлення з класичним методом вимірювання опорів за допомогою місткової схеми та перевірка законів послідовного та паралельного з'єднання опорів.

**НЕОБХІДНІ ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:** акумуляторна батарея; магазин опорів типу МОД-62, набір шуканих опорів, нуль-гальванометр; перемикачі.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ, ЗНАННЯ ЯКИХ НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Основні положення класичної електронної теорії металів.
2. Механізм електропровідності металів.
3. Закони Ома і Джоуля-Ленца.
4. Правила Кірхгофа.
5. Принцип роботи мостових схем.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ПРИЛАДІВ

Одним з найбільш поширених методів вимірювання електричного опору є метод з використанням схеми Уїтстона, яка приведена на рис. 11.1.

В чотириплечий контур  $ABCD$  ввімкнено опори  $R_1, R_2$ , еталонний опір  $R_{ET}$  та вимірюваний опір  $R_X$ , які утворюють так звані плечі містка. При цьому ділянка містка з опорами  $R_{ET}$  і  $R_X$  називається плечем порівняння, а з опорами  $R_1$  і  $R_2$  – відношення. Протилежні вершини чотирикутника з'єднують діагоналями, до однієї з яких приєднано нуль-гальванометр, а до другої – джерело живлення.

Якщо перемикач  $S1$  замкнений, а  $S2$  – розімкнений, то у ділянках  $ABC$  і  $ADC$  проходять струми:

$$I_3 = I_4 = \frac{E}{R_X + R_{ET}}, \quad I_1 = I_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} \quad (11.1)$$

де  $E$  – величина е.р.с. джерела живлення.

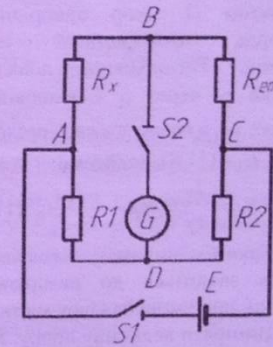


Рис.11.1



Спади напруг на опорах  $R_X$  і  $R_1$  відповідно дорівнюватимуть:

$$U_X = I_3 \cdot R_X = \frac{E}{R_X + R_{ET}} \cdot R_X = \frac{E}{1 + \frac{R_{ET}}{R_X}}, \quad (11.2)$$

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_1 = \frac{E}{1 + \frac{R_2}{R_1}}. \quad (11.3)$$

При будь-яких співвідношеннях між опорами  $R_{ET}$  та  $R_X$ , змінюючи опори  $R_1$  або  $R_2$ , можна забезпечити рівність  $U_1 = U_X$ . Тоді на основі останніх співвідношень одержуємо:

$$\frac{R_{ET}}{R_X} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (11.4)$$

Звідси

$$R_X = R_{ET} \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (11.5)$$

У приведену на рис.11.1 вигляді схему вимірювального містка не використовують.

Практична схема для вимірювань приведена на рис 11.2. У цій схемі опори  $R_1$  та  $R_2$  замінено реохордом з рухомих контактом  $D$ . Опір однорідного реохорда пропорційний його довжині. Позначивши довжину ділянки  $r_1$  через  $l_1$  і, відповідно,  $r_2$  через  $l_2$ , а повну довжину реохорда через  $L$ , з (11.5), знайдемо:

$$R_X = R_{ET} \cdot \frac{l_1}{l_2} = R_{ET} \cdot \frac{l_1}{L - l_1}. \quad (11.6)$$

Таким чином, визначення опорів зводиться до вимірювань довжин, при умові балансу містка.

Виміряти величину опору  $R_X$  можна при будь-якому значенні  $R_{ET}$ , але залежно від величини  $R_{ET}$ , умова балансу містка виконується при різних значеннях відношення  $l_1 / (L - l_1)$ . Проаналізуємо вплив положення рухомого контакту  $D$  на точність вимірювання  $R_X$ . Для спрощення прийемо, що положення контакту  $D$  при балансі містка є єдиним джерелом похибки експерименту. Диференціюючи (11.6), знайдемо абсолютну похибку, з якою визначається величина опору  $R_X$ :

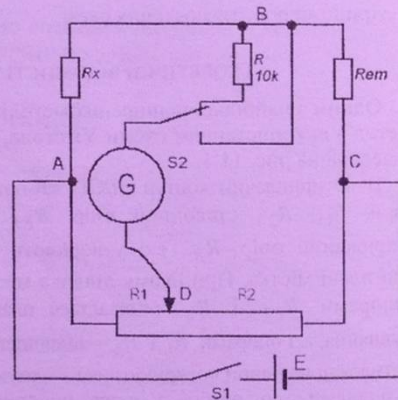


Рис.11.2

$$dR_X = R_{ET} \cdot \frac{L dl_1}{(L - l_1)^2}. \quad (11.7)$$

З (11.6) та (11.7) знайдемо відносну похибку:

$$\xi = \frac{dR_X}{R_X} = \frac{L dl_1}{l_1 \cdot (L - l_1)} = \frac{1}{(1 - l_1/L) \cdot l_1/L} \cdot \frac{dl_1}{L}. \quad (11.8)$$

Похибка вимірювань залежить, таким чином, від величини  $l_1/L$ .

Позначимо дріб  $\frac{1}{(1 - l_1/L) \cdot l_1/L}$  через  $X$ , тоді  $\frac{dR_X}{R_X} = X \cdot \frac{dl_1}{L}$ . Залежність  $X$  від  $l_1/L$  приведена на рис. 11.3.

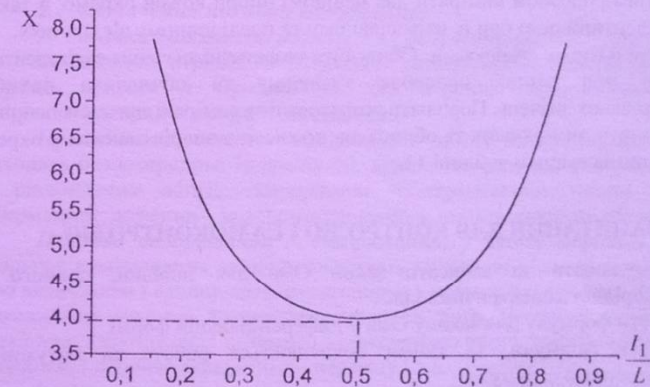


Рис.11.3

Як видно з графіка, найбільш точними є вимірювання, які виконуються при  $l_1/L = 0.5$ . При  $l_1/L = 0.2$  або при  $0.8$  похибка вимірювання зростає в 1,5 рази, а при подальшому наближенні до нуля або одиниці має місце швидке наростання похибки. Опір магазину  $R_{ET}$  тому слід завжди вибирати так, щоб баланс моста досягався поблизу середини реохорда або принаймні в діапазоні  $0.2 < l_1/L < 0.8$ .

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Замкнути перемикач  $S_2$  в положення, яке відповідає ввікненому додатковому опору  $R$ .
2. Встановити рухомий контакт  $D$  посередині реохорда.
3. Включити живлення схеми за допомогою вимикача  $S_1$ . Підібрати на магазині опорів таке значення опору  $R_{ET}$ , при якому покази гальванометра наближаються до нуля.



4. Перемкнути перемикач S2 в положення, яке відповідає вимкненому додатковому опору, збалансувати місток та виміряти значення  $I_1$ .
5. Змістити повзунок D вліво (вправо), повторити балансування містка та виміряти  $I_1'$ . Якщо різниця в результатах є незначною, то достатньо обмежитись 2-3 вимірюваннями. Якщо різниця перевищує 0,5 мм, то вимірювання доцільно повторити не менше 5 разів та усереднити результати.
6. За формулою (11.6) обчислити значення досліджуваного опору.
7. Змінити шляхом перемикачання клем напрямом струму в колі на протилежний та знову виконати вимірювання опору.
8. За допомогою графіка 11.3 та за формулою (11.8) розрахувати похибку вимірювань опору.
9. Вказаним способом виміряти два невідомі опори кожен окремо, а також еквівалентний опір при їх паралельному та послідовному з'єднаннях.
10. Оцінити похибки вимірювань. Обчислити теоретичні значення еквівалентних опорів при різних способах з'єднання та обчислити похибки розрахованих значень. Порівняти розраховані та виміряні значення опорів.
11. Результати вимірювань та обчислень кожного з опорів занести в окрему таблицю за взірцем таблиці 11.

#### ЗАПИТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ І САМОКОНТРОЛЮ

1. Сформулювати та записати закон Ома для ділянки, повного та неоднорідного електричних кіл.
2. Вивести формулу для закону Ома у диференціальній формі.
3. Вивести формули, за якими обчислюється робота та потужність електричного струму.
4. Пояснити фізичний зміст електрорушійної сили.
5. Вивести формули для визначення опору при послідовному та паралельному з'єднаннях резисторів.
6. Вивести робочу формулу та формули, за якими визначаються похибки у цій роботі.

#### ЗВІТНІ ТАБЛИЦІ

Таблиця 11

№ п/п	$L$	$I_1$	$\Delta I$	$R_{ET}$	$R_X$	$\Delta R_X$	$\frac{\Delta R_X}{R_X}$
	см	см	см	Ом	Ом	Ом	
1.							
2.							
...							
5.							
С							

## ДОДАТОК І ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ В ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМІ

Додаток І

### 1. ВИМІРЮВАННЯ І ЙОГО РЕЗУЛЬТАТ

**Вимірюванням\*** називається знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Виміряти фізичну величину – це значить порівняти її з іншою однорідною з нею величиною, яка прийнята за одиницю. Мета фізичного експерименту – зробити надійні висновки відносно вимірюваних величин, або функцій від них. Тому в задачу вимірювання входять:

1. **вимірювання величини;**
2. **визначення похибки вимірювань;**
3. **оцінка надійності одержаного результату.**

За методом отримання результату вимірювання поділяють на прямі, непрямі, сукупні і сумісні. В лабораторних практикумах частіше зустрічаються прямі і непрямі вимірювання.

**Пряме вимірювання** – вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо із дослідних даних. Наприклад: вимірювання маси на рівноплечих вагах; температури – термометром; сили струму – амперметром; довжини – за допомогою лінійки, штангенциркуля або мікрометра.

**Непрямі вимірювання** – вимірювання, у якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять на основі відомої залежності між цією величиною і величинами, отриманими з прямих вимірювань. Наприклад: знаходження густини однорідного тіла за його масою і геометричними розмірами; знаходження питомого електричного опору зразка за його опором, довжиною і площею поперечного перерізу і т.д.

Інколи результат вимірювання можна охарактеризувати точним числом. Наприклад: кількість пасажирів у трамваї, число повних коливань маятника. Але, частіше всього, результат вимірювання представляє собою випадкову величину, що змінюється від досліду до досліду. Наприклад, кількість радіоактивних розпадів в даній масі речовини за одиницю часу.

Точність вимірювань характеризується їх похибкою. **Абсолютною похибкою вимірювань** називають різницю між знайденим на досліді  $x$  і умовно істинним значенням  $x_0$  фізичної величини. Позначаючи похибку вимірювання величини  $x$  символом  $\Delta x$ , знайдемо:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1)$$

Крім абсолютної похибки  $\Delta x$ , часто важливо знати і **відносну похибку**  $\delta x$ , яка рівна відношенню абсолютної похибки вимірювання до умовно істинного значення вимірюваної величини:

\* Тут та надалі означення, які виділені жирним курсивом, приведені згідно ДСТУ 2681-92 «Метрологія. Терміни та визначення».



$$\delta x = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \quad (2)$$

Як правило, якість вимірювань визначається саме відносною, а не абсолютною, похибкою. Наприклад, одна і та ж сама абсолютна похибка в 1 мм при вимірюванні довжини кімнати не відіграє ролі, але при вимірюванні діаметру гвинта вона недопустима. Це пояснюється тим, що відносна похибка вимірювань в першому випадку складає  $\sim 2 \cdot 10^{-4} \%$ , а в другому може складати десятки процентів.

Як видно з (1) і (2), для того, щоб знайти абсолютну і відносну похибки вимірювань, потрібно знати не тільки виміряне, але і істинне значення досліджуваної фізичної величини. Якщо істинне значення відоме, то не має потреби проводити і саме вимірювання. Але істинне значення, як правило, невідоме. Тому **мета вимірювання** полягає в тому, щоб визначити невідоме з самого початку значення фізичної величини і знайти, якщо не істинне її значення, то хоча б значення, яке б відрізнялося від нього якомога менше. Тому формули (1) і (2), що визначають величину похибок, для практичного використання не придатні.

Нижче буде розглянуто як правильно будувати методику експерименту, використовувати одержані дослідні дані для того, щоб знайти досить близькі до істинних значення фізичних величин і оцінити похибки вимірювань.

## 2. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

В задачу прямого вимірювання входить визначення середнього значення вимірюваної величини з врахуванням поправки на систематичну похибку, а також обчислення випадкової похибки, похибки приладу і заокруглення. Розглянемо порядок обробки результатів прямих вимірювань на конкретному прикладі.

Нехай треба виміряти електрорушійну силу (е.р.с.) джерела постійного струму, наприклад акумулятора, з внутрішнім опором  $r=1 \text{ Ом}$ . Попередні вимірювання показали, що  $\varepsilon=12 \text{ В}$ . Для вимірювання вибраний вольтметр магнітоелектричної системи з межею вимірювання  $U_m=15 \text{ В}$ , класу точності 0,5, з внутрішнім опором  $R=1500 \text{ Ом}$ .

**3.1 Визначення випадкових похибок** Якщо три-чотири пробних вимірювання показують різні результати, то це означає, що в даному досліді присутні випадкові похибки, для розрахунку яких необхідно виконати досить велике число вимірювань (10÷15). Ряд значень, одержаних в результаті таких вимірювань, записують в таблицю (табл.2.1).

**Порядок обчислень:**

1. Знаходять середнє арифметичне:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 12,120 \text{ В}$$

2. Знаходять абсолютні похибки окремих вимірювань:

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \bar{\varepsilon}$$

Результати обчислень заносяться в таблицю 2.1.

**Таблиця 2.1** Результати вимірювання е.р.с. акумулятора

№ п/п	$\varepsilon_i, \text{В}$	$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \bar{\varepsilon}, \text{В}$	$(\Delta \varepsilon_i)^2, \text{В}$
1.	12,10	-0,02	0,0004
2.	12,05	0,07	0,0049
3.	12,05	0,07	0,0049
4.	12,15	+0,03	0,0009
5.	12,20	0,08	0,0064
6.	12,10	-0,02	0,0004
7.	12,25	+0,13	0,0169
8.	12,10	-0,02	0,0004
9.	12,05	0,07	0,0049
10.	12,15	+0,03	0,0009

$$\varepsilon_i = 12,120 \quad \sum_{i=1}^{10} \Delta \varepsilon_i = 0 \quad \sum_{i=1}^{10} (\Delta \varepsilon_i)^2 = 0,0410$$

3. Перевіряється правильність обчислень випадкових відхилень і симетричність розподілу. Для цього необхідно перевірити чи близька до нуля алгебраїчна сума  $\sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_i$ . Якщо вона істотно відрізняється від нуля, то **необхідно**

**збільшити кількість вимірювань.** В нашому випадку  $\sum_{i=1}^{10} \Delta \varepsilon_i = 0$ .

4. Визначається середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$S(\bar{\varepsilon}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_i)^2} = 0,022 \text{ В} \quad (3)$$

5. З таблиці 2.2 вибирається значення коефіцієнту Стюдента  $t_{\alpha, n}$  для заданої або вибраної імовірності (надійності). Наприклад, при  $P=0,95$  і  $n=10$   $t_{p, n} = t_{0,95, 10} = 2,26$ .

Випадкова похибка вимірювань обчислюється за формулою:

$$\Delta \varepsilon = t_{pn} \cdot S(\bar{\varepsilon}) = 2,3 \cdot 0,022 = 0,051 \text{ В} \quad (4)$$



Таблиця 2.2 Значення коефіцієнтів Стюдента  $t_{p,n}$

$n \backslash P$	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
2	6,31	12,71	31,82	63,66	636,62
3	2,92	4,30	6,96	9,92	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,36	4,03	6,86
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,36	3,00	3,50	5,40
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78

### 3.2 Оцінка похибок вимірювального приладу

Як відмічалось, гранична похибка приладу  $\Delta \varepsilon_{\text{пр}}$  вказується в його паспорті, або на шкалі приладу. Якщо відомий клас точності приладу (у нашому випадку клас точності рівний 0,5), то граничну похибку приладу можна визначити через зведену похибку:

$$\Delta \varepsilon_{\text{пр}} = \gamma \cdot X_N / 100 = 0,5 \cdot 15 / 100 = 0,075B \quad (5)$$

Під похибкою приладу  $\Delta \varepsilon_{\text{пр}}$  розуміють половину інтервалу, всередині якого може бути поміщена вимірювана величина з імовірністю  $P=0,997$ .

Хоча похибка приладу є систематичною, але, в зв'язку з відсутністю інформації про природу цієї похибки, її можна розглядати і враховувати при обчисленнях як випадкову. Наприклад, у приладів з відомим класом точності фактична похибка може бути різною за величиною і знаком, але, звичайно, не більшою ніж обчислена за формулою.

Для довільної імовірності (надійності)  $P$  абсолютна похибка, що вноситься приладом, може бути обчислена за формулою:

$$\Delta \varepsilon_{\text{пр}}(P) = t_p \cdot (\Delta \varepsilon_{\text{пр}} / 3) \quad (6)$$

де  $t_p$  – коефіцієнт, що визначається з таблиці 2.3,  $P$  – імовірність попадання випадкової похибки у заданий інтервал.

Таблиця 2.3 Значення  $t_p$  при заданих значеннях довірчої імовірності

$P(t)$	$t$	$P(t)$	$t$
0.50	0.675	0.99	2.576
0.70	1.036	0.995	2.807
0.80	1.282	0.999	3.291
0.85	1.440	0.9999	3.891
0.90	1.645	0.99999	4.417
0.95	1.960	0.999999	5.327

При обчисленні похибок будь-якого типу, що впливають на результат, доцільно вибирати довірчу імовірність однаковою і рівною  $P=0,95$ :

$$\Delta \varepsilon_{\text{пр}}(P) = 2 \cdot \frac{0,075}{3} = 0,050B \quad (7)$$

Слід відмітити, що фактична похибка приладу може бути меншою в порівнянні з обчисленою і її можна враховувати коректно, якщо є градууюча крива даного приладу, або є взірцевий прилад.

### 3.3 Похибка заокруглення

В тих випадках, коли результати показів заокруглюються до цілих поділок або до долі поділок (лінійка, мікрометр, електровимірювальні прилади), а також при користуванні ноніусом або цифровими приладами, виникає випадкова похибка (*похибка заокруглення*), яка має, як правило, рівномірний розподіл. При цьому максимальна похибка не перевищує величини  $\frac{h}{2}$ , де  $h$  – називають *інтервалом заокруглення*. Інтервал заокруглення  $h$  може дорівнювати ціні поділки приладу, якщо підрахунок ведеться з точністю до цілих поділок, половині ціни поділки, якщо підрахунки заокруглюються до половини поділки і т.д.

Абсолютною похибкою заокруглення називають величину:

$$\Delta \varepsilon_{\text{заокр}} = P \cdot \frac{h}{2} \quad (8)$$

В розглянутому нами прикладі відлік проводився з точністю до 0,5 поділки, ціна поділки вольтметра дорівнювала 0,1В.

Визначимо похибку заокруглення:

$$\Delta \varepsilon_{\text{заокр}} = 0,95 \cdot \frac{0,1}{2} = 0,048B \quad (9)$$

Обчислимо повну похибку вимірювань:

$$\Delta \varepsilon_p = \sqrt{(\Delta \varepsilon)^2 + (\Delta \varepsilon_p)^2 + (\Delta \varepsilon_{\text{заокр}})^2} = \sqrt{(0,051)^2 + (0,050)^2 + (0,048)^2} = 10^{-2} \sqrt{26,0 + 25,0 + 23,1} = 10^{-2} \sqrt{74,1} = 0,086 \approx 0,09B \quad (10)$$

Врахуємо систематичну похибку, зв'язану з методикою вимірювання е.р.с. В нашому випадку така систематична похибка може виникнути від того, що вольтметр вимірює не е.р.с., а спад напруги на власному опорі. Величину поправки, тобто різницю  $IR - \varepsilon$  можна оцінити, використавши закон Ома для замкнутого кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R}, \quad IR = \frac{\varepsilon \cdot R}{r + R}$$

$$IR - \varepsilon = \frac{\varepsilon R}{r + R} - \varepsilon = \varepsilon \left( \frac{r}{R + r} \right) \approx \frac{12 \cdot 1}{1500 + 1} \approx 0,008B$$

Знайдена поправка складає менше 0,1 повної квадратичної похибки вимірювання, тому нею можна знехтувати.



### Висновок

Результат вимірювань запишемо у виді:

$$\varepsilon = (12,12 \pm 0,09) \text{ В при } P = 0,95$$

### Зауваження

1. При обчисленні результуючої (сумарної похибки) за формулою (10) можна знехтувати будь-якою з складових  $\Delta_{\varepsilon}, \Delta_{np}, \Delta_{заокр}$ , якщо її величина в два-три рази менше будь-якої іншої похибки. Більше того, якщо три-чотири попередні досліди показують, що випадкова похибка не проявляється (при повторних вимірюваннях отримується один і той же результат), то наступні вимірювання слід припинити і обчислити тільки  $\Delta_{np}$  та  $\Delta_{заокр}$ .  
Взагалі, при постановці наукового експерименту прагнуть підібрати такі засоби вимірювання, для яких похибка приладу і похибка заокруглення порівняно малі.
2. При роботі з лінійками  $\Delta_{np}$  враховувати не можна, а інтервал заокруглення може складати цілу або частину, наприклад, половину, четвертину ціни поділки в залежності від якості її виготовлення.
3. Якщо на штангенциркулі вигравірувано «0.1 мм», то слід вважати  $\delta = h = 0,1 \text{ мм}$ ; якщо – «0.05 мм» то  $\delta = h = 0,05 \text{ мм}$ .
4. Для мікрометра (0.05 мм) і  $\delta = h = 0,01 \text{ мм}$ .

### 3. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

З непрямыми вимірюваннями ми зустрічасмося в тих випадках, коли фізична величина  $y$ , яка нас цікавить, не може бути виміряна безпосередньо, а представляється деякою функцією величин  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , що визначаються з експерименту:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (11)$$

Для фізичного експерименту представляє інтерес значення функції  $y$ , обчислене для середніх значень аргументів, тобто величина

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N), \quad (12)$$

яка, очевидно, буде шуканою величиною.

У зв'язку з тим, що ця величина також є випадковою, задача (як і у випадку прямих вимірювань) полягає у визначенні того з якою імовірністю величина  $y$  попаде в той чи інший інтервал.

Півширина довірчого інтервалу для функції  $y$  визначається за формулами:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N}\right)^2 \Delta x_N^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \Delta x_i^2}, \quad (13)$$

або

$$\Delta y = y \sqrt{\left[\frac{\partial(\ln f)}{\partial x_1}\right]^2 \Delta x_1^2 + \left[\frac{\partial(\ln f)}{\partial x_2}\right]^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left[\frac{\partial(\ln f)}{\partial x_N}\right]^2 \Delta x_N^2} = y \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial(\ln f)}{\partial x_i}\right]^2 \Delta x_i^2}, \quad (14)$$

де  $\Delta x_i$  – абсолютні похибки прямих вимірювань величин  $x_1, x_2, \dots, x_N$  і обчислюються за правилами, що викладені вище;  $\frac{\partial f}{\partial x_i}, \frac{\partial(\ln f)}{\partial x_i}$  – частинні похідні відповідних функцій по аргументах  $x_1, x_2, \dots, x_N$ .

Похідні  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  і похибки  $\Delta x_i$  обчислюються в околі точки  $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)$ . При обчисленні похибок прямих вимірювань кожне з  $\Delta x_i$  знаходять при одному і тому ж значенні довірчої імовірності  $P$ . Імовірність того, що шукане значення величини  $y$  накривається довірчим інтервалом  $\bar{y} - \Delta y \leq y \leq \bar{y} + \Delta y$ , також вважається рівним  $P$ .

Якщо змінні  $x_i$  входять в функцію  $y$  в вигляді їх добутку, або добутку степеневих функцій, то формула (18) завжди приводить до наступного результату:

$$\frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)^2} \quad (15)$$

де  $\frac{\Delta x_i}{x_i}$  і  $\frac{\Delta y}{y}$  представляють собою відносні похибки. В названому випадку

простіше обчислити спочатку відносну похибку  $\frac{\Delta y}{y}$ , а потім абсолютну  $\Delta y$ .

### Приклад

З досліду по осадженню міді на електродах при електролізі розчину мідного купоросу можна визначити заряд електрона за формулою:

$$e = \frac{A \cdot I \cdot t}{z \cdot N \cdot M} \quad (16)$$

В цьому виразі  $A = 63,57 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$  – молекулярна маса міді;  $N = 6,023 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$  – число Авогадро;  $z = 2$  – валентність міді;  $I$  – сила струму (А);  $t$  – час (с) проходження струму через розчин;  $M$  – маса (кг) міді, що виділилась на електроді.

Величини  $I, M, t$  визначаються в процесі експерименту безпосередньо. Допустимо, що вимірювання проводились один раз. Сила струму підтримувалась рівною  $I = 1 \text{ А}$  і вимірювалась амперметром з ціною поділки  $0,01 \text{ А}$ , класом точності 0,5 і шкалою від 0 до 1 А. Час електролізу ( $30 \text{ хв} = 1800 \text{ с}$ ) вимірювався за допомогою секундоміру з ціною поділки 0,1 с. Маса міді, що



вділилась на електроді ( $M=580 \text{ мг}$ ) визначалась на вагах і найменша різноважка була  $20 \text{ мг}$ . Підставляючи дані вимірювань у формулу, одержимо:

$$e = \frac{63,57 \cdot 1 \cdot 1800}{2 \cdot 6,023 \cdot 10^{26} \cdot 580 \cdot 10^{-6}} = 1,64 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Обчислимо похибку вимірювання заряду. Для цього спочатку прологарифмуємо вираз для заряду (16):

$$\ln e = \ln A + \ln I + \ln t - \ln z - \ln N - \ln M \quad (17)$$

Знайдемо частинні похідні:

$$\frac{\partial(\ln e)}{\partial I} = \frac{1}{I}; \quad \frac{\partial(\ln e)}{\partial t} = \frac{1}{t}; \quad \frac{\partial(\ln e)}{\partial M} = -\frac{1}{M} \quad (18)$$

Числа  $A$  і  $N$  вважаємо постійними, так як їх завжди можна взяти з достатнім числом знаків.

З (18) слідує:

$$\Delta e = e \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2} \quad (19)$$

Обчислимо похибку вимірювання струму ( $P=0,95$ ) амперметром:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{t_{0,95} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{np}}{I}}{I} = \frac{t_{0,95} \cdot \frac{\gamma \cdot I_m}{3 \cdot 100}}{I} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 1}{3 \cdot 100} = 0,003.$$

Випадкова похибка і похибка вимірювання в даному досліді дуже малі так як вважається, що експериментатор сам встановив стрілку амперметра на поділку « $1A$ », а що операцію можна виконати досить точно. Якщо струм був нестабільним, то експериментатор повинен за час дослід заресструвати достатньо велику кількість відліків значень  $I$  і визначити випадкову похибку, як описано вище.

Правда, точність включення і виключення секундоміра цілком залежить від експериментатора. Однак, якщо похибку визначення часу оцінити навіть в  $1-2 \text{ сек}$ , то відносна похибка мала в порівнянні з похибкою визначення струму. Тому похибкою визначення часу нехтуємо.

Маса визначається заокругленням  $M$  до  $20 \text{ мг}$ , тобто:

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{0,95 \cdot \frac{20}{2}}{580} = \frac{9,5}{580} = 0,016$$

Таким чином, похибка вимірювання маси в нашому випадку є значною.

Тоді

$$\frac{\Delta e}{e} = 0,016; \quad \Delta e = 1,64 \cdot 10^{-19} \cdot 0,016 = 0,03 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

**Висновок:**

$$e = (1,64 \pm 0,03) 10^{-19} \text{ Кл}$$

#### 4 ЗАПИС, ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ЗОБРАЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Для отримання достовірних результатів при проведенні експериментальних досліджень велике значення мають повні, чіткі та грамотні записи одержаних результатів досліджень. У звіті повинні бути приведені всі величини та умови проведення вимірів, які можуть впливати на результати вимірювань. Доцільно попередньо розробити таблицю для занесення у неї необхідних дослідних даних та результатів розрахунків. Первинні дані представляють цінність тільки у випадку коли за ними можна прослідкувати та зрозуміти весь хід дослід та умови, у яких він проводився. У багатьох випадках для більшої наочності, на основі таблиць складають графіки залежностей величин, які спостерігаються, від експериментально змінних величин (аргументів).

Після статистичної обробки табличного матеріалу, знаходження найбільш придатного виду графіка, оцінки похибок та достовірності даних складають кінцеві таблиці та графіки, які повинні містити у собі первинні спостереження та результати їх обробки. Графічне зображення результатів спостережень дозволяє легко знайти необхідні дані, виявити екстремуми, швидкість зміни досліджуваних величин, їх періодичність та інші характеристики.

Важливим для правильного графічного зображення даних та зручності у користуванні є правильний вибір найоптимальнішого масштабу на осях координат. При цьому необхідне дотримання наступних правил:

1. На осі абсцис відкладають незалежні змінні.
2. Отримана крива повинна яконайбільш наближатися до прямої лінії. Масштаби на відповідних координатних осях можуть бути не лише лінійними, але й логарифмічними, степеневими, дробовими, виражатися складними багаточленними функціями тощо.
3. Масштаби доцільно вибирати такими, щоб результуюча крива займала все поле графіка. Розміри графіків та осей повинні бути такими, щоб похибка вимірювання відповідала на графіку  $1-2$  найменшим поділкам масштабу.
4. Масштаби на осях абсцис та ординат повинні забезпечити приблизне розташування графіка під кутом  $45^\circ$  до осей координат.
5. Відлік на осях координат необов'язково повинен починатися з нульових значень.

У всіх випадках обробки експериментальних даних необхідно мати на увазі, що процес, який досліджується, може протікати як плавно, так і мати різкі, раптові зміни. Графічно такі процеси виражаються однією або декількома кривими, послідовно з'єднаними плавними лініями.

При проведенні кривих необхідно користуватися наступними правилами:

- 1) крива повинна бути плавною з малою кількістю перегинів;
- 2) крива повинна проходити, наскільки це можливо, максимально близько до всіх точок;
- 3) крива необов'язково повинна проходити через кожну точку, зокрема через початкову та кінцеву;
- 4) крива не повинна мати розриви, самопересікання або інші неясності, що не піддаються поясненню.



Таблиця 1. Фундаментальні фізичні константи

Фізична величина	Символ	Значення
Універсальна гравітаційна постійна	$G$	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Швидкість світла у вакуумі	$c$	$2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Атомна одиниця маси	$a.o.m.$	$1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Число Авогадро	$N_A$	$6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Газова постійна	$R$	$8,3144 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$
Постійна Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Об'єм одного моля ідеального газу при нормальних умовах	$V_0$	$22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Заряд електрона	$e$	$1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса спокою електрона	$m_e$	$9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Електрична постійна	$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постійна в законі Кулона	$k$	$8,9875 \cdot 10^{-9} \text{ Нм}^2/\text{Кл}^2$

Таблиця 2. Густина речовини  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

Гази при нормальних умовах ( $T_0 = 273,15\text{К}$ ; $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ )		
Азот	1,250	Кисень 1,429
Водень	0,089	Метан 0,717
Вуглекислий газ	1,977	Неон 0,900
Гелій	0,178	Повітря 1,293
Рідини		
Бензол ( $t=20^\circ\text{C}$ )	879	Рицинова олія ( $t=0^\circ\text{C}$ ) 950
Вода ( $t=40^\circ\text{C}$ )	1000	Спирт етиловий ( $t=0^\circ\text{C}$ ) 789
Вода ( $t=100^\circ\text{C}$ )	958	Спирт метиловий ( $t=0^\circ\text{C}$ ) 792
Гас ( $t=0^\circ\text{C}$ )	800	Толуол ( $t=18^\circ\text{C}$ ) 870
Гліцерин ( $t=0^\circ\text{C}$ )	1260	Ртуть ( $t=0^\circ\text{C}$ ) 13596
Тверді тіла ( $T = 293\text{К}$ )		
Алюміній	$2,69 \cdot 10^3$	Олово лите $7,23 \cdot 10^3$
Залізо хімічно чисте	$7,86 \cdot 10^3$	Сталь літа $(7,7-8,0) \cdot 10^3$
Латунь	$(8,3-8,7) \cdot 10^3$	Свинець $(11,22-11,44) \cdot 10^3$
Лід ( $t=0^\circ\text{C}$ )	$0,91 \cdot 10^3$	Срібло $(10,42-10,57) \cdot 10^3$
Мідь електролітична	$(8,88-8,96) \cdot 10^3$	Цинк $(6,86-7,24) \cdot 10^3$
Нікель	$(8,4-9,2) \cdot 10^3$	Чавун $(6,6-7,3) \cdot 10^3$

Таблиця 3. Деякі фізичні параметри газів

Температурний коефіцієнт тиску  $\beta$ ,  $K^{-1}$ ; питома теплоємність  $C_p$  при  $0^\circ\text{C}$ , Дж/(кгК); коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  при  $0^\circ\text{C}$ , Вт/(мК); коефіцієнт внутрішнього тертя  $\eta$  при  $0^\circ\text{C}$ , Па·с

Газ	$\beta$	$C_p$	$C_p/C_V$	$\lambda$	$\eta$
Азот $N_2$	$3,674 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^3$	1,40	$2,39 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$
Водень $H_2$	$3,662 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^4$	1,40	0,169	$0,84 \cdot 10^{-3}$
Вуглекислий газ $CO_2$	$3,726 \cdot 10^{-3}$	848	1,30	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-3}$
Гелій $He$	$3,660 \cdot 10^{-3}$	5240	1,66	0,143	$1,89 \cdot 10^{-3}$
Кисень $O_2$	$3,674 \cdot 10^{-3}$	913	1,40	$0,245 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$
Повітря сухе*	$3,674 \cdot 10^{-3}$	1011	1,40	$0,241 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$

\* Склад повітря за об'ємом: 78,03%  $N_2$ , 20,99%  $O_2$ , 0,933%  $Ar$ , 0,03%  $CO_2$ , 0,01%  $H_2$ , 0,018%  $He$  та ін.

Таблиця 4. Деякі фізичні характеристики рідин

Коефіцієнт поверхневого натягу  $\alpha$  на межі «рідина-повітря» при  $20^\circ\text{C}$ , Н/м; коефіцієнт внутрішнього тертя  $\eta$  при  $20^\circ\text{C}$ , Па·с; коефіцієнт об'ємного розширення  $\beta$  при  $20^\circ\text{C}$ ,  $K^{-1}$ ; точка кипіння  $t_k$ ,  $^\circ\text{C}$  при  $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; питома теплота пароутворення при точках кипіння  $r$ , Дж/кг; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  при  $20^\circ\text{C}$ , Вт/(мК);

Рідина	$\alpha$	$\eta$	$\beta$	$t_k$	$r$	$\lambda$
Вода	$7,26 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	100,0	$2,26 \cdot 10^4$	0,6
Гліцерин	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	290,0	—	0,29
Олія рицинова	$3,64 \cdot 10^{-2}$	0,97	—	—	—	—
Ртуть	0,5	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	356,7	$2,85 \cdot 10^5$	9,08
Спирт етиловий	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	78,3	$8,57 \cdot 10^5$	0,17

Таблиця 5. Деякі теплофізичні характеристики твердих тіл

Температурний коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha$ ,  $K^{-1}$  в межах  $(0-100)^\circ\text{C}$ ; питома теплоємність  $c$ , Дж/(кгК) при  $18^\circ\text{C}$ ; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  при  $18^\circ\text{C}$ , Вт/(мК); температура плавлення  $t_{пл}$ ,  $^\circ\text{C}$ ; питома теплота плавлення  $r$ , Дж/кг;

Матеріал	$\alpha$	$c$	$\lambda$	$t_{пл}$	$r$
Алюміній	$2,38 \cdot 10^{-5}$	920	200,6	660	$3,8 \cdot 10^5$
Залізо	$1,21 \cdot 10^{-5}$	460	58,5	1539	$2,7 \cdot 10^5$
Лід	$5,1 \cdot 10^{-5}$	2090	2,5	0	$3,35 \cdot 10^5$
Мідь	$1,67 \cdot 10^{-5}$	380	384	1083	$1,8 \cdot 10^5$
Парафін	$(1,1-4,1) \cdot 10^{-4}$	3200	0,21	38-56	$1,5 \cdot 10^5$
Свинець	$2,93 \cdot 10^{-5}$	120	34,7	327	$2,5 \cdot 10^5$
Срібло	$1,97 \cdot 10^{-5}$	250	422,2	961	$8,8 \cdot 10^4$



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навч. посібник: У 2 кн. – Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001. – 448 с.
2. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навч. посібник: У 2 кн. – Кн.2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001. – 424 с.
3. Детлаф А.А., Яворський Б.М. Курс фізики. – М.: Высшая школа, 1989. – 606 с.
4. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика. – К.: Вища школа, 1987.
5. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1985.
6. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1976.
7. Король А.В., Андріяшик М.В. Фізика: Підр. для студентів вищих технічних навчальних закладів. – К.: Фірма «Інкос», 2006. – 344 с.
8. Лабораторные занятия по физике: Учеб. пособие / Под ред. Гольдина Л.Л. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1983. – 704 с.
9. Савельев И.В. Курс физики. – М.: Наука, 1989. – 415 с.
10. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1985. – 478 с.
11. Фізичний практикум. Ч.1 / Під заг. ред. Дущенко В.П. – К.: Вища школа, 1981. – 248 с.

Підписано до друку 19.02.08 Формат 60x84/16. Умовн. друк. арк. 3,95  
Облік.-вид.арк. 5,98 Друк офсетний. Зам. № 23 Наклад 200

Видавництво УжНУ «Говерла»  
м. Ужгород, вул. Капітульна, 18.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру видавців, виготовників  
і розповсюджувачів видавничої продукції – Серія 3т №32

105