



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



Т. В. Лютий, О. С. Денисова



ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ з ФІЗИКИ



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



Навчальний посібник

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Сумський державний університет

Т. В. Лютий, О. С. Денисова

Лабораторний практикум з фізики

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

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету

Суми
Сумський державний університет
2012

УДК 53(076.5)
ББК 52.818.1я7
Л 96

Рецензенти:

І. Ю. Проценко – доктор фізико-математичних наук, професор
Сумського державного університету;
О. В. Лисенко – кандидат фізико-математичних наук, доцент
Сумського державного університету

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

Лютий Т. В.

Л 96 Лабораторний практикум з фізики: для напрямку підготовки
6.040106 – екологія, охорона навколишнього середовища та зба-
лансованого природокористування: навч. посіб. / Т. В. Лютий, О.
С. Денисова. – Суми : Сумський державний університет, 2012. –
197 с.

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

УДК 53(076.5)
ББК 52.818.1я7

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

Графік виконання лабораторних робіт

I модульний цикл

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

II модульний цикл

Номер бригади	Тиждень 1	Тиждень 2	Тиждень 3	Тиждень 4	Тиждень 5	Заліковий тиждень
I	6	7	8	<i>ІЗ</i>	9	<i>ІЗ</i>
II	6	7	8	<i>ІЗ</i>	9	<i>ІЗ</i>
III	7	6	9	10	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>
IV	7	6	9	10	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>
V	8	6	7	<i>ІЗ</i>	10	<i>ІЗ</i>
VI	8	6	7	<i>ІЗ</i>	10	<i>ІЗ</i>
VII	6	8	9	10	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>
VIII	6	8	9	10	<i>ІЗ</i>	<i>ІЗ</i>

III модульний цикл

Номер бригади	Тиждень 1	Тиждень 2	Тиждень 3	Тиждень 4	Тиждень 5	Заліковий тиждень
I	11	12	13	14	13	13
II	11	12	13	14	13	13
III	12	13	13	14	11	13
IV	12	13	13	14	11	13
V	13	11	15	14	13	13
VI	13	11	15	14	13	13
VII	11	15	13	14	12	13
VIII	11	15	13	14	12	13

13 – індивідуальний захист виконаних лабораторних робіт

ЗМІСТ

Лабораторна робота 1. ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛ ПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ.....	C. 10
1. МЕТА РОБОТИ.....	10
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	10
2.1 Експеримент та обробка одержаних результатів	10
2.2 Інструменти для вимірювання лінійних розмірів тіл.....	15
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	20
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ	20
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	22
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	24
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	24
Лабораторна робота 2. ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ	25
1. МЕТА РОБОТИ.....	25
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	25
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	26
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ	27
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	30
5.1. Перевірка залежності величини прискорення від сили при сталій масі системи.....	30
5.2. Перевірка залежності величини прискорення від маси системи при сталій величині рушійної сили	32
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	33
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	34
Лабораторна робота 3. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ У ПОВІТРІ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСУ	35
1. МЕТА РОБОТИ.....	35
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	35
2.1. Поняття хвилі.....	35
2.2. Поняття звуку	37
2.3. Використання звуку у природі та техніці.....	39
2.4. Стоячі хвилі	42
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	44
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ	44
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	46
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	48
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	49

Лабораторна робота 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ В РІДИНАХ	50
1. МЕТА РОБОТИ	50
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	50
2.1. Загальні відомості про рідини.....	50
2.2. Механізм виникнення в'язкого тертя.....	51
2.3. Рух тіл у рідині. Сила Стокса.....	53
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	54
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	54
4.1. Метод Стокса для визначення коефіцієнта в'язкості	54
4.2. Визначення розмірів кульок за допомогою мікроскопа	56
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	58
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	60
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	61
 Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ МЕТОДОМ АДІАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ	 62
1. МЕТА РОБОТИ	62
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	62
2.1. Ідеальний газ	62
2.2. Адіабатний процес	66
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	66
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	66
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	69
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	71
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	72
 Лабораторна робота 6. ВИВЧЕННЯ ЕНТРОПІЇ СИСТЕМИ У НЕОБОРОТНОМУ ПРОЦЕСІ	 73
1. МЕТА РОБОТИ	73
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	73
2.1. Термодинамічний зміст ентропії.....	73
2.2. Статистичний зміст ентропії.....	75
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	76
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	76
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	78
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	80
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	80

Лабораторна робота 7. ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ І ВПЛИВУ НА НЬОГО ПОВЕРХНЕВОАКТИВНИХ РЕЧОВИН.....	81
1. МЕТА РОБОТИ.....	81
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	81
2.1. Сутність поверхневого натягу.....	81
2.2. Сила поверхневого натягу.....	84
2.3. Явища змочування та незмочування.....	85
2.4. Капілярні явища.....	87
2.5. Поверхнево-активні речовини.....	88
2.6. Класифікація ПАР.....	90
2.7. Вплив ПАР на екологію.....	92
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	93
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	93
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	94
5.1. Визначення коефіцієнту поверхневого натягу.....	94
5.2. Визначення поверхневої активності ПАР.....	98
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	100
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	101
Лабораторна робота 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	102
1. МЕТА РОБОТИ.....	102
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	102
2.1. Постійний струм. Основні поняття.....	102
2.2. Суть методу компенсації.....	103
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	105
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	106
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	106
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	109
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	110
Лабораторна робота 9. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ.....	111
1. МЕТА РОБОТИ.....	111
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	111
2.1. Поняття магнітного поля.....	111
2.2. Магнітне поле Землі.....	112
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	114
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	115
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	118
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	121
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	122

Лабораторна робота 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛА.....	123
1. МЕТА РОБОТИ	123
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	123
2.1. Явище поляризації.....	123
2.2. Подвійне променезаломлення	124
2.3. Обертання площини поляризації.....	127
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	129
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ	129
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	133
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	134
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	135
Лабораторна робота 11. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО	
ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	136
1. МЕТА РОБОТИ	136
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	136
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	141
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ	141
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	144
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	146
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	147
Лабораторна робота 12. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО	
ФОТОЕФЕКТУ	148
1. МЕТА РОБОТИ	148
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	148
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	151
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ	151
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	153
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	156
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	157
Лабораторна робота 13. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИДИМОГО СПЕКТРА	
АТОМАРНОГО ВОДНЮ	158
1. МЕТА РОБОТИ	158
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	158
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	163
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ	163
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	166
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	168
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	169

Лабораторна робота 14. ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ДІЇ ЕЛЕКТРОННОГО МІКРОСКОПА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ДЕ БРОЙЛЯ ЕЛЕКТРОНА	170
1. МЕТА РОБОТИ.....	170
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	170
2.1. Хвильові властивості речовини.....	170
2.2. Електронний мікроскоп.....	172
2.3. Електронографія.....	175
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	178
4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	178
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	180
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	181
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	182

Лабораторна робота 15. ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	183
1. МЕТА РОБОТИ.....	183
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	183
2.1. Радіоактивність.....	183
2.2. Дія радіоактивного випромінювання на біологічні об'єкти.....	185
2.3. Закон Бугера.....	188
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	189
4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	189
4.1. Лічильник Гейгера-Мюллера.....	189
4.2. Методика визначення коефіцієнта поглинання.....	191
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	192
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	195
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	195

Лабораторна робота 1

ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛ ПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

1. МЕТА РОБОТИ

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

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Експеримент та обробка одержаних результатів

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

де a_H – верхня межа вимірювання приладу.

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

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

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

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

Середньоквадратичним відхиленням окремого вимірювання називається величина

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

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

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

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

У той самий час

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

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

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

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

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

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

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

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

Абсолютна похибка непрямих вимірювань визначається як

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2. Інструменти для вимірювання лінійних розмірів тіл

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

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

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

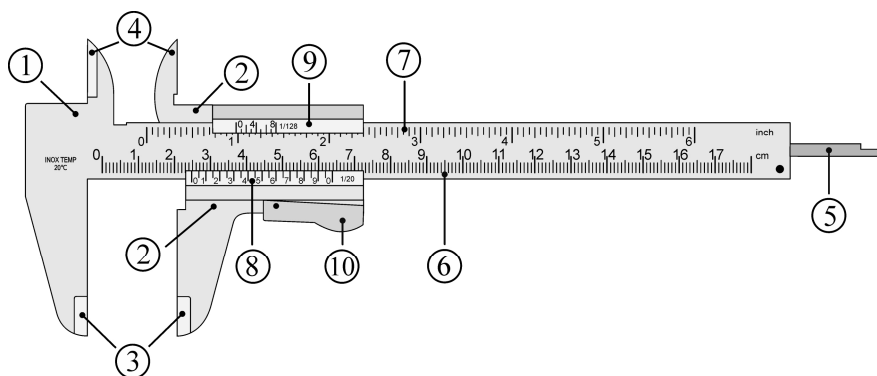


Рисунок 1 – Будова штангенциркуля: 1 – штанга; 2 – рухома рамка; 3 – зовнішні губки для вимірювання зовнішніх розмірів; 4 – внутрішні губки для вимірювання внутрішніх розмірів; 5 – щуп для вимірювання глибини; 6 – основна шкала, см; 7 – основна шкала, дюймів; 8 – ноніус для визначення десятих частин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

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

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

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

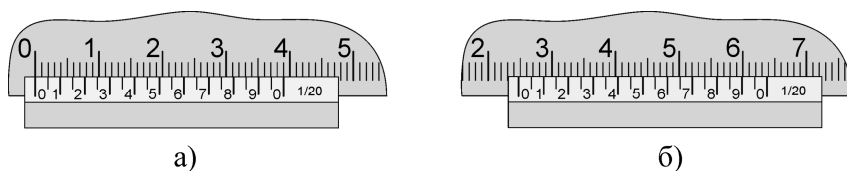


Рисунок 2 – Шкала ноніуса у нульовому (а) та ненульовому (б) положеннях

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

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

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

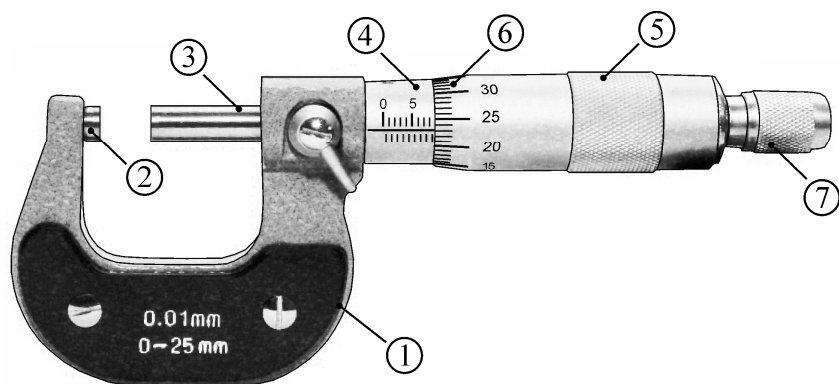


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд та будова мікрометра: 1 – сталева скоба; 2 – опорна п'ята; 3 – мікрометричний гвинт; 4 – гільза з внутрішнім різьбленням; 5 – барабан; 6 – додаткова шкала; 7 – ручка тріскачки

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

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

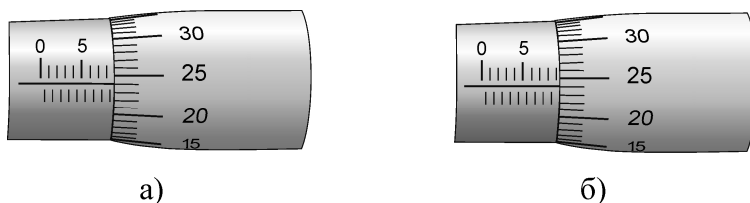


Рисунок 4 – Щодо зчитування результатів вимірювання зі шкали мікрометра

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



Рисунок 5 – Зовнішній вигляд мікрометра з цифровим дисплеєм

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

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

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

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

де Δm_C , ΔD , Δh – абсолютні похибки вимірювань маси, діаметра та висоти відповідно. Для паралелепіпеда похибка становитиме

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

де Δm_P , Δa , Δb , Δc – абсолютні похибки вимірювань маси, довжини, ширини та висоти паралелепіпеда.

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

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

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

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

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

Таблиця 1 – Результати вимірювань

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

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

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

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

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

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

На оцінку “добре”

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

На оцінку “відмінно”

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

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

Лабораторна робота 2

ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

1. МЕТА РОБОТИ

Експериментально перевірити справедливість другого закону Ньютона за допомогою машини Атвуда.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

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

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

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

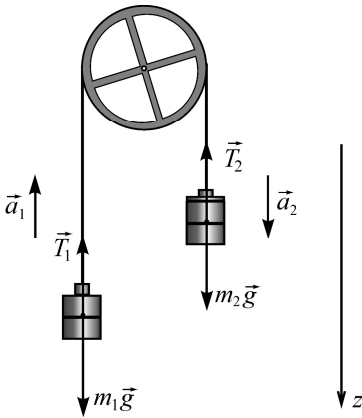
$$\begin{cases} m_1\vec{g} + \vec{T}_1 = m_1\vec{a}_1, \\ m_2\vec{g} + \vec{T}_2 = m_2\vec{a}_2. \end{cases} \quad (4)$$

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

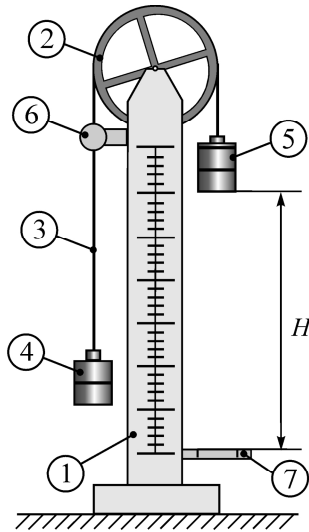
$$a = \frac{g(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}. \quad (5)$$

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

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



a)



б)

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

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

За рахунок зміни енергії ΔW_p вантажі m_1 , m_2 та блок набули кінетичної енергії

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Детально з будовою машини Атвуда можна ознайомитися за допомогою схеми на рисунку 1б. Процедура вимірювання часу автоматизована. Зі стартом відліку електронного секундоміра електромагнітний затискач 6 відпускає нитку 3, і таким чином починається рух. Щойно спрацьовує фотоелемент приймального столика 7, секундомір автоматично зупиняє відлік, а затискач 6 затискає нитку 3 та припиняє подальший рух.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

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

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

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

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

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

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

15. Результати обчислень занесіть до таблиці 1.

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

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

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

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

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

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

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

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

На оцінку “добре”

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

На оцінку “відмінно”

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

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

Лабораторна робота 3

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ У ПОВІТРІ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСУ

1. МЕТА РОБОТИ

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

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Поняття хвилі

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

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

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

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

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

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

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

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

де ξ – зміщення з положення рівноваги елемента середовища в точці з координатою x у момент часу t ; ξ_0 – амплітуда хвилі; ω – циклічна частота ($\omega = 2\pi/T$);

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

– хвильове число; α – початкова фаза.

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

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

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

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

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

де ρ – об'ємна густина пружного середовища.

Швидкість поширення пружних хвиль у газах визначається як

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

де ρ – густина газу; p – його тиск; γ – показник адіабати. З урахуванням рівняння Менделєєва-Клапейрона

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

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

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

2.2. Поняття звуку

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

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

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

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

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

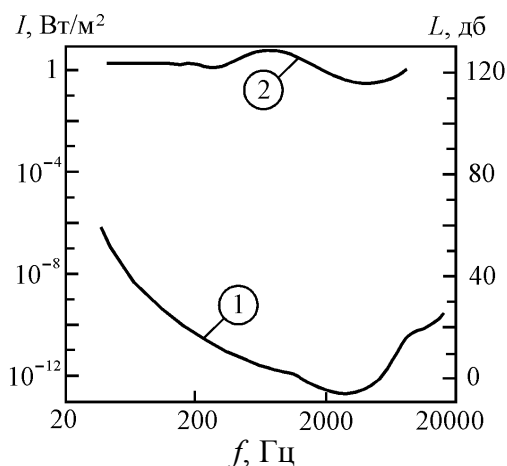


Рисунок 1 – Усереднені слухові характеристики людського вуха: 1 – поріг чутності; 2 – поріг больового відчуття

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

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

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

2.3. Використання звуку у природі та техніці

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.4. Стоячі хвилі

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

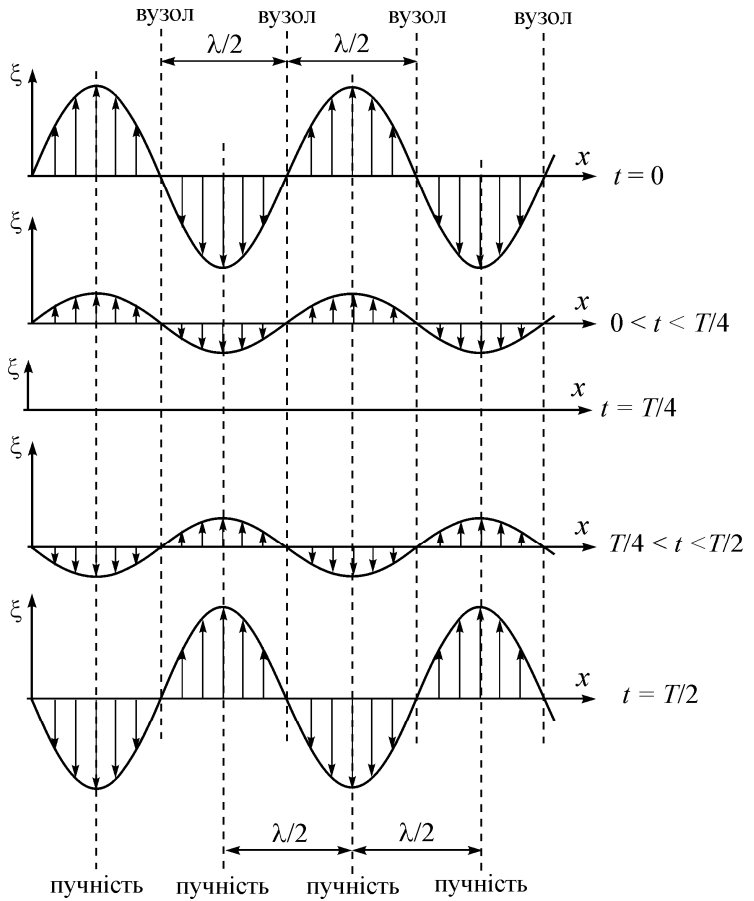


Рисунок 2 – “Моментальні фотознімки” ($t = \text{const}$) стоячої хвилі для різних фаз

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

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

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

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

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

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

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

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

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

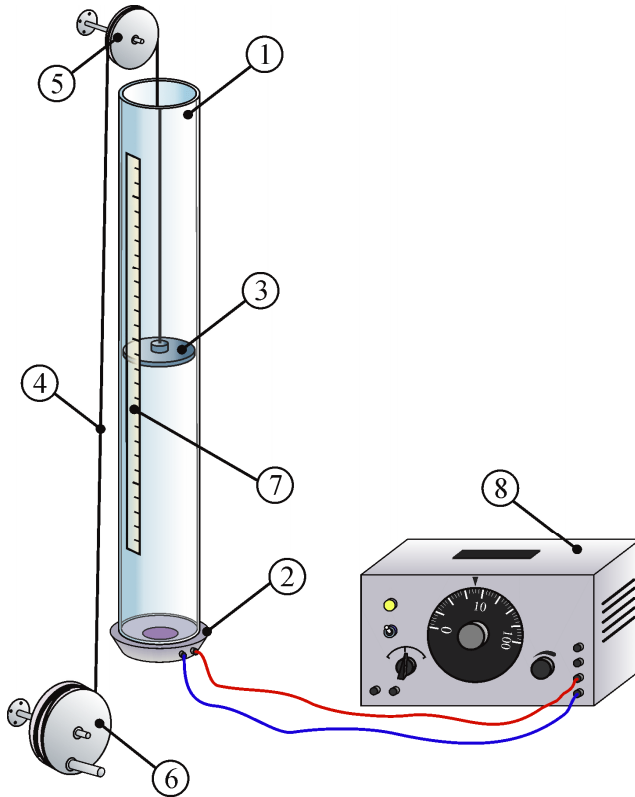


Рисунок 3 – Схематичне зображення експериментальної установки: 1 – скляна труба; 2 – дифузор; 3 – рухомий металевий екран; 4 – нитка; 5 – блок; 6 – блок з рукояткою для намотування нитки; 7 – шкала для визначення положення екрана; 8 – звуковий генератор

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

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

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

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

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

де N_i – кількість пучностей для i -ї частоти.

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

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

Таблиця 1 – Результати вимірювань

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

$\langle \delta x_1 \rangle =$	$\lambda_1 =$	$\Delta \lambda_1 =$	$\Delta f =$	$v_1 =$	$\Delta v_1 =$
$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{Гц}$	$= \dots\dots\dots, \text{м/с}$	$= \dots\dots\dots, \text{м/с}$

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

$\langle \delta x_2 \rangle =$	$\lambda_2 =$	$\Delta \lambda_2 =$	$\Delta f =$	$v_2 =$	$\Delta v_2 =$
$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{Гц}$	$= \dots\dots\dots, \text{м/с}$	$= \dots\dots\dots, \text{м/с}$

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

$\langle \delta x_3 \rangle =$	$\lambda_3 =$	$\Delta \lambda_3 =$	$\Delta f =$	$v_3 =$	$\Delta v_3 =$
$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{м}$	$= \dots\dots\dots, \text{Гц}$	$= \dots\dots\dots, \text{м/с}$	$= \dots\dots\dots, \text{м/с}$

11. Похибки визначення швидкості звуку для кожної частоти розрахуйте як

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

де як Δf_i слід брати половину ціни поділки шкали звукового генератора. Похибка визначення довжини хвилі при цьому становить

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

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

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

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

12. Остаточне значення визначеної швидкості подайте у вигляді

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

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

14. Зробити висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

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

На оцінку “добре”

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

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

На оцінку “відмінно”

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

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ В РІДИНАХ

1. МЕТА РОБОТИ

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

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Загальні відомості про рідини

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

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

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

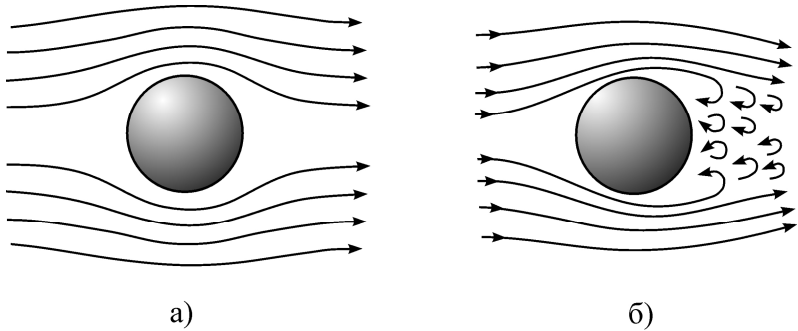


Рисунок 1 – Схематичне зображення ліній течії для ламінарного (а) та турбулентного (б) рухів

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

2.2. Механізм виникнення в'язкого тертя

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

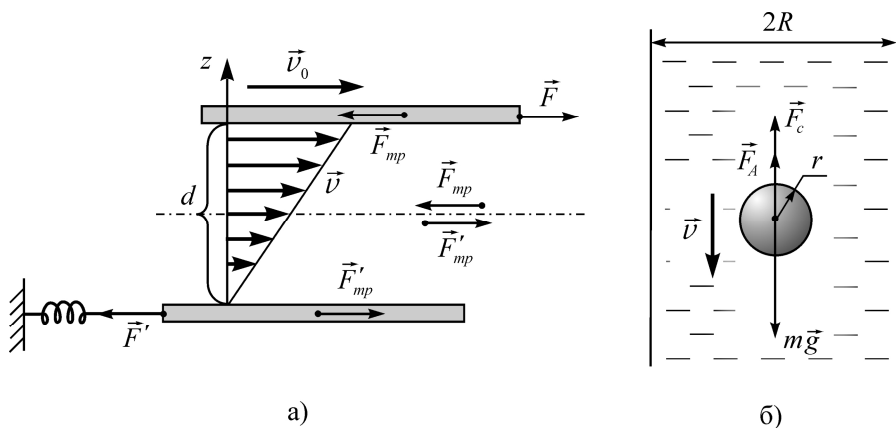


Рисунок 2 – До пояснення механізму виникнення в'язкого тертя (а); схематичне зображення руху кульки у в'язкій рідині (б)

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3. Рух тіл у рідині. Сила Стокса

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

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

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

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

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

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

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

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

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

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

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1. Метод Стокса для визначення коефіцієнта в'язкості

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

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

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

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

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

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

де ρ – густина речовини кульки і ρ_0 – густина рідини, з рівняння (7) у випадку $a = 0$ можна виразити коефіцієнт в'язкості

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

Швидкість кульки може бути визначена експериментально

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

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

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

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

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

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

4.2. Визначення розмірів кульок за допомогою мікроскопа

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

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

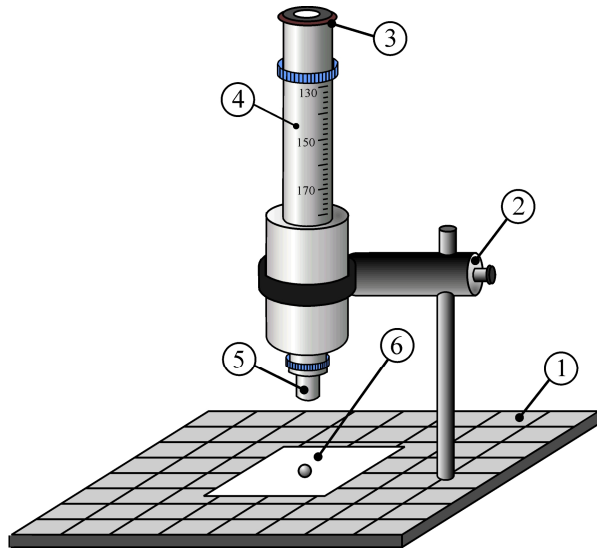


Рисунок 3 – Схематичне зображення мікроскопа: 1 – станина штатива; 2 – штатив; 3 – окуляр мікроскопа; 4 – проградуйований тубус; 5 – об’єктив; 6 – підставка з досліджуваним об’єктом

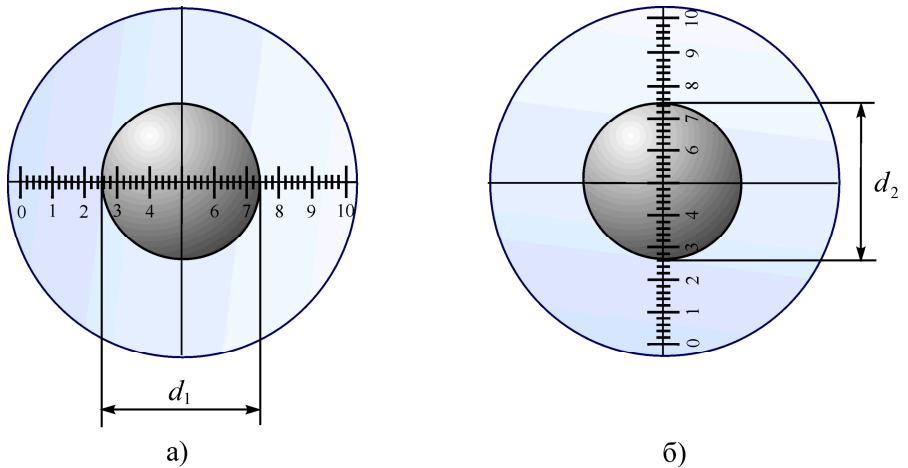


Рисунок 4 – Схематичне зображення виду в окулярі для горизонтального (а) та вертикального (б) положень шкали

Таблиця 1 – Залежність ціни поділки від висоти підняття тубуса

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

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтесь із попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Підберіть 5-7 кульок та виміряйте діаметр кожної з них за допомогою мікроскопа. При цьому діаметр слід вимірювати для двох положень шкали (див. рис. 4). Поворот шкали здійснюється обертанням окуляра 3 (див. рис. 3). Результати занесіть до таблиці 2.
3. Виміряйте відстань l від нижньої позначки на посудині до верхньої позначки, з якої швидкість руху вважається сталою, за допомогою лінійки. Результат занесіть до таблиці 2.
4. Виміряйте діаметр D посудини за допомогою лінійки. Результат занесіть до таблиці 2.
5. Запишіть у таблицю 2 значення густини речовини кульки ρ та рідини ρ_0 .
6. Запишіть у таблицю 2 значення температури T в аудиторії.
7. Підготуйте секундомір до роботи. Розмістіть кульку над центром посудини з рідиною та акуратно відпустіть її. Щойно кулька перетне першу умовну позначку, увімкніть секундомір. Щойно кулька перетне другу умовну позначку – вимкніть його. Вимірний час запишіть у таблицю 2.

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

Таблиця 2 – Результати вимірювань

№ досліду	Діаметр d , поділки		Діаметр d , мм	Час падіння t , с	η_i , Па·с	$\Delta\eta_i$, Па·с	$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta$
1	d_1						
	d_2						
	$\langle d \rangle$						
...	
5	d_1						
	d_2						
	$\langle d \rangle$						
Середнє	–		–	–	–	–	–
ρ , кг/м ³ =					ρ_0 , кг/м ³ =		
l , м =			D , мм =		T , К =		

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

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

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

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

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

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

Результат занесіть до таблиці 2.

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

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

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

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

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

На оцінку “добре”

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

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

На оцінку “відмінно”

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

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

Лабораторна робота 5

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ МЕТОДОМ АДАБАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ

1. МЕТА РОБОТИ

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

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Ідеальний газ

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

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

Відповідний теоретичний розрахунок показує, що така модель описується рівнянням

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Тоді середня енергія однієї молекули визначається як

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

де параметр i залежно від геометрії молекули визначається у наступний спосіб

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

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

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

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

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

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

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

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

де δQ – нескінченно мала кількість теплоти, передана тілу, що спричиняє зміну його температури на dT .

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

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

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

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

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

Порівняння виразів (9) та (10) дозволяє записати

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

Співвідношення (11) ще називають *формулою Масра*.

2.2. Адіабатний процес

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

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

а з урахуванням рівняння Менделєєва-Клапейрона (2) маємо

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

Застосувавши позначення

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

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

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

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

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

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

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

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

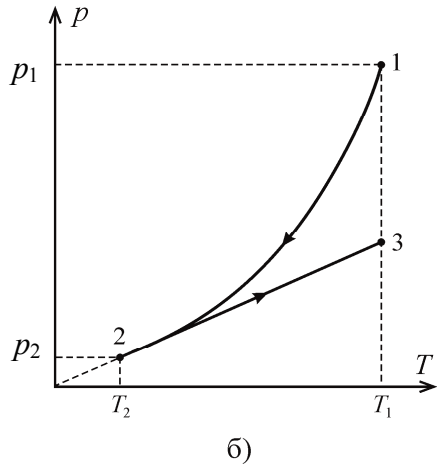
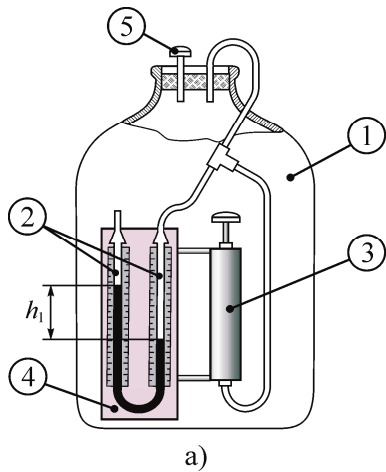


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки (а); pT -діаграма процесів, що в ній відбуваються (б)

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

Тиск p_1 можемо виміряти експериментально за допомогою манометра

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Відкрийте клапан і визначте початкове значення рівня рідини в одному з колін манометра. Відлік ведіть по нижній частині меніска рідини.
3. Закрийте клапан (у ненависнутому стані клапан закритий), накачайте в балон повітря з таким розрахунком, щоб різниця рівнів у колінах манометра була не більше 150 мм.
4. Приблизно через одну хвилину після припинення накачування (рівні рідини в манометрі перестануть змінюватися) визначте різницю рівнів h_1 . Виміри висоти рівня рідини в одному коліні відносно іншого можна виконувати у такий спосіб: спочатку знаходять висоту поточного рівня рідини відносно початкового рівня, а потім отриману величину множать на 2. Результат запишіть у таблицю 1.
5. Зрівняйте тиск у балоні з атмосферним. Для цього відкрийте клапан 5 (натисніть на нього), а потім швидко, коли тиск у балоні стане атмосферним, закрийте його (відпустіть клапан).
6. Через кілька хвилин після закриття клапана, коли рівні рідини в манометрі перестануть змінюватися, визначте різницю рівнів h_3 . Результат запишіть у таблицю 1.
7. Повторіть дослід, описаний у пунктах 3-6, ще 9 разів, при цьому початкові різниці рівнів потрібно поступово зменшувати.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

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

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

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

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

де N – число вимірювань.

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

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

де Δh – інструментальна похибка шкали манометра.

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

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

- Знайдіть загальну величину абсолютної похибки вимірювання

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

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

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

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

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

На оцінку “добре”

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

На оцінку “відмінно”

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

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

Лабораторна робота 6

ВИВЧЕННЯ ЕНТРОПІЇ СИСТЕМИ У НЕОБОРОТНОМУ ПРОЦЕСІ

1. МЕТА РОБОТИ

1. Експериментально переконатися у справедливості другого закону термодинаміки.
2. Визначити зміну ентропії тіл під час теплообміну між тілами у замкнутій термодинамічній системі. Дослідити залежність зміни ентропії від теплоємності тіл.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Термодинамічний зміст ентропії

Термодинаміка – розділ фізики, що вивчає перетворення енергії. Термодинаміка ґрунтується на трьох законах (принципах), які є узагальненням великої кількості експериментальних фактів. Термодинаміка оперує виключно *макроскопічними параметрами* тіл, або *параметрами стану* (наприклад, температура, тиск, об'єм), та не відповідає на питання про конкретну будову систем та мікроскопічну природу цих параметрів. З точки зору термодинаміки будь-яка система є так званою “чорною скринькою”, що характеризується доступними для вимірювань величинами (макроскопічними параметрами), а вивчати систему – означає встановлювати, за якими законами змінюються макроскопічні параметри.

Параметри стану можуть бути аргументами певних функцій. Існують такі функції від параметрів стану, які однозначно характеризують стан системи. Тобто даному набору аргументів відповідає лише одне значення функції незалежно від того, у який спосіб система набула зазначеного стану. Такі функції називаються *функціями стану*. Прикладом функції стану є **внутрішня енергія** U – уся енергія системи за винятком кінетичної енергії руху системи як цілого та потенціальної енергії взаємодії системи як цілого з іншими системами. Нескінченно малий приріст внутрішньої енергії dU є *повним диференціалом*.

За першим законом термодинаміки

$$dU = \delta A' + \delta Q, \quad (1)$$

де $\delta A'$ – нескінченно малий приріст роботи, що виконується ззовні над вибраною системою; δQ – нескінченно малий приріст кількості теплоти, що передається системі. Різниця у позначеннях приростів « d » та « δ » свідчить про те, що лише внутрішня енергія системи є функцією стану, у той час коли робота і кількість теплоти – ні.

Оборотним називається процес, який можна змусити протікати у зворотному напрямку через ту саму сукупність станів, за умови, що у навколишньому середовищі не відбуваються зміни. У термодинаміці доведено, що оборотним процесом є **рівноважний** процес або процес, під час якого параметри стану релаксують до своїх рівноважних значень набагато швидше, ніж відбуваються їх зміни під дією зовнішніх чинників. Експериментально встановлено, що під час оборотного процесу відношення прирощення кількості теплоти до температури T , за якої воно відбувається, $\delta Q/T$ є повним диференціалом. З точки зору термодинаміки **ентропією** називається така функція S , повний диференціал якої визначається як

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (2)$$

З означення (2) очевидно, що сама функція S визначена з точністю до константи. Але для ентропії, як і для внутрішньої енергії, як правило, значення має не абсолютна величина, а її зміна

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}, \quad (3)$$

де межі інтегрування 1 та 2 умовно позначають різні стани системи. Якщо мають місце лише процеси теплопередачі, прирощення кількості теплоти можна подати у вигляді

$$\delta Q = cm \cdot dT, \quad (4)$$

де c – питома теплоємність речовини; m – маса тіла, що є частиною системи. Підкреслимо ще раз, що вирази (2) та (3) справедливі лише для оборотних процесів. У зворотному випадку

$dS \neq \delta Q/T$. Конкретизувати останню нерівність зручно за допомогою статистичного змісту ентропії.

2.2. Статистичний зміст ентропії

Статистична фізика, на відміну від термодинаміки, розкриває природу параметрів стану з точки зору внутрішньої будови систем. Тим самим вона забезпечує конкретне, мікроскопічне наповнення абстрактним поняттям термодинаміки. Наприклад, тиск є наслідком ударів молекул об стінку посудини, температура є мірою середньої кінетичної енергії хаотичного теплового руху молекул і т.д. При цьому за наявності взаємодії між елементами системи такий підхід стає необмежено складним з математичної точки зору і для подальшого вивчення системи доводиться залучати підходи термодинаміки.

Таким чином, термодинаміка та статистична фізика не є антитепами, а, навпаки, взаємодоповнюють одна одну. Особливо яскраво проявляється їх “симбіоз” у випадку ентропії. З точки зору термодинаміки маємо лише абстрактні формулювання (2) та (3), які до того ж обмежені класом оборотних процесів. Згідно з положеннями статистичної фізики ентропія є *мірою невпорядкованості* системи і визначається згідно з виразом

$$S = k_B \cdot \ln \Omega, \quad (5)$$

де $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; Ω – так звана статистична вага. **Статистичною вагою** називається кількість мікростанів, за допомогою яких можна реалізувати заданий макростан. Чим більшою є величина Ω , тим більш ймовірним є макростан, що йому відповідає. Природно, що самочинно система може переходити лише у більш ймовірні стани, а зворотні процеси при цьому практично неможливі (якщо не враховувати короткочасні флуктуації). Тому оборотний процес можливий лише у невеликому околі максимального значення статистичної ваги системи $\Omega = \Omega_{\max}$. З урахуванням виразу (5) можна стверджувати, що ентропія системи під час оборотного процесу є максимальною. У той самий час, будь-який необоротний процес повинен відбуватися через послідовність станів, статистична вага яких менша від

максимальної ($\Omega < \Omega_{\max}$). Тому впродовж необоротного процесу ентропія замкнутої системи може лише збільшуватися. Останнє твердження складає зміст *другого закону термодинаміки*

$$\Delta S \geq 0. \quad (6)$$

Відповідно під час необоротного процесу ентропія має збільшуватися не лише за рахунок теплообміну, як у випадку оборотного процесу, а й за рахунок необоротності процесу. Тому вираз (3) у випадку, узагальненому на необоротні процеси, набуває вигляду

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (7)$$

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Калориметр.
2. Термометр.
3. Водомірна склянка.
4. Нагрівач.
5. Набір тіл з різних матеріалів.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Нехай маємо термоізолюваний калориметр, в якому знаходиться вода масою m_g при температурі T_0 . Якщо у воду опустити тіло масою m_m при температурі T_m , то в системі буде певний час відбуватися нерівноважний (необоротний) процес теплообміну між тілом та водою. На початку процесу температури води та тіла будуть різними, а в кінці – однаковими та дорівнюватимуть T_p .

Оскільки процес необоротний, безпосереднє застосування виразу (3) для розрахунку ентропії є безпідставним. У той самий час ентропія є функцією стану, а, отже, величини ентропії складових системи повинні визначатися виключно температурою на початку процесу та кінцевою температурою (усі інші параметри стану, окрім температури, незмінні). Отже, приріст ентропії ΔS_1 води у калориметрі має бути однаковим як під час порівняно

швидкого (нерівноважного) нагрівання води за рахунок теплообміну з тілом масою m_m , так і під час повільного (рівноважного) нагрівання в іншому процесі. Тому величину ΔS_1 можна визначити як

$$\Delta S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_0}^{T_p} \frac{c_g m_g dT}{T} \Rightarrow$$

$$\Delta S_1 = c_g m_g \ln \frac{T_p}{T_0}. \quad (8)$$

З аналогічних міркувань можна одержати зміну ентропії ΔS_2 самого калориметра

$$\Delta S_2 = c_k m_k \ln \frac{T_p}{T_0}, \quad (9)$$

де c_k – теплоємність матеріалу калориметра; m_k – маса калориметра, а також зміну ентропії ΔS_3 тіла

$$\Delta S_3 = c_m m_m \ln \frac{T_p}{T_m}. \quad (10)$$

Ентропія є адитивною величиною, тому шукана зміна ентропії системи може бути знайдена як $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3$. Тоді з урахуванням рівностей (8)-(10) можна записати

$$\Delta S = (c_g m_g + c_k m_k) \ln \frac{T_p}{T_0} + c_m m_m \ln \frac{T_p}{T_m}. \quad (11)$$

За рівнянням теплового балансу у теплоізованій системі сумарна кількість теплоти, що передається одним частинам системи, дорівнює сумарній кількості теплоти, що відбирається від інших

$$Q = (c_g m_g + c_k m_k)(T_p - T_0) = c_m m_m (T_m - T_p). \quad (12)$$

З урахуванням рівності (12) вираз (11) можна спростити

$$\Delta S = c_m m_m \left(\frac{T_m - T_p}{T_p - T_0} \ln \frac{T_p}{T_0} + \ln \frac{T_p}{T_m} \right). \quad (13)$$

Усі величини, наявні в останньому виразі, є або табличними, або доступні для експериментального визначення.

Зовнішній вигляд лабораторної установки наведено на рисунку 1.

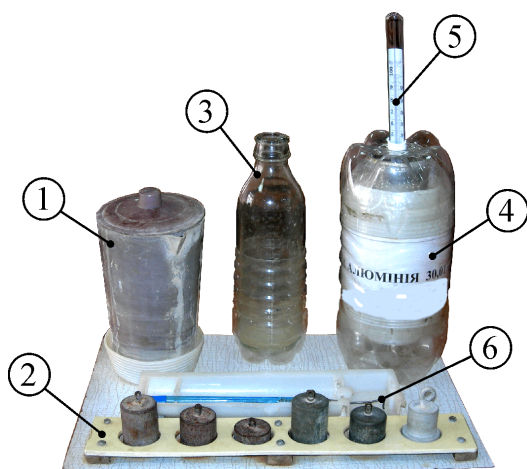


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – нагрівач; 2 – набір досліджуваних тіл; 3 – мірна склянка; 4 – калориметр; 5 – термометр; 6 – спиця для маніпуляцій з вантажами

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Опустіть у нагрівач 1 перше тіло із набору 2. Залейте його водою так, щоб тіло було повністю занурене, однак шар води зверху був невеликим.
3. Увімкніть нагрівач 1, та поки тіло нагрівається, наповніть водою водомірну склянку 3 до позначки 100 мл та вилийте її у стакан калориметра 4.

Увага! Будьте обережні під час роботи з нагрівачем та уникайте потрапляння гарячої води на відкриті ділянки шкіри.

4. За допомогою термометра 5 визначте початкову температуру T_0 води у калориметрі. Результат занесіть до таблиці 1.
5. Через 3-4 хвилини після закипання води вимкніть нагрівач та за допомогою спеціальної спиці з гачком 6 помістіть нагріте тіло у стакан калориметра та накрийте його. Температуру тіла при цьому вважати такою, що дорівнює $t_m = 98^\circ\text{C}$.
6. За термометром стежте, як зростає температура води у калориметрі, та запишіть у таблицю 1 її максимальне значення.
7. Вилити воду зі стакана калориметра до спеціальної ємності та охолодити калориметр впродовж хвилини.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№ тіла	1	2	3	4	5	6
c_m , Дж/(кг·К)						
m_m , кг						
$C = c_m \cdot m_m$, Дж/К						
T_0 , К						
T_p , К						
ΔS , Дж/К						
$T_m = 371$ К						

Середні питомі теплоємності матеріалів

залізо: $c = 500$ Дж/(кг·К), латунь: $c = 394$ Дж/(кг·К),
 алюміній: $c = 920$ Дж/(кг·К), бронза: $c = 385$ Дж/(кг·К)

8. Повторіть дії, зазначені у попередніх пунктах, для ще п'яти тіл. Результати запишіть у таблицю 1.
9. Визначте теплоємність кожного тіла як $C = c_m \cdot m_m$. Результати запишіть у таблицю 1.
10. Згідно зі співвідношенням (13) визначте зміну ентропії у кожному вимірюванні. Заповніть відповідний рядок таблиці 1.
11. Побудувати графік залежності $\Delta S(C)$ за одержаними даними.
12. Зробити висновки щодо результатів лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Що таке термодинаміка та що вона вивчає?
2. Що називають параметрами стану? Функціями стану?
3. Сформулювати перший та другий закони термодинаміки.
4. Який процес називається оборотним?
5. Послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Пояснити термодинамічний зміст ентропії.
7. Пояснити статистичний зміст ентропії.
8. Записати рівняння теплового балансу та пояснити його зміст.
9. Пояснити, чому процес охолодження металевого тіла у воді є необоротним.
10. Дати визначення статистичній вазі та пояснити її зміст.

На оцінку “відмінно”

11. Пояснити різницю між статистичним та термодинамічним підходами до вивчення макросистем.
12. Пояснити, чому графік залежності $\Delta S(C)$ має зростати.
13. Одержати розрахункову формулу (13).
14. Які чинники зумовлюють похибку вимірювань у даній роботі?
15. Розкрити суть явища кипіння рідини та охарактеризувати його.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельєв І.В. Курс фізики. Том 1. Механіка. Молекулярна фізика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 1. Класична механіка і теорія відносності. Молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка. Механічні коливання та хвилі. Звук. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.І. Курс фізики. – М.: Высш. шк., 1990.

Лабораторна робота 7

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ І ВПЛИВУ НА НЬОГО ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися з явищем поверхневого натягу та його характерними проявами.
2. Експериментально визначити коефіцієнт поверхневого натягу чистої води.
3. Дослідити залежність коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації поверхнево-активних речовин. Експериментально визначити поверхневу активність.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Сутність поверхневого натягу

Сама назва «поверхневий натяг» свідчить про те, що зазначений феномен має місце на межі поділу середовищ у різних агрегатних станах, а саме: рідкого і газоподібного або рідкого і твердого. Причиною наявності поверхневого натягу є відмінність станів молекул рідини, що знаходяться у товщі рідини та у приповерхневому шарі. Розглянемо це більш детально.

Рідкий стан речовини характеризується тим, що внаслідок міжмолекулярної взаємодії рідина, як і тверде тіло, здатна зберігати свій об'єм. Однак інтенсивність міжмолекулярної взаємодії недостатньо велика для того, щоб утримувати молекули у визначених позиціях. Тому час від часу молекули рідини за рахунок теплових флуктуацій стрибкоподібно змінюють свої положення. Це слугує причиною текучості рідин, внаслідок якої форма рідини залежить від зовнішніх чинників, таких, як наявність гравітації та непроникних границь.

Зазначені стрибкоподібні переміщення молекул відбуваються хаотично в усіх напрямках. Якщо прослідкувати за будь-якою

молекулою, що знаходиться у товщі рідини, то її переміщення у середньому дорівнюватиме нулю (за умови, що рідина покоїться як ціле). Це дозволяє говорити, що середнє значення сили притягання (або відштовхування), яка діє на одну молекулу у товщі рідини зі сторони інших молекул, також дорівнює нулю ($\langle \vec{F} \rangle = 0$, див. рисунок 1а). Інша ситуація спостерігається для молекул приповерхневого шару. Внаслідок близькості межі поділу середовищ сила притягання зі сторони молекул товщі рідини виявляється у середньому незкомпенсованою зі сторони менш численних молекул приповерхневого шару, молекул пари цієї рідини та інших газів ($\langle \vec{F} \rangle \neq 0$, див. рисунок 1б). При цьому незкомпенсована сила спрямована переважно у товщу рідини. Такий стан речей має наступні наслідки.

1) Молекули приповерхневого шару мають тенденцію до переміщення у товщу рідини. Тобто внаслідок флуктуацій молекули будуть переважно переміщуватися з приповерхневого шару у середину рідини, поки збільшення тиску всередині рідини не зупинить цей процес. У макроскопічному масштабі це призводить до того, що площа вільної поверхні рідини є завжди мінімальною за визначених умов. Так, наприклад, якщо на рідину не діють будь-які інші тіла, вона самостійно набуває форми кулі, оскільки саме така форма відповідає мінімальній площі поверхні.

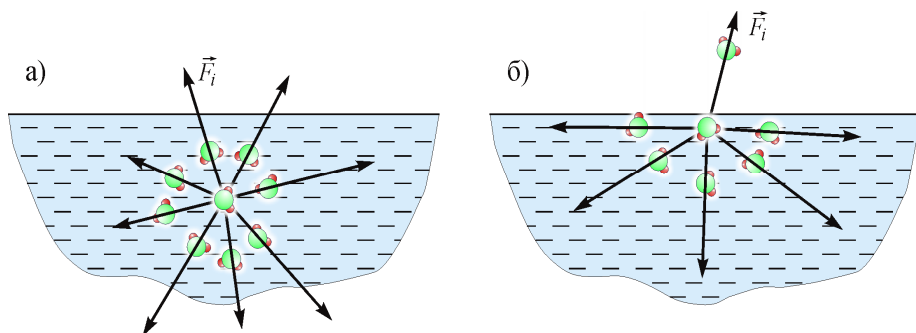


Рисунок 1 – Дія сил міжмолекулярної взаємодії на молекулу у товщі води (а) та у приповерхневому шарі (б)

2) Тиск, що створюється внаслідок руху молекул з приповерхневих шарів усередину рідини, називається **внутрішнім**. За абсолютною величиною він на декілька порядків більший порівняно з тим, що може бути створений зовнішніми чинниками як природного, так і антропогенного характеру. Тому рідини практично не піддаються стисканню.

3) Молекули приповерхневих шарів мають додаткову енергію порівняно з молекулами товщі рідини. Ця енергія називається **поверхневою**. Величина поверхневої енергії пропорційна до кількості молекул у приповерхневому шарі рідини, а отже, пропорційна площі її поверхні. Коефіцієнт пропорційності залежить від типу рідини і називається **коефіцієнтом поверхневого натягу**. Ця величина має зміст *питомої поверхневої енергії* і, як правило, позначається як σ :

$$\sigma = \frac{dW}{dS}, \quad (1)$$

де W – поверхнева енергія; S – площа вільної поверхні рідини, $[\sigma]_{\text{СИ}} = \text{Дж/м}^2$. Поруч із густиною та в'язкістю коефіцієнт поверхневого натягу є однією з основних характеристик рідини. Зважаючи на те, що мікроскопічна природа поверхневого натягу базується як на міжмолекулярній взаємодії, так і на хаотичних переміщеннях молекул, σ відчутно залежить від температури.

З енергетичної точки зору вже зазначений раніше факт, що рідина завжди прагне мінімізувати площу своєї вільної поверхні, є наслідком того, що будь-яка фізична система завжди прямує до стану з мінімальною енергією. У даному випадку мінімум енергії рідини визначається мінімумом площі її вільної поверхні.

Слід зауважити, що роль поверхневого натягу у поведінці рідини залежить від її об'єму. Зі зменшенням об'єму кількість молекул, що знаходяться на поверхні, по відношенню до їх загальної кількості збільшується. Тому зі зменшенням об'єму рідини зростає і ступінь впливу поверхневого натягу. Так, наприклад, вода об'ємом 1 літр в умовах наявності земного тяжіння повністю займає будь-яку посудину з утворенням горизонтальної, практично плоскої межі поділу вода-повітря. У той самий час

вода об'ємом близько 50 мм^3 за тих самих умов може набувати форми, близької до сферичної (крапля роси). Залежність від об'єму тіла існує не лише для поверхневого натягу, а й для усіх інших поверхневих ефектів.

2.2. Сила поверхневого натягу

Тенденція до зменшення вільної поверхні рідини внаслідок поверхневого натягу зумовлює існування на поверхні рідини певної сили, яка отримала назву **сили поверхневого натягу**. Поведінка поверхні рідини еквівалентна поведінці розтягнутої пружної плівки, а дія сили поверхневого натягу ідентична дії сили пружності, що протидіє розтягу плівки. Тому сила поверхневого натягу завжди спрямована вздовж дотичної до поверхні рідини.

Розглянемо дуже малу, практично прямокутну ділянку поверхні рідини площею ΔS (див. рис. 2). Нехай зовнішня сила \vec{F}_3 прикладена перпендикулярно до сторони Δl . Під дією цієї сили площа вільної поверхні збільшується на $dS = \Delta l dx$, і відповідно до виразу (1), поверхнева енергія зростає на $dW = \sigma dS = \sigma \Delta l dx$. Цей приріст енергії має дорівнювати роботі, що виконується проти сили поверхневого натягу \vec{F}_n , спрямованої проти \vec{F}_3 . Користуючись тим фактом, що робота у цьому випадку визначається добутком сили на переміщення $\sigma \Delta l dx = dW = dA = F_n dx$, легко встановити, що

$$F_n = \sigma \Delta l. \quad (2)$$

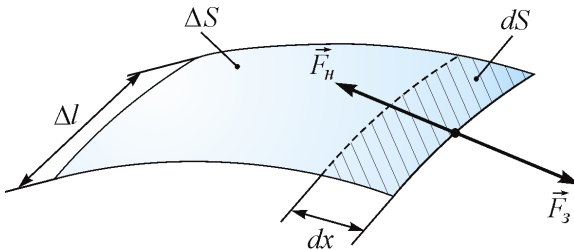


Рисунок 2 – До визначення сили поверхневого натягу

Таким чином, модуль сили поверхневого натягу буде пропорційним довжині контуру на поверхні рідини, а вектор \vec{F}_n буде спрямований перпендикулярно до контуру Δl та паралельно дотичній до її поверхні. Вибір форми та довжини контуру залежить від деталей конкретної ситуації.

2.3. Явища змочування та незмочування

Під час контакту рідини із твердим тілом її поведінка залежить від взаємодії між молекулами твердого тіла та молекулами рідини. Якщо сили притягання між молекулами твердого тіла та молекулами рідини (*адгезія*) більші за сили притягання молекул рідини між собою (*когезія*), рідина буде розтікатися по поверхні твердого тіла. У зворотному ж випадку, коли молекули рідини притягаються між собою інтенсивніше, ніж до молекул твердого тіла, рідина, навпаки, буде набувати компактної форми з мінімальною поверхнею. Розглянемо такі явища більш детально.

Нехай певний об'єм рідини знаходиться на плоскій поверхні твердого тіла в оточенні пари рідини та інших газів (див. рис. 3а). На межі поділу трьох середовищ (межа спроектована в точку А на площину рисунка) будуть діяти три сили, зумовлені взаємодією молекул усіх трьох середовищ: \vec{F}_{TG} , \vec{F}_{RT} , \vec{F}_{RG} . Кожна з цих сил має зміст сили поверхневого натягу, тому відповідно до виразу (2) можна записати

$$F_{TG} = \sigma_{TG}\Delta l, \quad F_{RT} = \sigma_{RT}\Delta l, \quad F_{RG} = \sigma_{RG}\Delta l, \quad (3)$$

де σ_{TG} – коефіцієнт поверхневого натягу твердого тіла на межі з газовим середовищем; σ_{RT} – коефіцієнт поверхневого натягу рідини на межі з твердим тілом; σ_{RG} – коефіцієнт поверхневого натягу рідини на межі з газовим середовищем.

З умови рівноваги векторна сума цих сил, як і сума проєкцій на горизонтальну вісь, має дорівнювати нулю. Тоді з урахуванням співвідношень (3) можна записати, що

$$F_{RG} \cos \theta + F_{TG} - F_{RT} = 0 \Rightarrow \sigma_{RG}\Delta l \cos \theta + \sigma_{TG}\Delta l - \sigma_{RT}\Delta l = 0 \Rightarrow \cos \theta = (\sigma_{RT} - \sigma_{TG})/\sigma_{RG}, \quad (4)$$

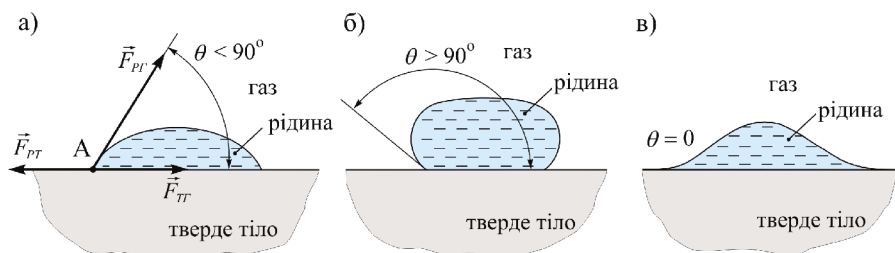


Рисунок 3 – Схематичне зображення часткового змочування рідиною твердого тіла (а), незмочування (б), повного змочування (в)

де θ – **крайовий кут змочування**.

Розрізняють такі ситуації:

1) $(\sigma_{rT} - \sigma_{Tt})/\sigma_{rT} > 1 \Rightarrow \cos \theta \equiv 1 \Rightarrow \theta = 0^\circ$. При цьому рідина необмежено розтікається по поверхні твердого тіла, і говорять, що має місце **повне змочування** твердого тіла рідиною (див. рис. 3в).

2) $0 < (\sigma_{rT} - \sigma_{Tt})/\sigma_{rT} < 1 \Rightarrow 0 < \cos \theta < 1 \Rightarrow 0^\circ < \theta < 90^\circ$. При цьому рідина розтікається по поверхні твердого тіла лише до визначених меж, і говорять, що має місце **часткове змочування** твердого тіла рідиною (див. рис. 3а).

3) $(\sigma_{rT} - \sigma_{Tt})/\sigma_{rT} \leq 0 \Rightarrow \cos \theta \leq 0 \Rightarrow 90^\circ \leq \theta < 180^\circ$. При цьому рідина прагне «зібратися» у кульку, і говорять, що має місце **незмочування** твердого тіла рідиною (див. рис. 3б).

Явища змочування та незмочування можна спостерігати у побуті та живій природі. Так, краплі роси на листках рослин (див. рис. 4а) є яскравим прикладом незмочування. Цікаво, що у наведеному випадку ефект незмочування підсилюється тим, що поверхня листків та стеблин рослин є не плоскою, а має досить нерівномірний мікроскопічний рельєф. Це зменшує контакт між рослиною та водою та збільшує число меж поділу за типом рослина-вода-повітря з достатньо великим кутом змочування. В кінцевому підсумку достатньо великі краплини роси мають можливість знаходитися на поверхні рослини або навіть рухатися по ній. Під час руху краплини роси вона змочує поверхню частинок бруду, що знаходяться на рослині, та забирає бруд із собою. Саме такий спосіб самоочищення дозволяє бути білому лотосу

«символом чистоти», незважаючи на те, що середовищем його існування є болотна драговина.

Іншим прикладом незмочування є спосіб переміщення комах-водомірок (рисунок 4б) по поверхні водоймищ. Кінчики лапок комахи вкриті тонкими та жорсткими волосками, що не змочуються водою. Сила тяжіння, що діє на водомірку завдяки порівняно малій масі, компенсується силою поверхневого натягу.

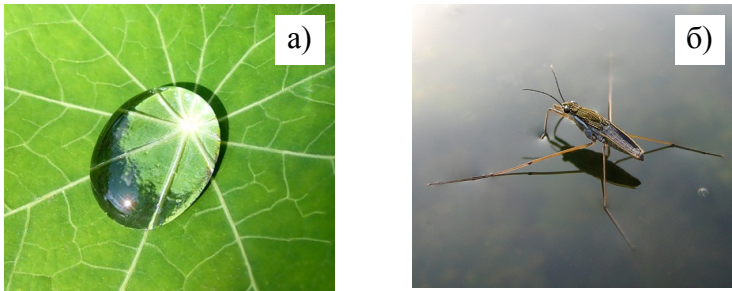


Рисунок 4 – Явища незмочування у природі. Крапля роси на листку рослини (а); комаха-водомірка на поверхні води (б)

2.4. Капілярні явища

Явища змочування та незмочування лежать в основі так званих **капілярних явищ**, які, без сумніву, є одним з основних чинників, що визначають характер життєвих процесів для усіх живих істот на землі. Сутність капілярних явищ полягає у тому, що рідина може підніматися на істотну висоту вздовж тонких порожнин або трубок – капілярів, якщо матеріал капілярів змочується рідиною. У випадку ж незмочування рідина буде опускатися вздовж капіляра, вміщеного в рідину, нижче за загальний її рівень. Саме завдяки капілярності відбувається обмін речовинами у рослинах та на клітинному рівні в організмах тварин і людини.

Висоту підняття рідини у капілярі можна знайти за допомогою таких нескладних розрахунків. З умови рівноваги сила тяжіння (див. рис. 5а) компенсується силою поверхневого натягу. Остання прикладена по внутрішній поверхні циліндричного капіляра перпендикулярно до межі поділу рідина-повітря-капіляр та паралельно його осі у припущенні, що має місце повне змочування (див. рис. 5б)

$$mg = F_n = 2\pi r\sigma \Rightarrow \rho h\pi r^2 g = 2\pi r\sigma \Rightarrow h = 2\sigma/r\rho g. \quad (5)$$

Вважається, що стовп піднятої рідини являє собою циліндр, і його маса визначається як $m = \rho h\pi r^2$. Легко побачити, що висота підняття рідини у капілярі обернено пропорційна його розмірам, тобто чим тонший капіляр, тим вище піднімається рідина (див. рис. 5в).

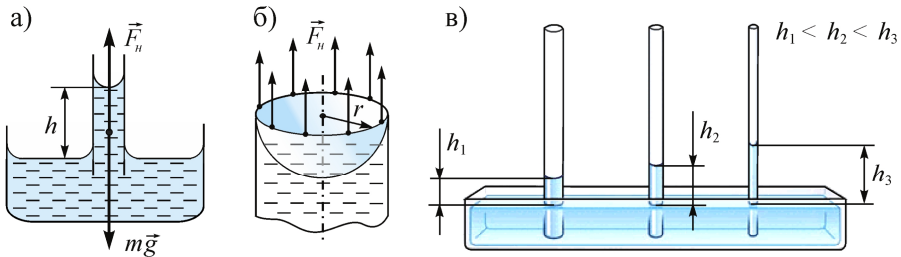


Рисунок 5 – До пояснення фізичної природи капілярних явищ. Сили, що діють на рідину в капілярі (а); характер дії сили поверхневого натягу в капілярі (б); схематичне зображення обернено пропорційної залежності висоти підняття рідини від товщини капіляра (в)

2.5. Поверхневоактивні речовини

Поверхневоактивними речовинами (ПАР) називаються хімічні сполуки, що концентруються на межі поділу рідини з іншими тілами та зменшують коефіцієнт поверхневого натягу речовини. Основною кількісною характеристикою ПАР є **поверхнева активність (A_s)** – здатність речовини зменшувати величину σ . Вона визначається як похідна від коефіцієнта поверхневого натягу за величиною концентрації n ПАР за умови, що концентрація прямує до нуля

$$A_s = - \left. \frac{d\sigma}{dn} \right|_{n \rightarrow 0}. \quad (6)$$

Зауважимо, що за рахунок обмеженої розчинності ПАР існує критична концентрація, за якої подальше додавання ПАР не приводить до зменшення коефіцієнта поверхневого натягу.

Особливість будови молекул ПАР полягає у наявності **гідрофільних** груп, які більш інтенсивно притягуються до молекул рідини, ніж між собою, та **гідрофобних** груп, що, навпаки, активніше взаємодіють між собою, ніж з молекулами рідини (див. рис. 6а). Зрозуміло, що рівноважне положення для таких молекул має місце, коли молекула знаходиться на поверхні рідини, і при цьому гідрофільна частина знаходиться у рідині, а гідрофобна – на зовні (див. рис. 6б). Молекули рідини у приповерхневому шарі виявляються розділеними молекулами ПАР, в результаті чого інтенсивність міжмолекулярної взаємодії у приповерхневому шарі зменшується. Як наслідок, поверхнева енергія також зменшується, що призводить до зменшення коефіцієнта поверхневого натягу рідини.

Прикладом ПАР є звичайне мило (суміш натрієвих солей жирних карбонових кислот – олеату ($C_{17}H_{33}COONa$) та стеарату ($C_{17}H_{35}COONa$) натрію), а також спирти, карбонові кислоти.

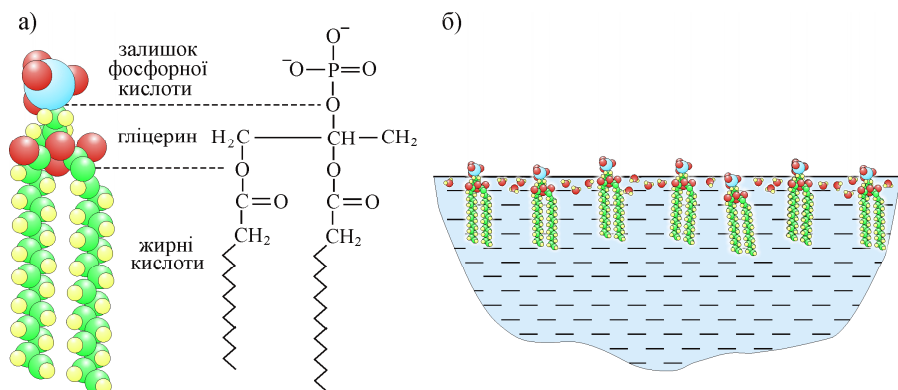


Рисунок 6 – Приклад схематичної будови молекули ПАР – фосфоліпиду (а). До пояснення поведінки молекул ПАР у рідині (б)

2.6. Класифікація ПАР

Існує надзвичайно велика кількість ПАР, які значно відрізняються між собою за фізико-хімічними характеристиками. Також існує декілька класифікацій таких речовин. Так, у відповідності до класифікації, прийнятої Міжнародною Організацією зі стандартизації (International Organization for Standardization – ISO), ПАР за хімічними властивостями поділяють на чотири типи.

1) **Аніонактивні** ПАР. Вони містять в молекулі одну чи декілька полярних груп та добре дисоціюють у воді з утворенням аніонів у вигляді довгих ланцюжків, які і визначають їх поверхневу активність. Це групи: $\text{COOH}(\text{M})$, $\text{OSO}_2\text{OH}(\text{M})$, $\text{SO}_3\text{H}(\text{M})$, де М – одно-, дво- або тривалентний метал. Гідрофобна частина молекули, як правило, являє собою аліфатичні ланцюжки або алкілові та ароматичні радикали.

2) **Катіонактивні** ПАР, молекули яких під час дисоціації утворюють поверхневоактивний катіон з довгим гідрофобним ланцюжком аніона – як правило галогеніду. Катіонактивні ПАР менше знижують поверхневий натяг, ніж аніонактивні, однак можуть брати участь у хімічних реакціях з поверхнею **адсорбенту** (твердого тіла, здатного накопичувати у собі інші хімічні сполуки). Наприклад, реакція з клітинними білками бактерій зумовлює бактерицидні властивості катіонактивних ПАР, а реакція з волокнами целюлози, що міститься у тканині, надає їй водовідштовхувальних властивостей.

3) **Неіоногенні** ПАР не дисоціюють у воді на іони. Їх розчинність зумовлена наявністю в молекулах гідрофільних ефірних (СО-О) та гідроксильних (ОН) груп. Під час розчинення молекули води за допомогою водневого зв'язку приєднується до кисню ефірних та гідроксильних груп. Подібні з'єднання називаються **гідратами**. Характерною особливістю неіоногенних ПАР є рідкий стан та низьке піноутворення у водних розчинах.

4) **Амфотерні** ПАР. Даний тип речовин не дисоціює під час розчинення, однак самі по собі вони є хімічно активними. Остання властивість забезпечується, як правило, гідрофільним радикалом та здатністю гідрофобної частини бути акцептором або донором протона. Тому, залежно від концентрації іонів вод-

ню у розчині (так званий показник *pH*) амфотерні ПАР здатні проявляти себе як аніонактивні або катіонактивні ПАР.

З точки зору фізичних властивостей, актуальних для практичного застосування, розрізняють також чотири типи ПАР.

1) Низькомолекулярні ПАР, які добре розчинні у воді, а їх розчин має порівняно малу в'язкість. Їх розчини не створюють колоїдних частинок ні в об'ємі, ні в поверхневому шарі, що перешкоджає піноутворенню. Тому такі речовини використовуються як своєрідні «піногасники» у технологічних процесах, де утворення піни є небажаним. Також такі ПАР застосовуються у різних методах сепарації дрібних твердих частинок та виділення крапель *дисперсної* (розпорошеної, розділеної на багато частинок) фази з *емульсій* (дисперсних систем, в яких маленькі краплинки однієї рідини знаходяться у об'ємі іншої), в яких використовується різна змочуваність частинок і їх здатність накопичуватися на поверхні поділу фаз – так звана *флотація*.

2) ПАР, які проявляють поверхневу активність на межі двох рідин, що не змішуються. Зменшення поверхневої енергії завдяки таким ПАР полегшує процес утворення нової поверхні, зокрема в процесі *диспергування* (механічне розпорошення, утворення дрібних частинок (об'ємів) з великих). Тому вони застосовуються при створенні емульсій, *суспензій* (дисперсних систем, в яких маленькі частинки твердого тіла знаходяться у об'ємі рідини), *аерозолів* (дисперсних систем, в яких маленькі частинки рідини або твердого тіла знаходяться у об'ємі газу).

3) Третій тип складають ПАР, молекули яких добре взаємодіють із молекулами рідини, які внаслідок змочування приєднуються до поверхні твердого тіла. В результаті поверхня твердого тіла покривається своєрідною оболонкою із молекул ПАР, при цьому зовнішня частина такої оболонки утворена гідрофобними частинами молекул. Це запобігає об'єднанню диспергованих частинок твердого тіла у більш великі утворення завдяки взаємодії з молекулами рідини – так званої *коагуляції*. Тому такі ПАР ще називають стабілізаторами.

4) Четвертий тип ПАР складають миючі речовини, або *детергенти*, що займають перше місце за масштабами практичного застосування. Так, у світі зараз виробляється близько 3 кг

миючих засобів на душу населення за рік, а в Україні рівень їх споживання наближається до 5 кг на душу населення за рік. Як і для ПАР попереднього типу, молекули детергенту приєднуються гідрофільними частинами до частинок бруду, а завдяки утвореній гідрофобній оболонці виштовхуються з води та концентруються у стабілізованих частинках емульсії або суспензії. Детергенти повинні мати весь комплекс властивостей, характерних для трьох попередніх типів, тобто суттєво знижувати поверхневий натяг, проявляти змочувальну, гідрофілізуючу дію і бути не тільки диспергаторами, але і сильними стабілізаторами емульсій і суспензій. Також бажаним є стійкість піни, за рахунок якої збільшується активна площа розчину детергенту.

2.7. Вплив ПАР на екологію

Основні загрози, що несе використання ПАР, можна розділити на такі категорії.

1) Оскільки життя практично усіх високорозвинених організмів базується на використанні води, негативна дія ПАР невід'ємно пов'язана із призначенням цих речовин. Зменшення коефіцієнта поверхневого натягу у відповідності до виразу (5) суттєво впливає на капілярні явища, які визначають процеси обміну речовин.

2) Накопичення ПАР як у прісних водоймах, так і у океані має наслідком зниження поверхневого натягу води. У свою чергу, це зменшує здатність води утримувати кисень та вуглекислий газ, що розчинені у ній, і негативно позначається на умовах існування водної флори та фауни.

3) Більшість ПАР є синтетичними речовинами, що досить повільно розпадаються і тому здатні накопичуватися в організмах в неприпустимих концентраціях. Крім того, це стосується і продуктів їх розпаду.

4) Практично всі ПАР, що використовуються у промисловості та побуті, добре адсорбуються на поверхні частинок ґрунту, піску та глини. За певних умов адсорбовані молекули ПАР можуть вивільняти іони важких металів, які утримуються цими частинками, що підвищує ризик їх потрапляння у живі організми.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Динамометр ДПН.
2. Пінцет.
3. Чашка місткістю 100 см³.
4. Мірна склянка.
5. Піпетка.
6. Водний розчин поверхнево-активної речовини.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Принцип визначення коефіцієнта поверхневого натягу базується на такому явищі. Якщо вертикально занурити у рідину рамку (або частину рамки, так звану петлю) з тонкого металевого дроту, який змочується рідиною, а потім обережно витягти її, то у площині рамки утвориться тонка плівка рідини (див. рисунок 7а). При цьому на горизонтальну частину петлі вертикально вниз діятиме сила поверхневого натягу, яка у відповідності до виразу (2) буде визначатися як $F_n = 2\sigma l$. Тут l – довжина горизонтальної частини петлі, а множник 2 наявний за рахунок наявності двох поверхонь поділу рідина-повітря з обох сторін утвореної плівки. Для того щоб відірвати петлю від рідини, потрібно прикласти зовнішню силу, яка у граничному випадку за модулем має дорівнювати F_n .

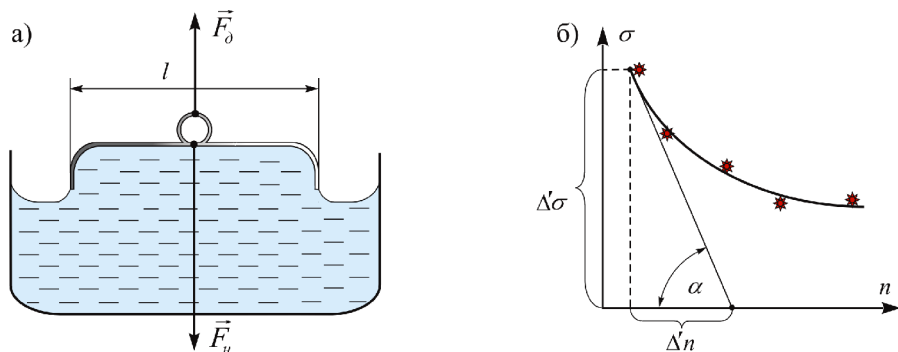


Рисунок 7 – Схематичне зображення дротяної петлі, що витягується з рідини (а). До визначення активності ПАР (б)

Зовнішньою силою може служити сила пружності пружини динамометра, що одночасно забезпечує вимірювання величини сили та компенсацію сили тяжіння відповідним встановленням нуля динамометра. Тоді коефіцієнт поверхневого натягу визначається виразом

$$\sigma = F_{\delta}/2l, \quad (7)$$

де F_{δ} ($F_{\delta} = F_n$) – максимальне показання динамометра, або показання у момент відриву петлі.

Додавання розчину ПАР призводить до зменшення величини σ . Як наслідок, сила, за допомогою якої можна відірвати петлю від поверхні рідини, також зменшиться. Шляхом додавання ПАР у рідину вимірювання сили F_{δ} та визначення коефіцієнта поверхневого натягу за допомогою виразу (7) можна побудувати залежність $\sigma(n)$ (див. рис. 7б). Тангенс нахилу дотичної до одержаної кривої, побудованої на початку залежності, являтиме собою значення поверхневої активності

$$A_s = - \left. \frac{d\sigma}{dn} \right|_{n \rightarrow 0} = \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{\Delta' \sigma}{\Delta' n}. \quad (8)$$

Схема експериментальної установки наведена на рисунку 8.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

5.1. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Установіть корпус динамометра 1 вертикально. Корпус тримача 9 встановіть так, щоб його вісь збігалася з віссю стакана 2 та пружини 3.
3. Висоту підставки 8 встановіть так, щоб петля могла занурюватися у рідину та виходити з неї за допомогою гвинта 10.
4. Налийте у чашку 7 100 см³ чистої води.
5. Установіть чашку 7 з рідиною на підставку 8.

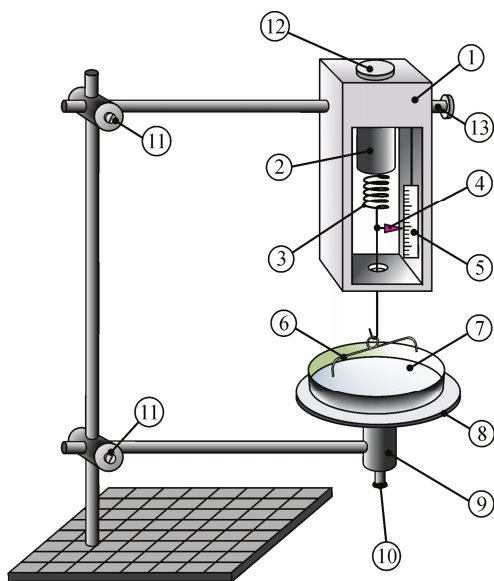


Рисунок 8 – Схематичне зображення експериментальної установки: 1 – корпус динамометра; 2 – стакан динамометра; 3 – вимірвальна пружина; 4 – стрілка для визначення сили; 5 – шкала динамометра; 6 – петля; 7 – чашка для рідини; 8 – підставка; 9 – корпус тримача; 10 – гвинт тримача; 11 – затискачі з гвинтами; 12 – регулювальний гвинт для встановлення нуля; 13 – стопорний гвинт

6. За допомогою пінцета підвісьте одну з петель до гачка в нижній частині пружини 3. Довжину горизонтальної сторони петлі, похибку її визначення Δl та інструментальну похибку динамометра $\Delta_1 F$ запишіть у таблицю 1.

***Увага!** Не торкайтеся руками петлі та внутрішньої сторони чашки, оскільки це погіршить змочуваність матеріалу петлі та приведе до похибок вимірювання. Якщо ж такий контакт відбувся, знежирте чашку та петлю спиртом або мильним розчином.*

7. За допомогою гвинта 12 встановіть стрілку динамометра 4 на нульову позначку шкали 5.
8. За допомогою гвинта 10 підніміть підставку 8 так, щоб петля повністю занурилась у рідину.

9. Повільно обертаючи гвинт 10, забезпечте повільний та рівномірний по усій довжині l вихід петлі з рідини з утворенням плівки, як це показано на рисунку 7а. Показання динамометра при цьому будуть рівномірно збільшуватися аж до відриву петлі від рідини.
10. У момент відриву зафіксуйте показання динамометра та запишіть їх у таблицю 1.
11. Повторіть зазначені у пунктах 7-10 вимірювання ще 4 рази для тієї самої петлі. Результати запишіть у таблицю 1.
12. Повторіть зазначені у пунктах 6-10 вимірювання для решти петель. Результати запишіть у таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань коефіцієнта поверхневого натягу чистої води

№ досліду	F, H		
	$l_1 =$ мм	$l_2 =$ мм	$l_3 =$ мм
1			
2			
3			
4			
5			
$\langle F_i \rangle, \text{H}$			
$\Delta_2 F_i, \text{H}$			
$\Delta F_i, \text{H}$			
$\sigma_i, \text{H/м}$			
$\Delta \sigma_i, \text{H/м}$			

$\Delta l =$	$\Delta_1 F =$	$\langle \sigma \rangle =$	$\Delta \sigma =$
$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma =$			

Увага! Подальший опис стосується обробки одержаних даних. Тому спочатку виконайте вимірювання, зазначені у пунктах 1-12, та завершіть експериментальну частину робіт, а потім здійсніть зазначені далі розрахунки.

13. Обчисліть середнє значення сили поверхневого натягу для кожної петлі у відповідності до виразу

$$\langle F_i \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_{ij}, \quad (9)$$

де N – загальна кількість вимірювань для кожної петлі ($N = 5$); i ($= 1, 2, 3$) – порядковий номер петлі; j ($= 1, \dots, N$) – порядковий номер досліду. Результат запишіть у таблицю 1.

14. Обчисліть значення випадкової складової абсолютної похибки вимірювання сили поверхневого натягу для кожної петлі у відповідності до виразу

$$\Delta_2 F_i = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (F_{ij} - \langle F_i \rangle)^2} \quad (N = 5). \quad (10)$$

Результат запишіть у таблицю 1.

15. Обчисліть значення абсолютної похибки вимірювання сили поверхневого натягу для кожної петлі

$$\Delta F_i = \sqrt{(\Delta_1 F)^2 + (\Delta_2 F)^2}, \quad (11)$$

$\Delta_1 F$ – інструментальна похибка динамометра. Результат запишіть у таблицю 1.

16. Обчисліть коефіцієнт поверхневого натягу для кожної петлі

$$\sigma_i = \frac{\langle F_i \rangle}{2l_i}. \quad (12)$$

Результат запишіть у таблицю 1.

17. Одержіть абсолютну похибку визначення коефіцієнта поверхневого натягу для кожної петлі

$$\Delta \sigma_i = \sigma_i \sqrt{\left(\frac{\Delta F_i}{\langle F_i \rangle} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l_i} \right)^2}. \quad (13)$$

Результат запишіть у таблицю 1.

18. Кінцевий результат визначення коефіцієнта поверхневого натягу чистої води подайте у вигляді

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma,$$

де $\langle \sigma \rangle = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, $\Delta \sigma = \max(\Delta \sigma_i)$.

5.2. Визначення поверхневої активності ПАР

1. У другу колонку таблиці 2 (для $k = 0$) переписіть дані з таблиці 1 для визначеної викладачем петлі.
2. За допомогою пінцета підвісьте петлю, зазначену викладачем, до гачка у нижній частині пружини. Довжину горизонтальної сторони петлі запишіть у таблицю 2.
3. За допомогою піпетки додайте у чашку з водою одну краплю 10 % розчину мильного порошку (ПАР).

Таблиця 2 – Результати вимірювань поверхневої активності мильного розчину

№ досліджу	$F, \text{ Н (для } l = \text{ мм)}$					
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
1						
2						
3						
4						
5						
$n_{k_0}, \text{ кг/м}^3$	0					
$\langle F_{k_0} \rangle, \text{ Н}$						
$\Delta_2 F_{k_0}, \text{ Н}$						
$\Delta F_{k_0}, \text{ Н}$						
$\sigma_{k_0}, \text{ Н/м}$						
$\Delta \sigma_{k_0}, \text{ Н/м}$						

$\Delta' n =$	$\Delta' \sigma =$	$\Delta n =$	$\Delta \sigma =$
$A_s =$		$\Delta A_s =$	

4. Проведіть зазначений у пунктах 7-10 підрозділу 5.1 дослід 5 разів. Результати запишіть у таблицю 2 (колонка $k = 1$).
5. Додайте у чашку по одній краплі ще 4 рази. Після кожного додавання 5 разів виміряйте силу поверхневого натягу, як це зазначено у пунктах 7-10 підрозділу 5.1. Результати запишіть у таблицю 2 (колонки $k = 2, 3, 4, 5$).
6. Обчисліть концентрацію ПАР у розчині для кожної кількості крапель у відповідності до виразу

$$n_k = \frac{0,1 \cdot V_0 \rho_m}{V} k, \quad (14)$$

де $V = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ – об'єм води у чашці; $V_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ – об'єм краплі з піпетки; $\rho_m = 1500 \text{ кг/м}^3$ – густина мила. Результати запишіть у таблицю 2.

7. Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР середнє значення сили поверхневого натягу $\langle F_k \rangle$ у відповідності до виразу (9), де як індекс « i » слід брати індекс « k ». Результати запишіть у таблицю 2.
8. Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР випадкову складову $\Delta_2 F_k$ абсолютної похибки визначення сили у відповідності до виразу (10), де як індекс « i » слід брати індекс « k ». Результати запишіть у таблицю 2.
9. Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР абсолютну похибку визначення сили ΔF_k у відповідності до виразу (11), де як індекс « i » слід брати індекс « k ». Результати запишіть у таблицю 2.
10. Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР коефіцієнт поверхневого натягу у відповідності до виразу

$$\sigma_k = \frac{\langle F_k \rangle}{2l}. \quad (15)$$

Результати запишіть у таблицю 2.

11. Побудуйте графік залежності $\sigma(n)$, як показано на рисунку 76.
12. Побудуйте дотичну до одержаної залежності для $n = 0$ та визначте величини $\Delta' n$ та $\Delta' \sigma$, як показано на рисунку 76.

13. Відповідно до виразу (8) обчисліть поверхневу активність A_s мильного розчину.
14. Похибку визначення поверхневої активності розрахуйте за допомогою співвідношення

$$\Delta A_s = A_s \sqrt{\left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta' \sigma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{\Delta' n}\right)^2}, \quad (16)$$

де $\Delta n = 0,05 \cdot \rho_M \cdot V_0 / V$ – абсолютна похибка визначення концентрації; $\Delta \sigma = \max(\Delta \sigma_k)$ – абсолютна похибка визначення коефіцієнта поверхневого натягу

$$\Delta \sigma_k = \sigma_k \sqrt{\left(\frac{\Delta F_k}{\langle F_k \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2}. \quad (17)$$

15. Зробити висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Дати визначення коефіцієнта поверхневого натягу.
2. Що називають силою поверхневого натягу?
3. Які речовини називаються поверхневоактивними?
4. Що називається змочуванням та незмочуванням?
5. Послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Яка фізична природа поверхневого натягу?
7. Пояснити сутність капілярних явищ та їх роль у живій природі?
8. Одержати формулу (4). Пояснити зміст терміна “крайовий кут змочування”.
9. Якою величиною характеризується дія поверхневоактивних речовин? Дати визначення цієї величини.
10. У чому полягає небезпека ПАР для навколишнього середовища?

На оцінку “відмінно”

11. Одержати вираз для висоти підйому рідини у капілярі за умови заданого крайового кута змочування.
12. Як і чому коефіцієнт поверхневого натягу залежить від температури?
13. Класифікувати ПАР та описати кожен тип цих речовин.
14. Детально описати усі фізичні процеси, які мають місце у процесі прання.
15. Одержати вираз для розрахунку похибки (13).

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 1. Класична механіка і теорія відносності. Молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка. Механічні коливання та хвилі. Звук. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. http://uk.wikipedia.org/wiki/Поверхнево-активні_речовини
6. <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3420.html>

Лабораторна робота 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. МЕТА РОБОТИ

Експериментально визначити ЕРС джерела струму методом компенсації.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Постійний струм. Основні поняття

Електричний струм – це впорядкований рух зарядів. Тут і в подальшому будемо розглядати лише так званий **струм провідності**, або рух зарядів у провідниках. Для існування струму провідності повинні виконуватися дві умови: 1) наявність вільних заряджених частинок – тобто частинок, які можуть переміщатися під дією будь-якої сили; 2) наявність різниці потенціалів $\varphi_2 - \varphi_1 = U$ між ділянками середовища. Матеріали, які містять вільні заряди, називаються **провідниками**. Кількісною мірою електричного струму є **сила струму**

$$I = \dot{q} = \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

яка чисельно дорівнює заряду q , що проходить за одиницю часу через переріз провідника.

Властивість провідників перешкоджати впорядкованому руху зарядів називається **електричним опором** провідника. Одночасно опором називають кількісну міру цієї властивості і позначають її літерою R . Для металевого провідника довжиною l зі сталою площею поперечного перерізу S опір знаходиться із виразу

$$R = \rho l / S, \quad (2)$$

де ρ – питомий опір, який залежить від матеріалу провідника і температури зовнішнього середовища. Сила струму в таких провідниках визначається за **законом Ома для ділянки кола**

$$I = U/R . \quad (3)$$

Рух заряджених частинок, зумовлений чинниками електростатичного походження, не може існувати необмежено довго. Припустимо, певний об'єм провідника заряджений нерівномірно. У цьому випадку між ділянками провідника існуватиме різниця потенціалів $\Delta\varphi = U$, яка зумовить проходження струму. Однак струм приведе до вирівнювання густини заряду в провіднику, внаслідок чого його потенціал стане однаковим в усьому об'ємі. Таким чином, струм, зумовлений електростатичними силами, буде усувати одну із причин свого існування і згасати. Тому такі сили не можуть забезпечити постійний рух зарядів у колі. Сталу різницю потенціалів на окремих ділянках кола (відповідно і силу струму в колі) можна створювати за рахунок так званих сторонніх сил. **Сторонні сили** – це сили будь-якого походження, крім електростатичного, які здатні переміщати заряди проти електростатичного поля. Відношення роботи A сторонніх сил з переміщення заряду вздовж замкнутого контуру до величини цього заряду q називається **електрорушійною силою**, або **ЕРС** джерела струму

$$\mathcal{E} = A/q . \quad (4)$$

Як і напруга, ЕРС вимірюється у вольтах: $[\mathcal{E}] = \text{В}$.

Важливою характеристикою джерела струму є також його **внутрішній опір** r . Він впливає на струм у колі так само, як і зовнішній стосовно джерела опір R . Сила струму у колі, що містить джерело ЕРС, визначається за законом **Ома для повного кола**

$$I = \mathcal{E}/(R + r) . \quad (5)$$

2.2. Суть методу компенсації

Будь-яке електричне вимірювання вимагає певних затрат енергії на роботу вимірювального приладу. Наприклад, у випадку вимірювання величини ЕРС \mathcal{E}_x вольтметром (див. рис. 1а) через нього буде проходити струм, що визначається за формулою (5). Відповідно показання вольтметра будуть

$$U = \mathcal{E}_x - Ir_x = \mathcal{E}_x - \mathcal{E}_x r_x / (R_V + r_x), \quad (6)$$

де R_V – опір вольтметра; r_x – внутрішній опір джерела. Тобто проходження струму через джерело призводить до похибки вимірювання його ЕРС. Позбутися цієї похибки можна, якщо струм у колі відсутній, тобто $I = 0$. Остання умова буде виконуватися, коли ЕРС джерела **компенсована** падінням напруги на опорі, підключеному паралельно до джерела. На цьому принципі і базується **метод компенсації**.

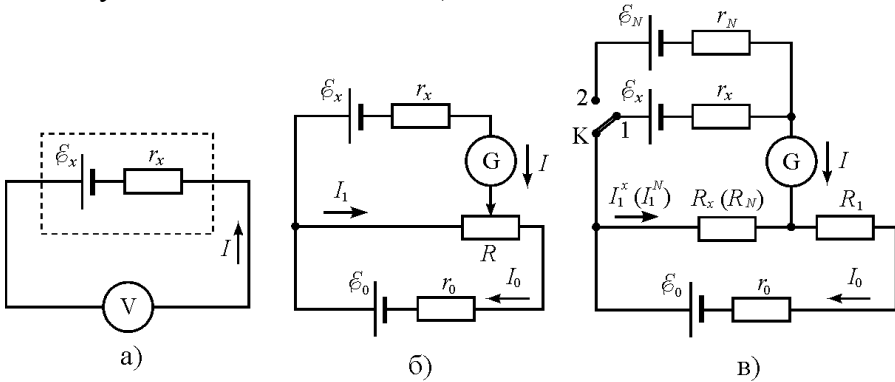


Рисунок 1 – Схема прямого вимірювання величини ЕРС вольтметром (а); схема компенсації ЕРС, що вимірюється, за рахунок зовнішнього джерела (б); схема для порівняння ЕРС невідомого джерела \mathcal{E}_x з ЕРС еталонного \mathcal{E}_N (в). Значення в дужках відповідають положенню 2 ключа K

Розглянемо даний метод докладніше. Нехай струм від допоміжного джерела \mathcal{E}_0 ($\mathcal{E}_0 > \mathcal{E}_x$) проходить через потенціометр R (див. рис. 1б). Струми I та I_1 будуть набувати довільних значень, обмежених умовою $I_1 + I = I_0$ внаслідок закону збереження заряду. Шляхом зміни положення бігунка змінного опору R можна досягти ситуації, коли струм I буде відсутнім. При цьому ЕРС \mathcal{E}_x буде скомпенсована падінням напруги на опорі R_x тієї частини потенціометра, що знаходиться ліворуч від бігунка (див. рис. 1в)

$$\mathcal{E}_x = I_1^x R_x = I_0 R_x. \quad (7)$$

Підкреслимо, падіння напруги $I_0 R_x$ створюється за рахунок енергії додаткового джерела \mathcal{E}_0 .

Визначати невідомі величини I_0 та R_x не буде потреби, якщо повторити усі наведені операції для *еталонного джерела* струму \mathcal{E}_N , а потім порівняти одержані результати. ЕРС еталонного джерела відома з великою точністю. Схема, за допомогою якої реалізується зазначена ідея, наведена на рисунку 1в. Шляхом перемикання ключа K в положення 2 та переміщенням бігунка змінного опору можна компенсувати ЕРС еталонного джерела

$$\mathcal{E}_N = I_1^N R_N = I_0 R_N. \quad (8)$$

При цьому струм I_0 у виразах (7) та (8) однаковий, оскільки в обох випадках він визначається сумарним опором потенціометра та внутрішнім опором зовнішнього джерела.

Як потенціометр зручно використовувати реохорд, який являє собою тонкий провідник зі сталим перерізом, розміщений вздовж проградуєваної в міліметрах шкали. Тоді згідно з виразом (2) опори R_x та R_N будуть визначатися відповідними довжинами провідників l_x та l_N , а коефіцієнти пропорційності будуть однакові. Поділимо співвідношення (7) на (8) і з урахуванням останньої обставини одержимо вираз для знаходження ЕРС \mathcal{E}_x через ЕРС еталонного джерела \mathcal{E}_N

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{l_x}{l_N}. \quad (9)$$

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Невідоме джерело ЕРС (\mathcal{E}_x).
2. Еталонне джерело ЕРС (\mathcal{E}_N).
3. Джерело ЕРС, за допомогою якого відбувається компенсація (\mathcal{E}_0).
4. Реохорд.
5. Гальванометр.
6. Магазин опорів.
7. Ключ.
8. Перемикач.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Принципова схема лабораторної роботи для визначення ЕРС та внутрішнього опору джерела зображена на рисунку 2, а загальний вигляд лабораторної установки наведено на рисунку 3. За допомогою перемикача K_1 6 до джерела живлення 3 підключаються через реохорд R_1 4 по чергово невідоме джерело \mathcal{E}_x 1 та еталонне джерело \mathcal{E}_N 2. Тут і далі літерне позначення відповідає схемі рисунка 2, а цифрове – рисунка 3. Для обмеження струмів у гілках схеми за допомогою магазину опорів 8 виставляються опори R та R_0 . Гальванометр G 5 фіксує проходження або відсутність струму в гілці скомпенсованого джерела. Для попередження проходження струмів, які перевищують діапазон вимірювання гальванометра, послідовно з ним ввімкнено ключ K_2 7. Під час підбору потрібного положення бігунка реохорда ключ K_2 має бути розімкнений.

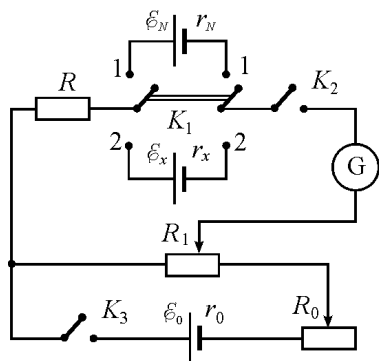


Рисунок 2 – Принципова схема установки для визначення ЕРС джерела

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтесь з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Запишіть у таблицю 1 значення ЕРС еталонного джерела \mathcal{E}_N 2 та залежну від температури поправку $\Delta' \mathcal{E}_N$, що зазначені на кришці джерела.

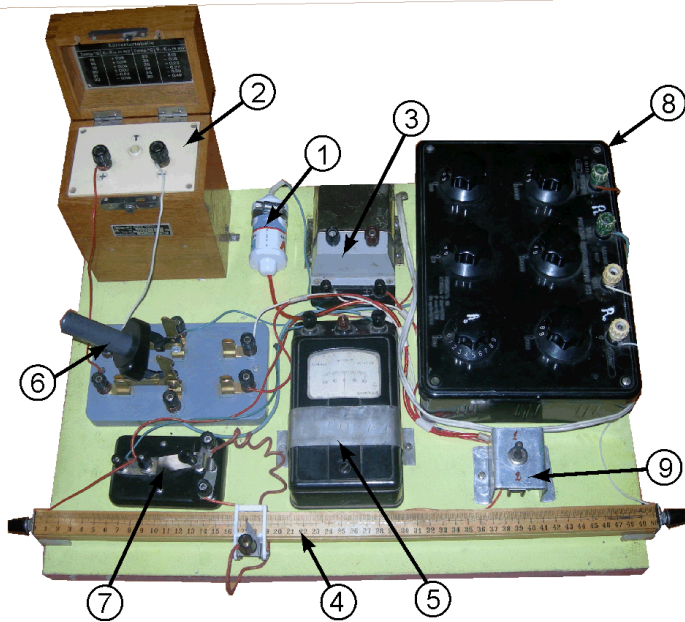


Рисунок 3 – Лабораторна установка: 1 – невідоме джерело \mathcal{E}_x ; 2 – еталонне джерело \mathcal{E}_N ; 3 – зовнішнє джерело \mathcal{E}_0 ; 4 – реохорд; 5 – гальванометр; 6 – перемикач для перемикання невідомого та еталонного джерел K_1 ; 7 – ключ K_2 ; 8 – магазин опорів; 9 – тумблер підключення \mathcal{E}_x послідовно з \mathcal{E}_0

3. Запишіть у таблицю 1 інструментальну похибку Δl визначення довжини дроту реохорда.
4. Встановіть на магазині опорів 8 опір $R_0 = 0$.
5. За допомогою перемикача K_1 6 підключіть невідоме джерело \mathcal{E}_x 1.
6. Виставте бігунок реохорда так, щоб струм через гальванометр був відсутній. Занесіть значення l_x до таблиці 1.

Увага! Щоб запобігти виходу з ладу гальванометра, для розриву вітки поставлено ключ K_2 . У процесі компенсації слід замикати вітку гальванометра шляхом короточасних натискань на даний ключ.

7. За допомогою перемикача K_1 підключіть еталонне джерело \mathcal{E}_N 2, аналогічним чином визначте l_N та занесіть його значення до таблиці 1.

Увага! Щоб запобігти виходу з ладу еталонного джерела ЕРС, не слід тримати його включеним тривалий час. Тому виміри потрібно виконувати якнайшвидше, після чого треба відключати еталонне джерело перемикачем K_1 .

Таблиця 1 – До визначення ЕРС \mathcal{E}_x

№ досліду	l_{xi} , мм	$|\langle l_x \rangle - l_{xi}|$, мм	l_{Ni} , мм	$|\langle l_N \rangle - l_{Ni}|$, мм
1				
2				
...				
$N - 1$				
N				
середнє $\langle \dots \rangle$		—		—

$\mathcal{E}_N = \mathcal{E}_N(20^\circ\text{C}) + \Delta' \mathcal{E}_N =$, В	$\Delta_1 l =$, мм	$\Delta_2 l_x =$, мм	$\Delta_2 l_N =$, мм
---	---------------------	-----------------------	-----------------------

8. Повторіть усі вищенаведені операції ще чотири рази та заповніть таблицю 1.
9. У перший рядок таблиці 2 запишіть дані останнього вимірювання з таблиці 1.
10. Встановіть на магазині опорів 8 опір $R_0 = 0,1$ Ом та визначте l_x та l_N . Результати занесіть до таблиці 2. ЕРС \mathcal{E}_x для кожного досліду визначити із співвідношення (9).
11. Повторіть п.10 ходу роботи ще 3 рази для $R_0 = 0,2; 0,3; 0,4$ Ом.

Унаслідок цього експерименту ви повинні пересвідчитись, що результати не залежать від величини опору R_0 .

Таблиця 2 – Демонстрація незалежності результатів від R_0

№ досліду	R_0 , Ом	l_{xi} , мм	l_{Ni} , мм	\mathcal{E}_{xi} , В
	0			
	0,1			
	0,2			
	0,3			
	0,4			

12. Визначте середні значення $\langle l_x \rangle$ та $\langle l_N \rangle$ та величини $\langle l_x \rangle - l_{xi}$ та $\langle l_N \rangle - l_{Ni}$. Результати запишіть до відповідних колонок таблиці 1.
13. Обчисліть \mathcal{E}_x за допомогою формули (9) та даних таблиці 1. Тут як l_x та l_N слід брати обчислені за даними таблиці 1 середні значення $\langle l_x \rangle$ та $\langle l_N \rangle$.
14. За допомогою даних таблиці 1 обчисліть абсолютну похибку визначення ЕРС за формулою

$$\Delta \mathcal{E}_x = \mathcal{E}_x \sqrt{\left(\frac{\Delta \mathcal{E}_N}{\mathcal{E}_N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_N}{\langle l_N \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_x}{\langle l_x \rangle}\right)^2}, \quad (10)$$

де як $\Delta \mathcal{E}_N$ потрібно брати одиницю найменшого розряду величини \mathcal{E}_N ,

$$\Delta l_N = \sqrt{(\Delta_1 l)^2 + (\Delta_2 l_N)^2}, \quad (11)$$

$$\Delta_2 l_N = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\langle l_N \rangle - l_{Ni})^2} \quad (N = 5). \quad (12)$$

Абсолютну похибку Δl_x слід визначати аналогічно до виразів (11) та (12) зміною індексу «N» на «x».

15. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Що називають електричним струмом? Умови його існування.
2. Дати визначення сили струму.
3. Сформулювати закон Ома в інтегральній формі для повного кола та для ділянки кола.
4. Яка перевага методу компенсації над прямими вимірюваннями ЕРС?
5. Викласти послідовність виконання роботи.

На оцінку “добре”

6. Розкрити поняття “сторонні сили” та “електрорушійна сила”.
7. Розкрити поняття “електричний опір”.
8. Записати закон Ома в диференціальній формі для ділянки кола та для повного кола. Показати зв’язок між диференціальною та інтегральною формами запису.
9. Викласти сутність вимірювання ЕРС методом компенсації.
10. Накреслити принципову схему лабораторної установки. Пояснити призначення всіх її елементів.

На оцінку “відмінно”

11. Одержати розрахункову формулу (9) для визначення ЕРС \mathcal{E}_x невідомого джерела методом компенсації.
12. Вивести формулу для знаходження похибки визначення ЕРС \mathcal{E}_x .
13. Записати закон Джоуля-Ленца в диференціальній та інтегральній формах. Показати взаємозв’язок між ними.
14. Записати правила Кірхгофа та пояснити їх застосування на прикладі.
15. Знайти струми у кожній вітці електричної схеми, заданої викладачем, за правилами Кірхгофа.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 2. Електрика. Магнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. – М.: Наука, 1980.

Лабораторна робота 9

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

1. МЕТА РОБОТИ

Визначити вектор індукції магнітного поля Землі.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Поняття магнітного поля

Згідно з класичним визначенням **магнітне поле** – це особливий вид матерії, який існує навколо електричних струмів (постійних магнітів) та передає дію одних струмів (магнітів) на інші. Як і електричне, магнітне поле має свою силову характеристику, що визначає інтенсивність взаємодії струмів – **магнітну індукцію** \vec{B} . Але формального визначення за аналогією з напруженістю електричного поля для \vec{B} не існує. Причина у тому, що будь-який струм як джерело магнітного поля є просторовим об'єктом. Відповідно індукція магнітного поля \vec{B} буде залежати, в тому числі, і від геометричної конфігурації струму. Експериментально встановлено, що кожен елемент $d\vec{l}$ струму I в точці простору, положення якої задано радіусом-вектором \vec{r} (див. рис. 1), збуджує поле $d\vec{B}$, яке визначається **законом Біо-Савара-Лапласа**

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{|\vec{r}|^3}, \quad (1)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – магнітна стала. Індукція сумарного поля \vec{B} , що створюється усім провідником зі струмом, визначається лінійним інтегралом від $d\vec{B}$, оскільки для магнітного поля є справедливим принцип суперпозиції. Просторова конфігурація магнітного поля описується за допомогою так званих **силових ліній** – ліній, дотична до кожної з яких в будь-якій точці простору збігається з напрямком \vec{B} , а їх густина пропорційна модулю індукції

магнітного поля. Важливо, що на відміну від силових ліній електричного поля силові лінії магнітного поля завжди **замкнені**.

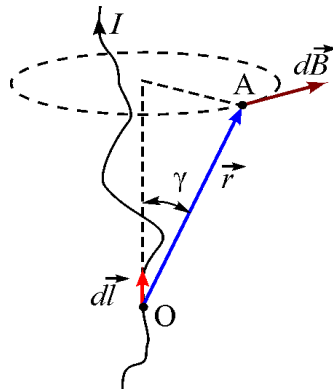


Рисунок 1 – До закону Біо-Савара-Лапласа. Точка О задає початок елемента струму $d\vec{l}$, який створює поле з індукцією $d\vec{B}$ в точці А. Вектор \vec{r} з'єднує точки О та А

2.2. Магнітне поле Землі

Планета Земля являє собою великий за розмірами постійний магніт (див. рис. 2а). Походження магнітного поля Землі на сьогодні до кінця не встановлено. Проте відомо, що воно формується як за рахунок внутрішніх процесів у надрах нашої планети, так і зовнішніми космічними джерелами. Перший чинник дає основний внесок і може бути поясненим у рамках гіпотези так званого **гідромагнітного динамо**. У спрощеному вигляді її суть полягає у такому. Припустимо, що вздовж осі обертання Землі діє постійне поле \vec{B}' . Розглянемо ядро Землі, що обертається (див. рис. 2б). За рахунок сили Лоренца вільні електрони, які містяться у провідному матеріалі ядра, будуть виходити на траєкторії з більшими радіусами. Відповідно їх концентрація зі збільшенням радіуса буде зростати, і їх заряд не буде компенсуватися зарядом іонів. Обертаючись, така система еквівалентна набору колових струмів, які будуть створювати сумарне магнітне поле \vec{B} вздовж \vec{B}' . Таким чином, магнітне поле буде підсилювати само себе

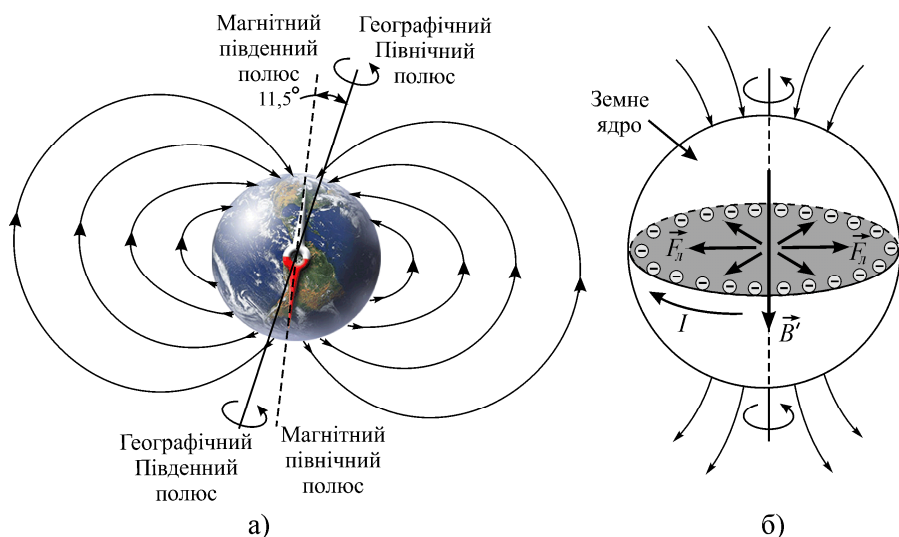


Рисунок 2 – Силкові лінії магнітного поля Землі (а). До пояснення гіпотези гідромагнітного динамо (б)

поки явище самоіндукції не зупинить подальше його зростання. На подібному ефекті працюють генератори постійного струму із самозбудженням. Початкове поле \vec{B}' може мати дуже малу величину і бути зумовленим гідромагнітним ефектом, який полягає у наявності магнітного поля вздовж осі обертання для будь-якого тіла, що обертається. Значний вплив на результуюче магнітне поле має той факт, що верхні шари земного ядра є рідкими, і їх рух є досить складним завдяки конвективним потокам та потокам, зумовленим відцентровими силами. Тому ще раз зазначимо, що вищенаведені пояснення є дуже спрощеними.

У результаті конфігурація силових ліній магнітного поля Землі подібна до поля, що створюється постійним смуговим магнітом (див. рис. 2а). Умовились, що ділянку магніту, в яку входять силові лінії, називають **південним полюсом**, а ділянку магніту, з якої виходять силові лінії, називають **північним полюсом** магніту. Лінії, проведені вздовж поверхні Землі, які з'єднують географічні полюси, називають *географічними меридіанами* (див. рис. 3а). Аналогічні лінії, які з'єднують магнітні полюси, називають *магнітними меридіанами*.

вають *магнітними меридіанами*. З рисунка 2 та рисунка 3а видно, що південний магнітний полюс Землі знаходиться біля північного географічного полюса і навпаки. Така особливість є основою для приблизного визначення напрямку на північ за допомогою компаса. Слід зазначити, що положення магнітних полюсів Землі не є фіксованим. На поточний момент південний магнітний полюс знаходиться за координатами 109° західної довготи та 79° північної широти, і він дрейфує зі швидкістю 40 м/добу з півночі Канади до Сибіру. З рисунка 2а також видно, що напрямок та модуль поля \vec{B} будуть різними для різних точок земної поверхні. Щоб визначити вектор у тривимірному просторі, досить задати три незалежні координати. Історично склалося, що магнітне поле Землі визначається за допомогою двох кутів та однієї лінійної величини. **Магнітним схиленням** α називається кут, який утворюють магнітний та географічний меридіани в даній точці земної поверхні (див. рис. 3б). **Магнітним нахиленням** β називається кут між горизонтальною площиною та вектором індукції поля Землі \vec{B} . **Горизонтальною складовою вектора індукції** поля Землі \vec{B}_0 називається проекція \vec{B} на горизонтальну площину в даній точці земної поверхні. Вищезазначені три величини називають *елементами земного магнетизму*.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Тангенс-гальванометр.
2. Реостат.
3. Міліамперметр.
4. Джерело живлення.
5. Інклінатор.
6. Глобус.
7. Нитка.
8. Транспортир.

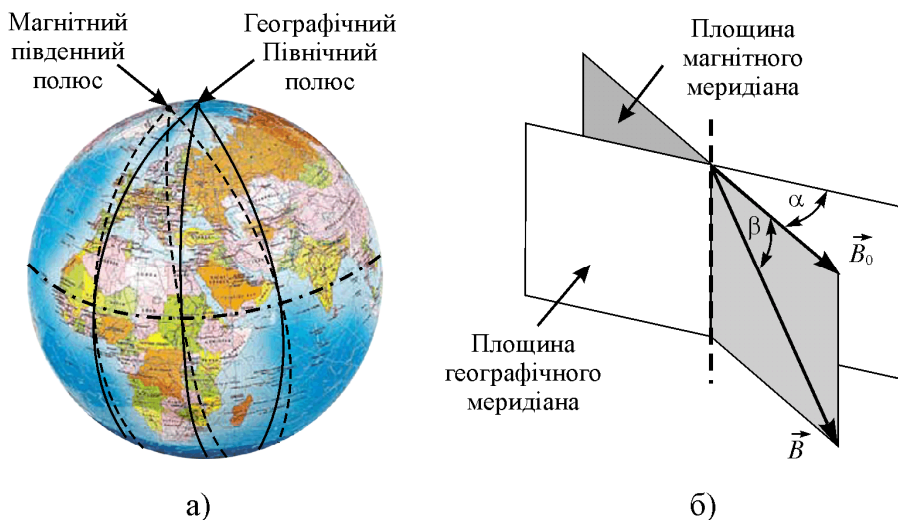


Рисунок 3 – Магнітні (пунктирна лінія) та географічні (суцільна лінія) меридіани. Штрих-пунктирна лінія – екватор (а). Елементи земного магнетизму. Пунктирна пряма – нормаль до Землі в точці знаходження спостерігача (б)

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для визначення горизонтальної складової індукції поля Землі \vec{B}_0 використовується **тангенс-гальванометр** або тангенс-бусоль (див. рис. 4), що підключається до джерела живлення згідно з принциповою схемою рисунка 5а. Прилад складається з немагнітного кільця радіусом R , на яке намотаний тонкий провідник. Кількість витків – N . У центрі кільця розміщено магнітну стрілку у такий спосіб, що вона може обертатися у площині, перпендикулярній до площини витків. Тангенс-гальванометр встановлюють так, що площина витків є вертикальною. Тоді магнітна стрілка, вільно обертаючись у горизонтальній площині, встановлюється вздовж горизонтальної складової вектора індукції магнітного поля.

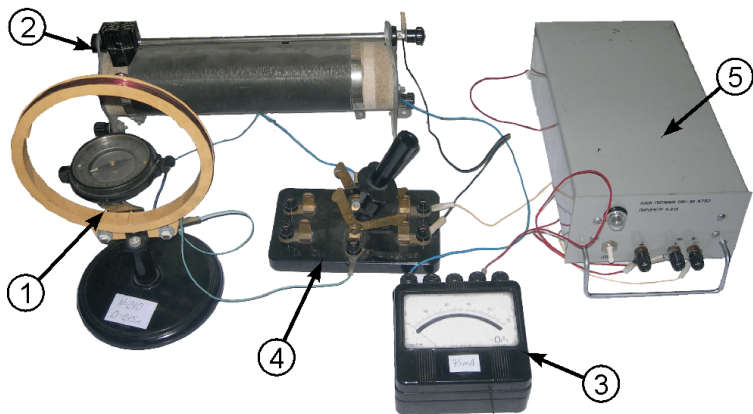


Рисунок 4 – Установка для визначення горизонтальної складової поля Землі: 1 – тангенс-гальванометр; 2 – реостат; 3 – міліамперметр; 4 – перемикач напрямку струму через тангенс-гальванометр; 5 – блок живлення

За відсутності струму у витках магнітна стрілка буде спрямована вздовж шуканої горизонтальної складової \vec{B}_0 . Після ввікнення струму I стрілка буде спрямована вздовж результуючого поля $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1$ (див. рисунок 5б, в)

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 NI}{2R} \vec{n}, \quad (2)$$

де \vec{B}_1 – індукція поля системи колових струмів у їх центрі; \vec{n} – нормаль до витків, що визначається правилом правого гвинта за напрямком струму. Вираз (2) був одержаний з (1) інтегруванням вздовж кола. Якщо сумістити площину витків з площиною магнітного меридіана, то вектори \vec{B}_0 і \vec{B}_1 утворять прямокутник (див. рисунок 5в), з якого можна знайти модуль \vec{B}_0 у наступному вигляді:

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{2R \operatorname{tg} \varphi}. \quad (3)$$

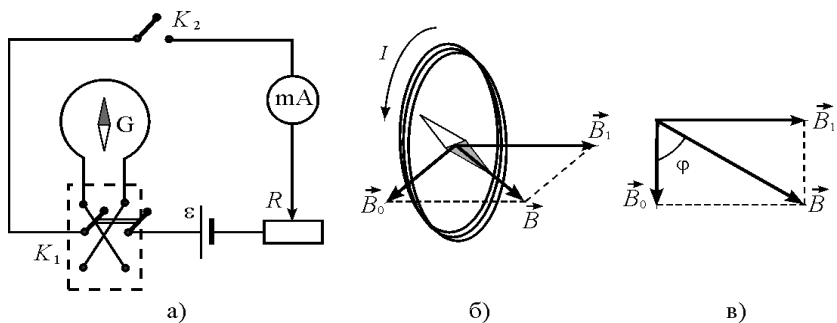


Рисунок 5 – Схема ввімкнення тангенс-гальванометра (а); магнітна стрілка під дією горизонтальної складової магнітного поля Землі та поля витків зі струмом (б); сумарне поле в центрі колових витків тангенс-гальванометра (в)

Величину магнітного нахилення β визначають за допомогою **інклінометра** (див. рисунок 6). Даний прилад являє собою магнітну стрілку, вісь обертання якої проходить через геометричний центр перпендикулярно до її площини. Вісь обертання стрілки, в свою чергу, може обертатися у вертикальній площині за допомогою горизонтального вала, закріпленого у опорі. При цьому разом зі стрілкою буде повертатися і площина проградуйованої шкали.

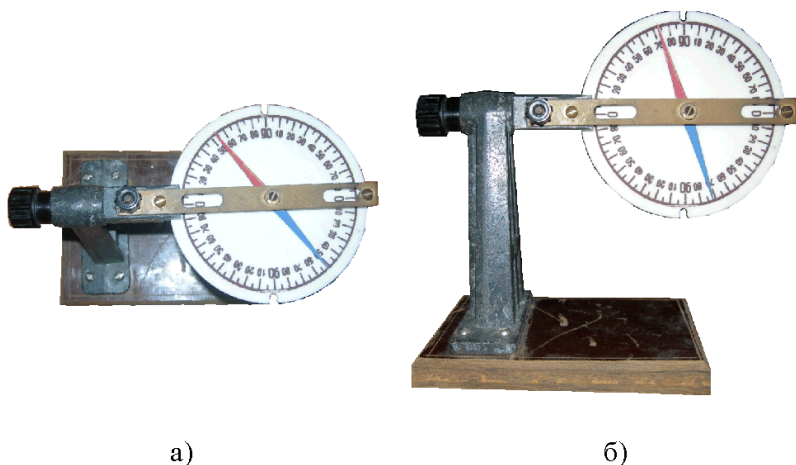


Рисунок 6 – Інклінометр: горизонтальне положення стрілки, вид згори (а); вертикальне положення стрілки, вид збоку (б)

Щоб виміряти нахилення β , потрібно спочатку розмістити стрілку інклінометра у площині магнітного меридіана так, щоб її вісь була вертикальною. Потім поворотом горизонтального вала на 90° слід розмістити магнітну стрілку у вертикальній площині. Кут її нахилу до горизонту і буде являти собою магнітне нахилення β .

Магнітне схилення α для географічного розташування міста Сум ($50^\circ 55'$ північної широти $34^\circ 45'$ східної довготи) визначається як кут між напрямком на географічний Північний полюс та напрямком на південний магнітний полюс (79° північної широти та 109° західної довготи).

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з будовою установки та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Розмістіть тангенс-гальванометр таким чином, щоб площина витків збігалася з площиною магнітного меридіана Землі.
3. З'єднайте прилад із джерелом живлення згідно зі схемою рисунка 5а.
4. Перепишіть значення діаметра витків $D = 2R$ та кількість витків N тангенс-гальванометра у зошит.
5. Занесіть до таблиці 1 похибки вимірювання кута за допомогою компаса $\Delta\varphi$ та вимірювання струму амперметром

$$\Delta I = \frac{\delta I \cdot I_{\max}}{100}, \quad (4)$$

де δI – клас точності амперметра, зазначений на корпусі або на шкалі приладу; I_{\max} – його верхня межа вимірювання.

6. Одержіть від викладача 5 значень сили струму у витках, для яких будуть проводитися вимірювання.
7. За допомогою реостата встановіть перше задане значення сили струму у витках тангенс-гальванометра. За встановленим положенням магнітної стрілки визначте кут φ_1 , який становить індукція сумарного поля \vec{B} з площиною магнітного меридіана. Результат занесіть до таблиці 1.

Таблиця 1 – До визначення горизонтальної складової поля Землі

№ дослідю	I, mA	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2, ^\circ$	$B_0, \text{Tл}$	$|\langle B_0 \rangle - B_{0i}|, \text{Tл}$
1						
2						
...						
$N-1$						
N						

$\Delta\varphi = \dots$	$\Delta I = \dots$	$\Delta R = 0,5 \text{ см}$	$\langle B_0 \rangle = \dots$
$\max(\Delta_1 B_0) = \dots$	$\Delta_2 B_0 = \dots$		$\Delta B_0 = \dots$

8. Перемикачем K_1 змініть напрямок струму у витках, не змінюючи його величини. Визначте кут φ_2 і занесіть його до таблиці 1.
9. Повторіть наведені у пунктах 7 та 8 операції для наступних чотирьох значень струму. Результати занесіть до таблиці 1.
10. Відімкніть установку від електричної мережі.
11. Розмістіть інклінометр таким чином, щоб північний полюс його стрілки вказував на 0.
12. Поверніть вісь вала на 90° та виміряйте кут β . Результат занесіть до таблиці 2.

Таблиця 2 – До визначення магнітного нахилення β та схилення α

№ дослідю	$\beta, ^\circ$	$|\langle \beta \rangle - \beta_i|, ^\circ$	$\Delta_1 \beta, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$|\langle \alpha \rangle - \alpha_i|, ^\circ$	$\Delta_1 \alpha, ^\circ$
1						
2						
...						
$N-1$			$\Delta_2 \beta, ^\circ$			$\Delta_2 \alpha, ^\circ$
N						
середнє $\langle \dots \rangle$		–			–	
–	$\Delta\beta =$			$\Delta\alpha =$		

13. Повторіть дії пунктів 11 та 12 ще чотири рази.
14. За допомогою глобуса, нитки та транспортира визначте магнітне схилення α для міста Сум. Для цього візьміть шматок нитки, складіть удвоє та зафіксуйте його середину в місці знаходження м. Сум ($50^\circ 55'$ північної широти, $34^\circ 45'$ східної

довготи). Два вільних кінці зафіксуйте відповідно на північному географічному полюсі та південному магнітному полюсі (79° північної широти та 109° західної довготи).

15. Транспортром виміряйте п'ять разів величину кута α . Результат занесіть до таблиці 2.
16. Занесіть інструментальну похибку $\Delta_1\beta$ інклінатора та $\Delta_1\alpha$ транспортира до таблиці 2.
17. Визначте систематичну складову абсолютної похибки Δ_1B_0 непрямого вимірювання величини B_0 для кожного вимірювання за формулою

$$\Delta_1B_{0i} = B_{0i} \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta \varphi}{\sin \varphi_i}\right)^2}. \quad (5)$$

У подальшому буде використовуватися максимальне значення $\max(\Delta_1B_0)$ з усіх Δ_1B_{0i} . Результати запишіть у таблицю 1.

18. Визначте випадкову складову абсолютної похибки Δ_2B_0 у відповідності до виразу

$$\Delta_2B_0 = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\langle B_0 \rangle - B_{0i})^2} \quad (N = 5). \quad (6)$$

Результати запишіть у таблицю 1.

19. Визначте абсолютну похибку визначення величини горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі згідно з виразом

$$\Delta B_0 = \sqrt{[\max(\Delta_1B_0)]^2 + (\Delta_2B_0)^2}. \quad (7)$$

20. Визначте випадкові складові абсолютних похибок визначення магнітного нахилення $\Delta_2\beta$ та магнітного схилення $\Delta_2\alpha$ у відповідності до виразів

$$\Delta_2\beta = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\langle \beta \rangle - \beta_i)^2} \quad (N = 5), \quad (8)$$

$$\Delta_2\alpha = 3\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N(\langle\alpha\rangle - \alpha_i)^2} \quad (N = 5). \quad (9)$$

Результати запишіть у таблицю 2.

21. Визначте абсолютні похибки визначення величин магнітного нахилення та магнітного схилення згідно з виразами

$$\Delta\beta = \sqrt{(\Delta_1\beta)^2 + (\Delta_2\beta)^2}, \quad (21)$$

$$\Delta\alpha = \sqrt{(\Delta_1\alpha)^2 + (\Delta_2\alpha)^2}. \quad (10)$$

Результати запишіть у таблицю 2.

22. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Що називають магнітним полем?
2. Записати закон Біо-Савара-Лапласа, пояснити усі величини, які він містить. Пояснити даний закон за допомогою рисунка.
3. Перелічити елементи земного магнетизму та дати їм визначення.
4. Пояснити будову тангенс-гальванометра та інклінометра.
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Нарисувати силові лінії магнітного поля Землі, показати на рисунку географічні та магнітні полюси.
7. Пояснити принцип дії тангенс-гальванометра та інклінометра.
8. Одержати формулу (2), користуючись законом Біо-Савара-Лапласа (1).
9. Як за допомогою магнітної стрілки можна визначити положення площини географічного меридіана?
10. Пояснити природу похибок вимірювань у даній лабораторній роботі.

На оцінку “відмінно”

11. Користуючись законом Біо-Савара-Лапласа, одержати вираз для індукції поля нескінченного прямого струму.
12. Пояснити, чому магнітна стрілка розміщується вздовж силових ліній магнітного поля.
13. Пояснити, як буде себе поводити контур зі струмом у магнітному полі.
14. Одержати робочу формулу для визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.
15. Одержати формулу для визначення інструментальної похибки $\Delta_2 B_0$ непрямого вимірювання величини B_0 .

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 2. Електрика. Магнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. – Суми, 2003.
3. Бушок Г.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003.
6. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высш. шк., 1991.
7. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 2. Электричество и магнетизм. – М.: Физматлит, 2001.

Лабораторна робота 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛА

1. МЕТА РОБОТИ

1. Засвоїти методику роботи з поляриметром.
2. Визначити концентрацію цукрового розчину за допомогою поляриметра.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Явище поляризації

Світлом у вузькому розумінні називають сукупність електромагнітних хвиль, частоти яких лежать у межах сприйняття людського ока: $\nu = 4,3 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц, що відповідає довжинам хвиль у вакуумі від $\lambda = 400$ до 700 нм. У свою чергу, під електромагнітною хвилею розуміють процес поширення взаємно перпендикулярних коливань електричної \vec{E} та магнітної \vec{H} компонент єдиного електромагнітного поля. При цьому як \vec{E} , так і \vec{H} перпендикулярні до напрямку поширення хвилі, що задається хвильовим вектором \vec{k} . Таким чином, електромагнітна теорія визначає лише відносну орієнтацію зазначених векторів, проте жодним чином не регламентує безпосереднього положення \vec{E} та \vec{H} для поточного моменту часу. Для того щоб однозначно задати хвильовий процес, потрібно вказати часову залежність положення площини коливань E або *тип поляризації*. У разі, коли вектор \vec{E} виконує коливання весь час в одній площині, світло називають **плоскополяризованим**. Якщо площина коливань обертається рівномірно навколо напрямку поширення хвилі, говорять, що світло є **поляризованим по колу**, або **циркулярно поляризованим** (див. рис. 1). Коли під час обертання площини коливань змінюється модуль вектора \vec{E} таким чином, що його кінець описує еліпс, – світло є **поляризованим по еліпсу**, або **еліптично поляризованим**. Узагальнюючи наведені визначення, можна зробити висновок, що **поляризованим** називають таке світло, для якого коливання вектора \vec{E} певним чином

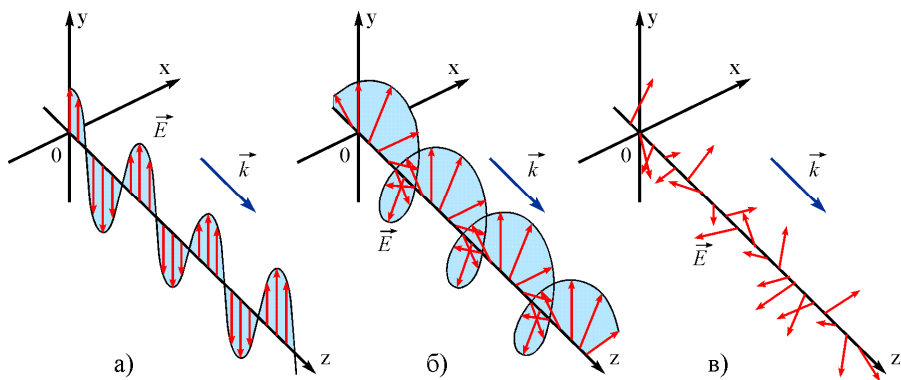


Рисунок 1 – Схематичні зображення: плоскополяризованого (а); поляризованого по колу (б); неполяризованого світла (в)

упорядковані. У протилежному випадку говорять, що світло є **природним** або **неполяризованим**.

У переважній більшості випадків доводиться мати справу саме з природним світлом. Будь-яке макроскопічне джерело електромагнітного випромінювання складається з великої кількості безпосередніх випромінювачів – атомів. Незважаючи на те, що атоми одного виду випромінюють на одних і тих самих довжинах хвиль, за рахунок різної геометрії їх розміщення та незгодженості моментів випромінювання результуючі коливання вектора \vec{E} мають хаотичний характер для будь-якого світлового променя. Великий інтерес для багатьох дослідницьких та промислових потреб має поляризоване світло. Тому актуальним є одержання поляризованого світла з неполяризованого. Прилади, які перетворюють природне світло на плоскополяризоване, називають **поляризаторами**.

2.2. Подвійне променезаломлення

Вектор \vec{E} у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, можна представити у вигляді двох взаємно перпендикулярних компонент \vec{E}_x та \vec{E}_y (див. рис. 2а). Фактично, для того щоб поляризувати природне світло, потрібно розділити промінь на дві частини, кожна з яких буде носієм однієї з двох компонент. Обидві частини являтимуть собою промені плоско-

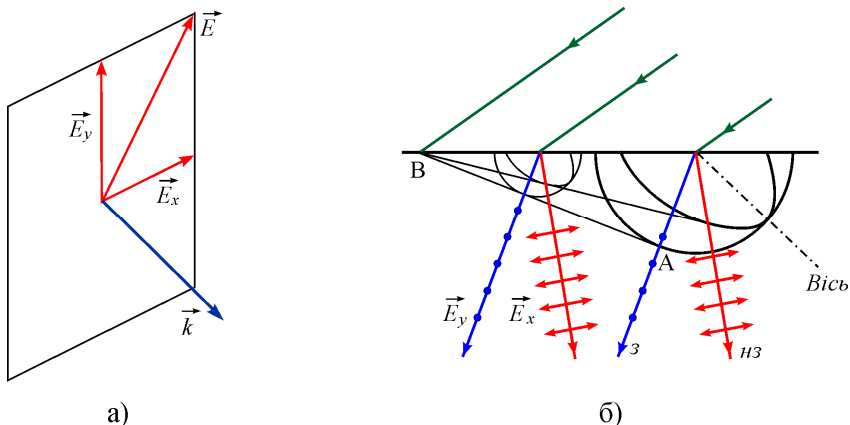


Рисунок 2 – Схематичні зображення: розкладання вектора \vec{E} на компоненти (а); хід звичайного (з) та незвичайного (нз) променів в одновісному кристалі (б)

поляризованого світла, що готові до використання. На практиці реалізувати таку ситуацію можливо шляхом пропускання світла через деякі анізотропні кристали. Анізотропія електричних властивостей, зумовлена кристалічною будовою, призводить до того, що умови подальшого поширення коливань для взаємно перпендикулярних компонент \vec{E}_x та \vec{E}_y є різними. Це проявляється в різних значеннях показників заломлення для хвильносіїв \vec{E}_x та \vec{E}_y і, як наслідок, у різних напрямках поширення для таких хвиль.

Пояснимо дане явище на прикладі одновісного кристала. **Одновісним** називають кристал, який має лише одну оптичну вісь. **Оптичною віссю** називають напрямок у кристалі, вздовж якого показник заломлення не залежить від напрямку коливань \vec{E} . Тобто під час поширення вздовж оптичної осі природне світло не буде поділятися на дві плоскополяризовані частини. Будь-яку площину, що проходить через оптичну вісь, називають **головною площиною кристала**. Нехай промінь природного світла падає під певним кутом на кристал. Користуючись довільністю поділу вектора \vec{E} на компоненти \vec{E}_x та \vec{E}_y , будемо вважати, що \vec{E}_x лежить у головній площині, а \vec{E}_y перпендикулярна до неї. Одновісний кристал має два значення відносної

діелектричної проникності: ε_{\perp} – у напрямку, перпендикулярно до оптичної осі, та ε_{\parallel} – у напрямку, паралельному оптичній осі. Швидкість поширення хвилі, що відповідає \vec{E}_y , визначається показником заломлення

$$n_0 = \sqrt{\varepsilon_{\perp}} \quad (1)$$

і за умови перпендикулярності \vec{E}_y до оптичної осі буде однаковою незалежно від напрямку коливань. Згідно з принципом Гюйгенса кожна точка, до якої дійшла хвиля, сама стає джерелом вторинних хвиль. Фронти вторинних хвиль для променя \vec{E}_y являтимуть собою сфери (див. рисунок 2б). Наступний фронт самої хвилі буде обвідною поверхнею фронтів вторинних хвиль (лінія AB на рисунку 2б). Напрямок самого променя буде визначатися згідно зі стандартним законом заломлення

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_0. \quad (2)$$

Тому такий промінь називають **звичайним**.

У той самий час для хвилі-носія \vec{E}_x ситуація буде іншою. Залежно від напрямку її поширення діелектрична проникність буде змінюватися від ε_{\perp} до ε_{\parallel} , і тому швидкість поширення такої хвилі залежатиме від напрямку. Фронти вторинних хвиль матимуть форму еліпсоїдів обертання, а хвильовий фронт самої хвилі-носія \vec{E}_x не збігатиметься з AB (див. рисунок 2б). Це означає, що дві плоскополяризовані хвилі із взаємно перпендикулярними напрямками коливань напруженості електричного поля будуть поширюватися у різних напрямках. Другий промінь, який не підкоряється закону заломлення, називають **незвичайним**. Саме явище наявності двох заломлених променів в анізотропному кристалі називають **подвійним променезаломленням**.

2.3. Обертання площини поляризації

З історичних причин **площиною поляризації** називають площину, перпендикулярну до площини коливань вектора \vec{E} . Оскільки ці площини однозначним чином пов'язані одна з одною, в подальшому будемо користуватися також і терміном “площина поляризації”. Встановлено, що деякі речовини здатні обертати площину коливань вектора \vec{E} . Такі речовини називають оптично активними. До них відносять тверді тіла – кварц, кіновар (сульфід ртуті II); чисті рідини – нікотин, скипидар; а також розчини оптично активних речовин у неактивних розчинниках, наприклад, водні розчини цукру та винної кислоти. Елементарна теорія обертання площини коливань була побудована Френелем. В її основу покладене припущення, що оптично активні речовини мають особливий тип подвійного променезаломлення, який полягає в розкладанні плоскополяризованої світлової хвилі на дві хвилі, кожна з яких поляризована по колу. При цьому для однієї з них напрямком обертання вектора напруженості електричного поля буде збігатися з напрямком руху годинникової стрілки (права поляризація), для іншої – буде протилежним (ліва поляризація). Амплітуди поляризованих по колу хвиль однакові й становлять половину амплітуди початкової хвилі $E_1 = E_2 = E/2$. У разі, коли швидкість їх поширення однакова, в будь-який момент часу їх сума зображатиме коливання вектора \vec{E} в одній площині (див. рис. 3а, б).

Іншою буде ситуація, якщо швидкості їх поширення не збігатимуться. Це є можливим завдяки різним показникам заломлення n_n для правополяризованої та n_l для лівополяризованої хвиль. Синхронність обертання \vec{E}_1 та \vec{E}_2 порушується завдяки тому, що довжини двох поляризованих по колу хвиль стають різними. За час одного оберту вектора напруженості хвиля проходить відстань, що дорівнює її довжині. Тому внаслідок проходження через шар оптично активного середовища довжиною l кути повороту хвиль \vec{E}_1 та \vec{E}_2 будуть відрізнятись на $\Delta\Psi = \Psi_n - \Psi_l$. У результаті площина поляризації змінить свою орієнтацію на кут $\alpha = \Delta\Psi/2$ (див. рисунок 3в). Оптична різниця ходу двох хвиль

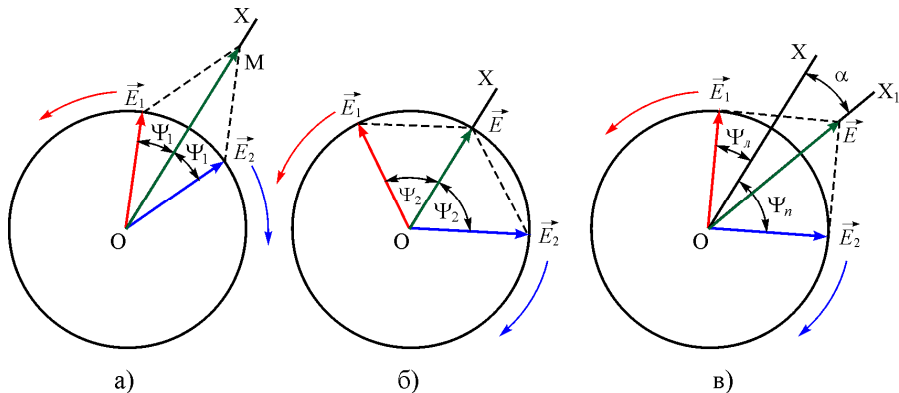


Рисунок 3 – Подання плоскополяризованої хвилі як суперпозиції поляризованих по колу ліво- та правополяризованої хвиль. Однакова швидкість поширення ліво- та правополяризованої хвиль (а, б); різні швидкості (в)

$$\Delta = l(n_l - n_n) \quad (3)$$

пов'язана з різницею фаз коливань на виході з оптично активної речовини як

$$\Delta\Psi = \frac{\omega}{c} l \cdot n_l - \frac{\omega}{c} l \cdot n_n = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (4)$$

де λ_0 – довжина хвилі у вакуумі.

Таким чином, кут повороту площини поляризації буде описуватися залежністю

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda_0} l(n_l - n_n). \quad (5)$$

Для розчинів оптично активної речовини з концентрацією C для монохроматичного світла (5) переходить у відомий закон Біо

$$\alpha = [\alpha]Cl, \quad (6)$$

де $[\alpha]$ – питоме обертання, що залежить від типу речовини.

Застосування закону Біо (6) дозволяє визначати концентрацію активної речовини в розчині шляхом вимірювання кута обе-

ртання площини коливань α . Такий метод називають **поляриметричним** методом кількісного аналізу. Він є одночасно точнішим і швидшим за інші методи, тому має широке застосування як у лабораторних дослідженнях, так і в промисловості.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Поляриметр.
2. Кювета з розчином відомої концентрації.
3. Дві кювети з розчином невідомої концентрації.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Значна поширеність поляриметричного методу аналізу зумовила наявність великого набору вимірювальних пристроїв – **поляриметрів**, призначених для спостереження за обертанням площини коливань вектора \vec{E} у світловій хвилі. У найбільш типовому виконанні схема поляриметра має вигляд, як показано на рисунку 4а. Як правило, як поляризатори використовують так звані **призми Ніколя** (див. рисунок 4б). Кожна така призма являє собою кристал ісландського шпату (різновид кальциту, CaCO_3), розрізаний навпіл під певним кутом, як показано на рисунку 4б. Дві половини кристала в подальшому склеюються за допомогою канадського бальзаму (екстракт ефірних олій та смол з рослин *Abies balsamea* – пихти бальзамічної, або *Abies canadensis* – канадської ялини). Склад речовин та геометрія виробу підібрані таким чином, що з утворених унаслідок подвійного променезаломлення двох плоскополяризованих променів один (незвичайний) вийде з призми, не змінюючи напрямку. Водночас звичайний промінь унаслідок повного відбивання на межі поділу ісландський шпат – канадський бальзам буде виходити через іншу грань призми і поглинатиметься поляриметром.

Від джерела S світло проходить через систему лінз та світлофільтр F , а потім потрапляє в поляризатор P та поляризатор P' .

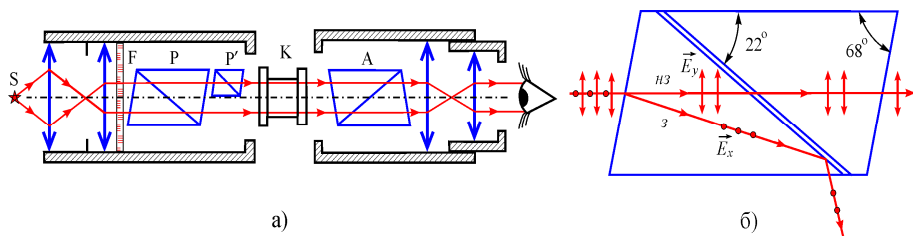


Рисунок 4 – Схема типового поляриметра (а); вид призми Ніколя та схема ходу світла через неї (б)

Останній закриває одну половину поляризатора Р. Площини пропускання цих двох поляризаторів утворюють невеликий кут 2β (див. рис. 5). За відсутності оптично активної речовини в кюветі К світло безперешкодно потрапляє на аналізатор А. **Аналізатором** називають поляризатор, призначений для визначення кута повороту між власною площиною пропускання та площиною коливань світла, що на нього потрапляє. Якщо площина пропускання аналізатора утворює однакові кути з площинами коливань світла, що пройшло через поляризатори Р та Р', то освітленість правої та лівої половин поля зору буде однаковою (див. рисунок 5б) внаслідок закону Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \gamma . \quad (7)$$

Тут I – інтенсивність світла, що вийшло з аналізатора; I_0 – початкова інтенсивність світла; γ – кут між площиною пропускання аналізатора та площиною коливань падаючого світла. У разі, коли площина пропускання аналізатора утворює різні кути з площинами коливань світла, освітленості обох половин будуть різними (див. рисунок 5а, в). При цьому роздільна здатність такого методу є дуже високою внаслідок великої чутливості людського ока.

Наявність оптично активної речовини в кюветі К зумовить обертання площин коливань \vec{E} світлових хвиль від обох поляризаторів на однаковий кут α . Щоб відновити зображення в окулярі, характерне для випадку відсутності оптично активної речовини, потрібно повернути аналізатор на той самий кут α . Даний факт

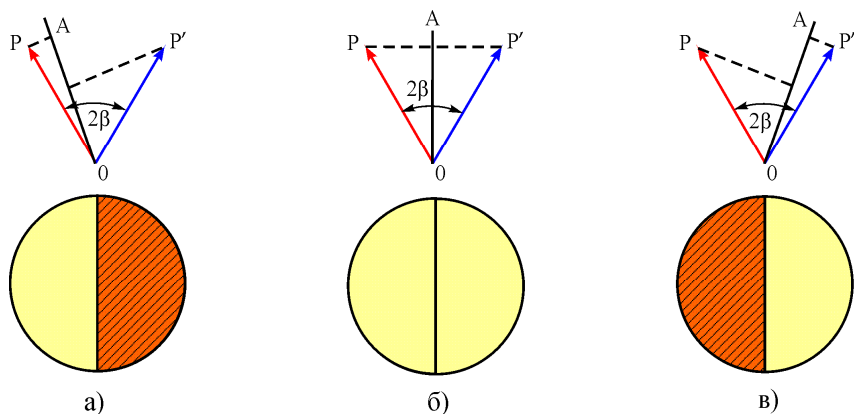


Рисунок 5 – Поле зору в окулярі поляриметра для різних кутів між площинами пропускання аналізатора та поляризаторів

є основою для вимірювання концентрації розчинів таких речовин. Нехай маємо кювету відомої довжини l_1 з розчином відомої концентрації C_1 . Згідно із законом Біо (6) кут повороту площини коливань для неї становить $\alpha_1 = [\alpha] \cdot C_1 \cdot l_1$. Даний кут можна виміряти за допомогою поляриметра, як і кут $\alpha_2 = [\alpha] \cdot C_2 \cdot l_2$ для кювети довжиною l_2 з розчином невідомої концентрації C_2 . При цьому велика точність вимірювання кутів забезпечується наявністю шкали ноніуса (див. рисунок 6), яка знаходиться в полі зору другого окуляра поляриметра. Виключенням питомого обертання $[\alpha]$ одержимо

$$C_2 = C_1 \frac{\alpha_2 l_1}{\alpha_1 l_2}. \quad (8)$$

Зауважимо, що досить часто конструкція поляриметра передбачає нерухоме положення аналізатора, а обертається площина коливань вектора \vec{E} за допомогою спеціального компенсатора.

Зовнішній вигляд лабораторної установки показаний на рисунку 7.

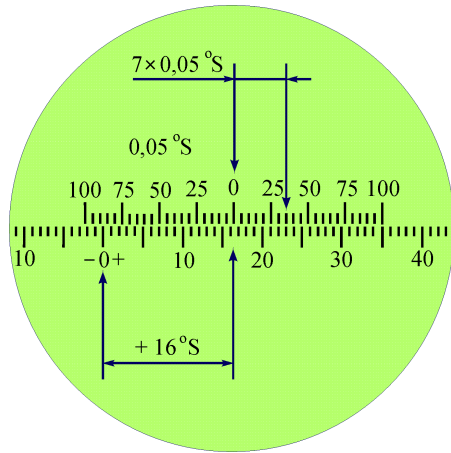


Рисунок 6 – Вигляд у вимірювальному окулярі

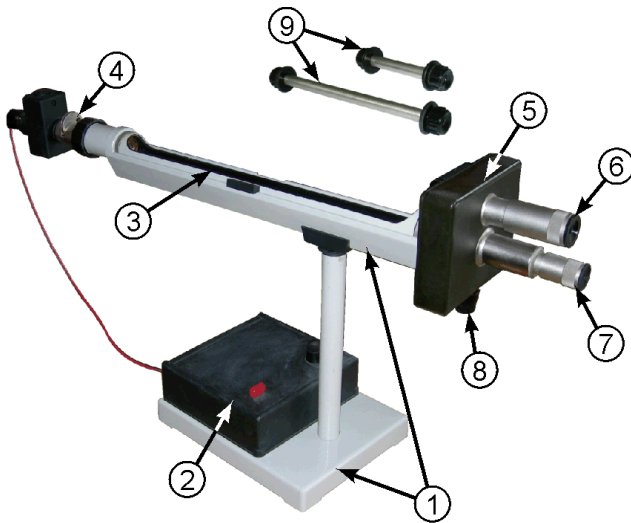


Рисунок 7 – Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – поляриметр; 2 – блок живлення поляриметра; 3 – камера; 4 – освітлювальний вузол та поляризатор; 5 – вимірювальний вузол; 6 – окуляр шкали ноніуса; 7 – окуляр; 8 – ручка компенсатора; 9 – кювети для рідини

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Підключіть поляриметр 1 до мережі живлення. Встановіть чітке зображення ноніуса в окулярі 6 та зображення межі між по-різному освітленими частинами поля зору в окулярі 7.
3. Виміряйте значення нульового відліку α_0 . Для цього обертанням ручки компенсатора 8 досягніть однакового затемненого кольору обох половин зору в окулярі 7. Під час обертання ручки 8 освітленість двох частин поля зору в окулярі 7 змінюється. Кювета 9 з розчином при цьому має бути відсутньою в поляриметрі.
4. Повторіть дані вимірювання ще 4 рази, а результати занесіть до таблиці 1.
5. Проведіть аналогічні серії вимірювань для кювети з розчином еталонної концентрації та заповніть колонку α_1 таблиці 1.
6. Запишіть довжини кювет та похибки їх вимірювання у таблицю 1.
7. Проведіть аналогічні серії вимірювань для кювет з розчином невідомої концентрації та заповніть колонки α_2 та α_3 таблиці 1.

Таблиця 1 – Вимірювання концентрації цукрового розчину

№	Кути				Похибки				$l_1 =$	$\Delta l_1 =$
	α_0	α_1	α_2	α_3	$\Delta\alpha_0$	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_3$		
1									$l_2 =$	$\Delta l_2 =$
2										
3										
4									$l_3 =$	$\Delta l_3 =$
5										
<...>										
$\Delta_1\alpha = 0,05^\circ\text{S}$		$C_1 \pm \Delta C_1 = \dots$			$C_2 \pm \Delta C_2 = \dots$			$C_3 \pm \Delta C_3 = \dots$		

8. Знайдіть середні значення кутів α_i , результат занесіть до таблиці 1.

9. Розрахуйте похибки визначення кутів у відповідності до виразу

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

де $\Delta_1\alpha$ – інструментальна похибка, а випадкові складові абсолютних похибок $\Delta_2\alpha_i$ визначаються за правилом «трьох сигм»

$$\Delta_2\alpha_i = 3\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\langle\alpha_i\rangle - \alpha_{ij})^2} \quad (N=5). \quad (10)$$

10. Визначте невідомі концентрації розчинів згідно з даними таблиці 1 з урахуванням поправки на зміщення нульової позначки

$$C_i = C_1 \frac{\langle\alpha_i\rangle - \langle\alpha_0\rangle}{\langle\alpha_1\rangle - \langle\alpha_0\rangle} \cdot \frac{l_1}{l_i} \quad (i = 2, 3). \quad (11)$$

11. Оцініть похибки з урахуванням як систематичної, так і випадкової складових за формулою

$$\Delta C_i = C_i \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\langle\alpha_i\rangle - \langle\alpha_0\rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_1}{\langle\alpha_1\rangle - \langle\alpha_0\rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_i}{l_i}\right)^2}. \quad (12)$$

12. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Яке світло називають поляризованим? Перелічити типи поляризації.
2. Які речовини називають оптично активними?
3. Як за допомогою поляриметра можна виміряти концентрацію цукрового розчину?
4. Що називають площиною поляризації?
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Навести приклади застосування поляриметричного аналізу. У чому його перевага над іншими методами?
7. Пояснити загальну будову та принцип роботи поляриметра.
8. Що таке призма Ніколя? Яка її роль у поляриметрі?
9. Що таке звичайний та незвичайний промені?
10. Одержати робочу формулу для визначення невідомої концентрації цукрового розчину.

На оцінку “відмінно”

11. Пояснити, чому відбувається подвійне променезаломлення?
12. У чому сутність явища обертання площини коливань вектора напруженості у світловій хвилі згідно з теорією Френеля?
13. Сформулювати та обґрунтувати закон Малюса.
14. Показати за допомогою закону Малюса, що природне світло під час проходження через поляризатор втрачає половину своєї інтенсивності.
15. Класифікувати похибки, що виникають у процесі вимірювань, та викласти методику їх урахування.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М.: Наука, 1980.

Лабораторна робота 11

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1. МЕТА РОБОТИ

1. Експериментально вивчити основні закони теплового випромінювання.
2. Ознайомитися з принципом роботи оптичного пірометра.
3. Визначити коефіцієнт чорноти вольфрамового дроту.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електромагнітне випромінювання, яке виникає внаслідок хаотичного теплового руху структурних елементів речовини, називають **тепловим випромінюванням**. За умови ненульової абсолютної температури хаотичний рух атомів або молекул завжди наявний у будь-якому тілі. Тому цей вид випромінювання неможливо усунути.

Його механізми досить складні й залежать від температури та агрегатного стану речовини. За відносно низьких температур ($T < 500\text{-}600\text{ K}$) теплове випромінювання для рідин та газів зумовлене коливально-обертальним рухом молекул, а для твердих тіл – коливаннями атомів або іонів у вузлах кристалічної решітки. Заряджені частинки, з яких складаються атоми, при цьому рухаються з прискоренням, а, отже, згідно із класичними уявленнями повинні випромінювати електромагнітні хвилі. Крім того, в металах випромінювати можуть вільні електрони, що під час руху змінюють свою швидкість за рахунок зіткнень з вузлами кристалічної решітки. Енергія випромінювання в рамках означених механізмів незначна, і практично весь спектр знаходиться в інфрачервоній області.

Для високих температур механізм випромінювання є дещо іншим. Кінетична енергія хаотичного теплового руху спричиняє переведення електронів, що знаходяться на зовнішніх електронних оболонках атомів, на збуджені енергетичні рівні. Згодом електрони самочинно повертаються зі збуджених рівнів на стаціона-

рні, що супроводжується випромінюванням електромагнітних хвиль. Спектр такого випромінювання може охоплювати інфрачервону, видиму та ультрафіолетову області.

У процесі випромінювання тіло втрачає теплову енергію та охолоджується. Для підтримання температури на сталому рівні необхідно брати енергію ззовні – за рахунок нагрівання електричним струмом, зовнішнім джерелом тепла та ін. Якщо температура тіла, що випромінює, стала – це означає, що воно знаходиться в стані **термодинамічної рівноваги**, який є особливістю саме теплового випромінювання.

Для кількісного опису теплового випромінювання вводяться такі характеристики.

Потік енергії – енергія, що випромінюється з усієї поверхні тіла за одиницю часу

$$\Phi = \frac{dW}{dt}. \quad (1)$$

Енергетична світність – потік енергії, що випромінюється з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках у напівпростір

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{dW}{dS \cdot dt}. \quad (2)$$

Зважаючи на складний механізм теплового випромінювання, воно складається із великої кількості монохроматичних електромагнітних хвиль різної довжини. Весь діапазон довжин таких хвиль називають **спектром випромінювання**. При цьому амплітуди хвиль спектра не повинні бути однаковими. Відомо, що енергія, яка переноситься монохроматичною хвилею, пропорційна квадрату її амплітуди. Відповідно внесок у загальну енергію, що випромінюється тілом, від хвиль різних довжин буде різним. Для того щоб охарактеризувати даний внесок, використовують так звану **випромінювальну здатність** або **спектральну густину енергетичної світності** – величину, яка за даної температури T визначає потік енергії $d\Phi_{\lambda T}$, що випромінюється з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках в *одиночному* діапазоні довжин хвиль

$$r_{\lambda T} = \frac{d\Phi_{\lambda T}}{dS \cdot d\lambda} = \frac{dR_{\lambda T}}{d\lambda}. \quad (3)$$

Тут $dR_{\lambda T}$ – енергетична світність тіла в діапазоні довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$ за даної температури T . Енергетична світність та випромінювальна здатність знаходяться між собою у такому самому співвідношенні, як маса тіла та його густина

$$R = \int_0^{\lambda_{\max}} r_{\lambda T} d\lambda. \quad (4)$$

Кожне тіло здатне не лише випромінювати, але й *поглинати* та *відбивати* енергію, що падає на нього. Для того щоб кількісно охарактеризувати співвідношення між поглинутим та відбитим випромінюванням, вводять спеціальну величину – поглинальну здатність тіла. **Поглинальна здатність**, або **коефіцієнт чорноти**, $a_{\lambda T}$ визначає ту частину падаючого потоку, яка поглинається тілом

$$a_{\lambda T} = \frac{d\Phi'_{\lambda T}}{d\Phi_{\lambda T}}, \quad (5)$$

де $d\Phi'_{\lambda T}$ – величина потоку, що поглинається, із загального потоку $d\Phi_{\lambda T}$, що падає на тіло. Індeksi в (5) свідчать про те, що поглинальна здатність (як і випромінювальна здатність $r_{\lambda T}$) залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання та температури тіла. Також $a_{\lambda T}$ значною мірою залежить від матеріалу, форми та структури поверхні тіла, що опромінюється.

Встановлено, що відношення випромінювальної та поглинальної здатностей не залежить від природи тіла і є для всіх тіл однією й тією самою функцією довжини хвилі та температури

$$\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = \varphi(\lambda, T). \quad (6)$$

Останнє твердження становить зміст **закону Кірхгофа**. Він свідчить про те, що механізми випромінювання та поглинання електромагнітних хвиль пов'язані та є *зворотними* один до одного.

Для зручності теоретичного опису теплового випромінювання використовують абстрактне поняття **абсолютно чорного тіла**. Таким тілом вважають об'єкт, який поглинає все падаюче на нього випромінювання незалежно від діапазону довжин хвиль та температури; для нього $a_{\lambda T} \equiv 1$. Зручність даної моделі в тому, що згідно з (6) випромінювальна здатність для абсолютно чорного тіла є *незалежною* від його природи. Зауважимо, що абсолютно чорних тіл у природі не існує. Максимально близькими до них можна вважати тіла з різко неоднорідною поверхнею, яка передбачає багатократне відбивання електромагнітної хвилі. Під час кожного відбивання її енергія буде втрачатися, а ймовірність її повного поглинання пропорційна до кількості відбивань.

Для багатьох тіл спектр випромінювання є подібним до спектра абсолютно чорного тіла. При цьому поглинальна здатність тіла не залежить від довжини хвилі, тобто $a_{\lambda T} \equiv a_T$. Такі тіла називають **сірими**. Випромінювальна здатність сірого тіла визначається як випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, помножена на відповідний коефіцієнт чорноти a_T .

Встановлено, що енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню абсолютної температури

$$R_T = \sigma T^4, \quad (7)$$

де $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала Стефана-Больцмана, а вираз (7) має назву закону **Стефана-Больцмана**. Також із експериментів відомо, що енергетична світність $r_{\lambda T} = 0$, коли $\lambda \rightarrow 0$, і $r_{\lambda T} \rightarrow 0$, якщо $\lambda \rightarrow \infty$ (див. рис. 1). При цьому положення максимуму залежить від температури таким чином, що

$$T\lambda_{\max} = b. \quad (8)$$

Тут λ_{\max} – довжина хвилі, що відповідає максимуму випромінювальної здатності за даної температури T ; $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$. Вираз (8) називають **законом зміщення Віна**. Він свідчить про те, що максимум випромінювальної здатності тіл з більшою температурою відповідає меншим довжинам хвиль (див. рис. 1). Да-

ний факт на якісному рівні підтверджується повсякденним досвідом: металеві предмети під час нагрівання спочатку світяться червоним світлом, а із зростанням температури їх колір стає яскраво-жовтим та білим.

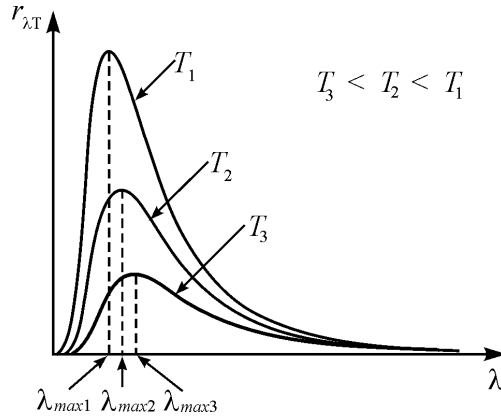


Рисунок 1 – Випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла для різних температур

Зако́ни теплового випромінювання мають послідовне пояснення в рамках гіпотези про **квантову природу випромінювання**, висунуту німецьким вченим М. Планком в 1900 р. Сутність її у тому, що електромагнітна енергія випромінюється у вигляді окремих порцій (квантів), енергія яких $h\nu$. Тут $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – **стала Планка**, фізичний зміст якої у тому, що вона визначає найменший крок дискретизації енергії. Енергія, яка випромінюється на даній частоті, буде визначатися кількістю квантів n

$$\varepsilon_n = n \cdot h\nu. \quad (9)$$

Ґрунтуючись на виразі (9), можна показати, що випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла має вигляд

$$r_{\lambda T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/k_B T \lambda) - 1}, \quad (10)$$

де c – швидкість світла; k_B – стала Больцмана.

Вираз (10) ще називають *формулою Планка*. За її допомогою шляхом інтегрування можна одержати закон Стефана-Больцмана (7) та закон зміщення Віна (8) шляхом знаходження екстремуму функції. Отже, положення про дискретний спектр енергій дозволяє поєднати теорію з експериментом і водночас є абсолютно безпідставним з точки зору класичної фізики. Таким чином, проблема теплового випромінювання та шлях її вирішення ознаменували початок розвитку нового розділу фізики – квантової фізики.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Пірометр.
2. Лампа розжарювання.
3. Вольтметр.
4. Амперметр.
5. Блок живлення.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Закон Стефана-Больцмана (7) покладений в основу зручного способу визначення температур тіл. Енергетична світність є величиною, яку досить легко вимірювати за допомогою технічних засобів. Також з огляду на достатньо велику чутливість людське око здатне розрізнити яскравість свічення тіл, температури яких є близькими. Тому неважко шляхом порівняння яскравості свічення певного тіла зі свіченням еталона (тобто тіла із заданою температурою) визначити невідому температуру. Даний спосіб вимірювання є безконтактним, що надає йому суттєвих переваг. Так, за надто високих температур контактні методи є неприйнятними, оскільки вимірювальні засоби будуть руйнуватися в процесі вимірювання. Крім того, контактним способом неможливо визначити температуру недосяжних об'єктів (наприклад, небесних тіл). Означені принципи реалізовані у вимірювальному приладі, який називають *оптичним пірометром* (див. рис. 2). Усередині корпусу приладу знаходиться еталонна металева дуга, по якій проходить електричний струм. Залежно від сили струму

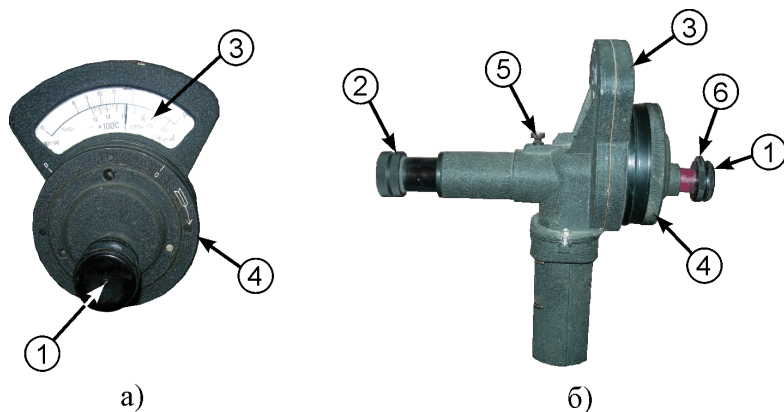


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд пірометра: вигляд спереду (а); вигляд збоку (б): 1 – окуляр; 2 – об’єктив; 3 – шкала приладу; 4 – ручка реостата; 5 – перемикач температурних діапазонів вимірювання; 6 – ручка світлофільтра

дуга буде змінювати свою температуру, а отже, яскравість свічення. Струм змінюється за допомогою реостата 4, ручка якого виготовлена у формі рифленого кільця. Зважаючи на однозначний зв’язок між температурою та силою струму через еталонну дугу, шкала амперметра 3 відразу проградуєрована в градусах Цельсія. За допомогою об’єктива на фоні зображення тіла, температура якого підлягає вимірюванню, спостерігач може бачити також і еталонну дугу. Зміною опору реостата 4 яскравість свічення дуги прирівнюється до яскравості свічення досліджуваного тіла. Шкала 3 при цьому вкаже його температуру. Слід відзначити, що в окулярі 1 пірометра видно не саме досліджуване тіло, а його зображення. Зрозуміло, що світність зображення менша світності самого тіла внаслідок втрат в об’єктиві 2. Відповідна поправка врахована під час конструювання пірометра та калібрування його шкали.

Як досліджуване тіло в роботі використовується вольфрамова спіраль лампи розжарювання 2 (див. рис. 3), струм через яку можна задавати за допомогою блока живлення 1. Потік енергії, що випромінюється з поверхні спіралі, визначатиметься як

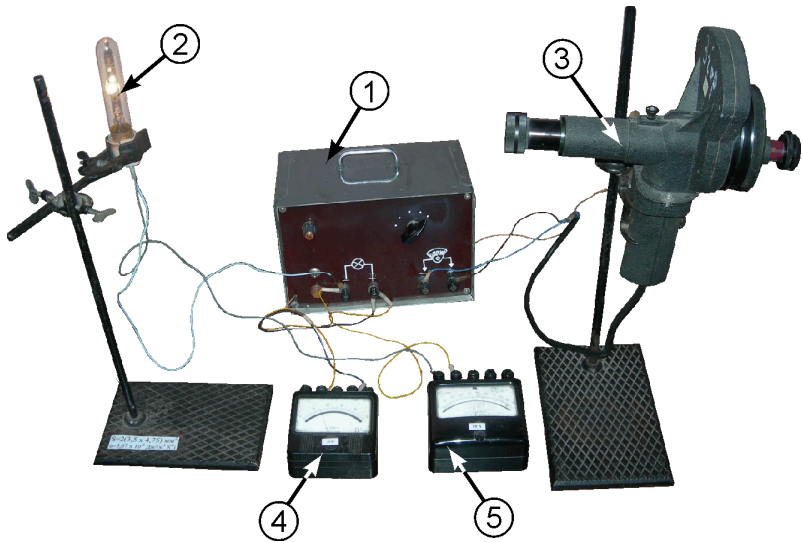


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – блок живлення; 2 – лампа розжарювання; 3 – пірометр; 4 – вольтметр; 5 – амперметр

$$\Phi = RS = IU, \quad (11)$$

де S – площа поверхні спіралі; I – сила струму через спіраль; U – падіння напруги на ній. З урахуванням виразів (7) та (4), а також того, що випромінювальна здатність сірого тіла є добутком випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла та коефіцієнта чорноти a_T , енергетична світність спіралі становить

$$R = a_T \sigma T^4. \quad (12)$$

З виразів (11) та (12) коефіцієнт чорноти вольфрамової спіралі дорівнює

$$a_T = \frac{UI}{\sigma T^4 S}. \quad (13)$$

Температура спіралі вимірюється за допомогою пірометра згідно з методом, описаним вище. Технічні подробиці вимірювання зрозумілі з рисунка 4.

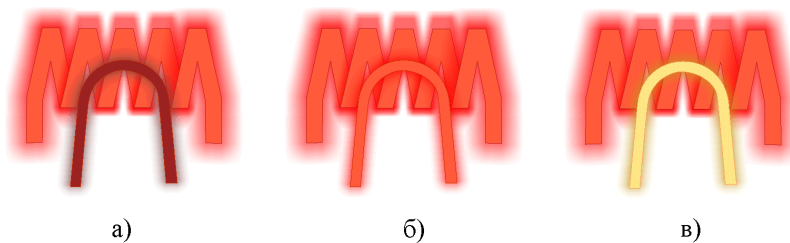


Рисунок 4 – Зображення спіралі лампи та еталонної дуги в окулярі: температура дуги менша за температуру спіралі (а); температура дуги збігається з температурою спіралі (б); температура дуги більша за температуру спіралі (в)

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Запишіть величину площі поверхні спіралі лампи S , яка зазначена на стенді, та інструментальні похибки вольтметра ΔU та амперметра ΔI до таблиці 1. Похибка кожного електровимірювального приладу знаходиться за формулою

$$\Delta X = \frac{\delta X \cdot X_{\max}}{100}, \quad (14)$$

де X – величина, що вимірюється; δX – клас точності приладу, зазначений на корпусі або на шкалі; X_{\max} – верхня межа вимірювання приладу.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Перемикач	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$		№ досліду					$\langle T \rangle, \text{К}$	$\Delta_2 T, \text{К}$	$\Delta T, \text{К}$	a_T	Δa_T
				1	2	3	4	5					
1			$t, ^\circ\text{C}$										
			$T, \text{К}$										
...	
5			$t, ^\circ\text{C}$										
			$T, \text{К}$										
$S =$			$\Delta U =$					$\Delta I =$		$\Delta_1 T =$			

3. Під'єднайте пірометр та лампу розжарювання до блока живлення 1 та ввімкніть його в електричну мережу.
4. Якісно перевірте закон зміщення Віна. Для цього відкрийте червоний світлофільтр в окулярі і ручкою реостата 4 (див. рис. 2) поступово збільшуйте струм через еталонну дугу. Переконайтеся, що світло від дуги спочатку має червоний відтінок, а потім жовто-білий.
5. Перемикачем на блоці живлення 1 (див. рис. 3) встановіть мінімальну яскравість свічення лампи, а перемикач 5 (див. рис. 2) переведіть у положення “ ”. Закрийте червоним світлофільтром 6 зображення еталонної дуги.
6. Перепишіть показання вольтметра 4 та амперметра 5 (див. рис. 3) до таблиці 1.
7. Наведіть об'єктив пірометра на лампу так, щоб взаємне розміщення зображень спіралі та еталонної дуги було подібним до рисунка 4.
8. Ручкою реостата 4 (див. рис. 2) прирівняйте яскравість свічення дуги до яскравості свічення спіралі. Виміряну температуру запишіть до таблиці 1.

Слід враховувати інертність пірометра: набуття еталонною дугою яскравості свічення, відповідної заданому положенню ручки реостата, відбувається не відразу, а через декілька секунд.

9. Повторіть вимірювання на даному положенні перемикача блока живлення ще 4 рази. Результати занесіть до таблиці 1.
10. Переведіть перемикач діапазонів вимірювань пірометра 5 (див. рис. 2) в положення “20”.
11. Проведіть наступні 4 серії вимірювань температури для різних положень перемикача блока живлення. Результати занесіть до таблиці 1. При цьому до таблиці слід щоразу записувати показання амперметра та вольтметра.
12. Розрахуйте середні значення абсолютних температур та відповідні їм значення коефіцієнта чорноти a_T за формулою (13).
13. Оцініть похибки визначення a_T за формулою

$$\Delta a_{T_i} = a_{T_i} \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I_i}\right)^2 + \left(4 \frac{\Delta T_i}{\langle T_i \rangle}\right)^2}. \quad (15)$$

Абсолютну похибку вимірювання температури в i -му положенні перемикача блока живлення ΔT_i слід визначати у відповідності до виразу

$$\Delta T_i = \sqrt{(\Delta_1 T)^2 + (\Delta_2 T_i)^2}, \quad (16)$$

де випадкова складова абсолютної похибки $\Delta_2 T_i$ визначається за правилом «трьох сигм»

$$\Delta_2 T_i = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (T_{ij} - \langle T_i \rangle)^2} \quad (N = 5). \quad (17)$$

14. Побудуйте графік $a_T(T)$. Переконайтесь у тому, що a_T повільно зростає з температурою.
15. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Що називають тепловим випромінюванням?
2. Що називають енергетичною світністю та випромінювальною здатністю?
3. Що таке поглинальна здатність тіла?
4. Сформулювати закон Віна та закон Стефана-Больцмана.
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Який зв'язок між енергетичною світністю та випромінювальною здатністю?
7. Як на якісному рівні можна переконатися у справедливості закону зміщення Віна?

8. Будова та принцип дії пірометра. В чому його переваги як інструмента з вимірювання температури?
9. Що називають абсолютно чорним тілом, сірим тілом?
10. Методика визначення коефіцієнта чорноти в даній роботі.

На оцінку “відмінно”

11. Сформулювати та довести закон Кірхгофа.
12. Пояснити механізми теплового випромінювання.
13. Користуючись виразом для випромінювальної здатності (10), одержати закон Стефана-Больцмана (7).
14. Розкрити сутність гіпотези Планка. На базі квантових уявлень вивести вираз залежності середньої енергії випромінювання від частоти ν .
15. Вивести формулу для розрахунку похибок визначення коефіцієнта чорноти (15).

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.:Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная. Физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М.: Наука, 1980.

Лабораторна робота 12

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ФОТОЕФЕКТУ

1. МЕТА РОБОТИ

1. Визначити величину сталої Планка.
2. Визначити роботу виходу електрона з металу.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розрізняють два типи фотоефекту – зовнішній та внутрішній. **Зовнішнім фотоефектом** називають вихід електронів з поверхні матеріалу в навколишній простір під дією світла. Як правило, він спостерігається у провідниках. На відміну від цього **внутрішній фотоефект** має місце, насамперед, у напівпровідниках і полягає у вивільненні електронів від зв'язків з атомами під дією світла та набутті ними якості вільних зарядів без виходу за межі матеріалу. Обидва типи фотоефекту широко застосовуються в техніці. Так, зовнішній фотоефект є основою для роботи так званих фотоелектричних помножувачів та електронно-оптичних підсилювачів, які є складовими приладів нічного бачення. Матриці чутливих до світла напівпровідникових діодів є базовим елементом сучасних пристроїв для фото- та відеозйомки.

Механізми зовнішнього та внутрішнього ефектів пояснює рисунок 1. В об'ємі провідника існують вільні заряди, які можуть рухатися в межах провідника, проте не можуть самовільно його залишати. Щоб подолати сили притягання зі сторони позитивно заряджених іонів у вузлах кристалічної решітки, потрібно надати електрону додаткову кінетичну енергію. Джерелом такої енергії може бути світлове випромінювання. Аналогічним чином відбувається і внутрішній фотоефект.

Російським фізиком О.Г. Столетовим (1889 р.) експериментально встановлено, що характер перебігу зовнішнього фотоефекту визначається трьома законами:

- 1) Кількість електронів, що вибиваються світлом з поверхні металу за одну секунду (так званих фотоелектронів), прямо пропорційна інтенсивності світлового потоку.
- 2) Швидкість фотоелектронів визначається виключно частотою падаючого випромінювання та не залежить від інтенсивності світлового потоку.
- 3) Існує мінімальна частота світлового випромінювання, за якої фотоелектронів ще є можливим. Цю частоту (або відповідну довжину хвилі) називають **червоною межею фотоелектру**.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) фотоелемента – приладу, в основу роботи якого покладено явище фотоелектру, – показані на рисунку 2. Наявність частини ВАХ в області від'ємних напруг свідчить про те, що електрони вилітають із катода фото-

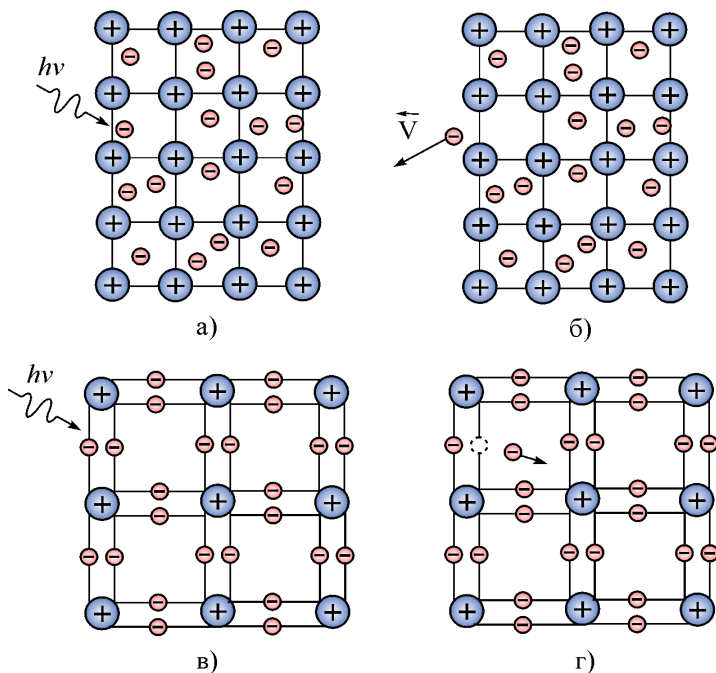


Рисунок 1 – Зовнішній фотоелектр супроводжується виходом електрона за межі матеріалу, що опромінюється (а, б). Внутрішній фотоелектр полягає у виході електрона, що зв'язаний з іоном, у простір між вузлами кристалічної решітки (в, г)

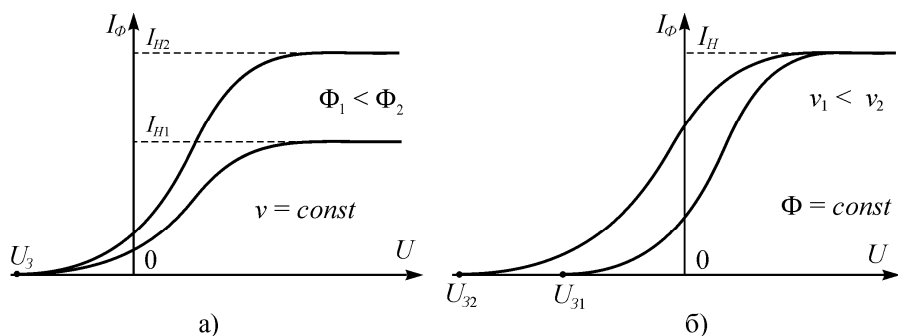


Рисунок 2 – Вольт-амперні характеристики фотоелемента для різних величин світлового потоку Φ (а), для різних частот світлового випромінювання ν (б)

елемента з деякою початковою швидкістю. Максимальне значення швидкості V буде визначати так звану **затримувальну напругу** U_3 – напругу, яку потрібно прикласти між анодом і катодом для припинення фотоструму

$$\frac{m_e V^2}{2} = eU_3, \quad (1)$$

де e – модуль заряду електрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); m_e – маса електрона ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг). З рисунка 2 бачимо, що швидкості фотоелектронів залежать від частоти падаючого випромінювання і не залежать від інтенсивності. У той самий час інтенсивність світлового потоку визначає величину струму насичення.

Явище фотоефекту є експериментальним підтвердженням корпускулярної природи світла, суть якої в тому, що світло випромінюється, поширюється та поглинається неподільними порціями, або **фотонами**. Енергію фотона визначають його частотою ν як

$$\varepsilon = h\nu, \quad (2)$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – одна з фундаментальних фізичних констант, яку називають **сталюю Планка**. Вважаючи, що електрон поглинає лише один фотон, закони фотоефекту легко пояснюються з міркувань закону збереження енергії

$$h\nu = A + \frac{m_e V^2}{2}, \quad (3)$$

де A – так звана **робота виходу** – енергія, яку необхідно надати електрону на подолання сил притягання з боку кристалічної решітки. Саме наявність A зумовлює існування червоної межі фотоелектричного ефекту. Якщо частота випромінювання $\nu < \nu_0 = A/h$, то після поглинання фотона електрон не отримує енергії, необхідної для виходу з матеріалу катода. Вираз (3) ще називають **рівнянням Ейнштейна для фотоелектричного ефекту**.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Фотоелемент.
2. Освітлювач.
3. Реостат.
4. Набір світлофільтрів.
5. Вольтметр.
6. Гальванометр.
7. Два ключі.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

З урахуванням (1) рівняння Ейнштейна (3) можна переписати у вигляді

$$h\nu = A + eU_3. \quad (4)$$

Останній вираз є більш зручним з точки зору проведення експерименту. Вимірювати швидкість фотоелектронів дуже важко, в той час як процедура визначення затримувальної напруги U_3 є досить простою. Установка для дослідження фотоелектричного ефекту зображена на рисунку 3, а її принципова схема – на рисунку 4а.

З означення випливає, що U_3 – така напруга, прикладена у зворотному напрямку, за якої не буде проходити струм через фотоелемент.

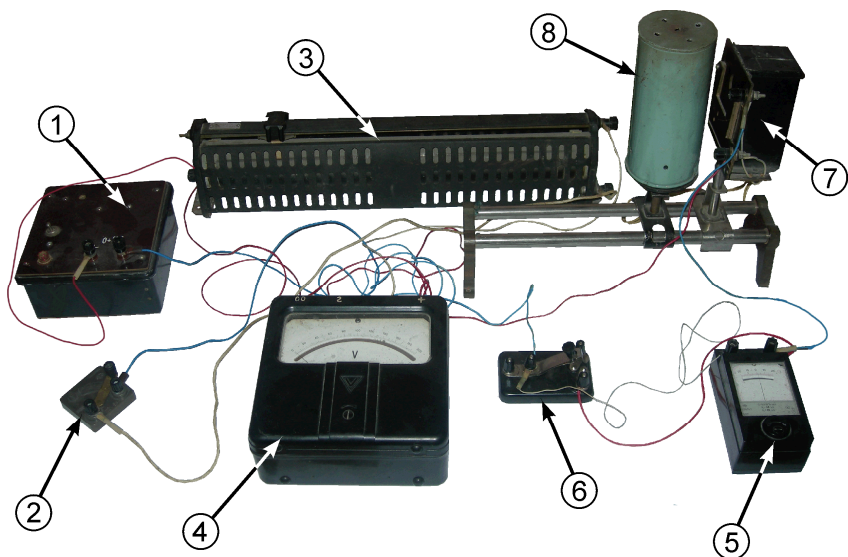


Рисунок 3 – Лабораторна установка: 1 – блок живлення; 2 – ключ K_1 ; 3 – реостат; 4 – вольтметр; 5 – гальванометр; 6 – ключ K_2 ; 7 – фотоелемент; 8 – освітлювач

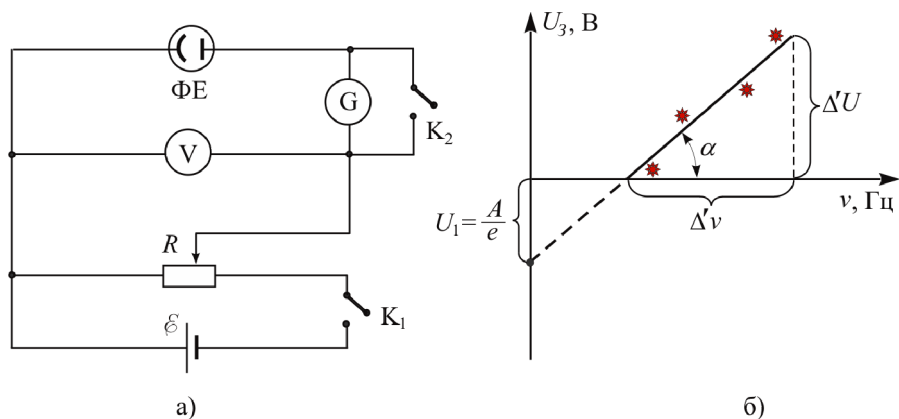


Рисунок 4 – Принципова схема установки (а); залежність затримувальної різниці потенціалів від частоти (б)

Відсутність струму в електричному колі фіксується за допомогою чутливого гальванометра 5. При цьому вольтметр покаже шукану величину U_3 . Природно, що різним частотам відповіда-

тимуть різні значення затримувальної напруги, а з (4) випливає, що залежність $U_3(v)$ матиме лінійний характер

$$U_3 = \frac{h}{e}v - \frac{A}{e}. \quad (5)$$

У виразі (5) h/e не є нічим іншим, як тангенсом кута нахилу, а A/e – точка перетину прямої з віссю ординат. Для освітлення фотоелемента світлом, близьким до монохроматичного, використовуються світлофільтри із заданою смугою пропускання. Шляхом заміни світлофільтрів на шляху між освітлювачем 8 та фотоелементом 7 можна одержати набір експериментальних значень $U_3(v)$, який має репрезентувати пряму лінію (див. рисунок 4б). Згідно з виразом (5) тангенс кута нахилу одержаної прямої визначить вимірне значення сталої Планка

$$\frac{h}{e} = \operatorname{tg} \alpha \Rightarrow h = e \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

а точка перетину графіка з віссю U_3 , у свою чергу, визначить роботу виходу A для матеріалу катода.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Підключіть реостат до джерела живлення 1. Увімкніть освітлювач 8 у мережу живлення та зробіть відстань між ним та фотоелементом 7 якомога меншою.
3. Візьміть світлофільтр із запропонованого набору та розмістіть його між освітлювачем та фотоелементом.
4. Шляхом переміщення бігунка реостата компенсуйте струм у колі фотоелемента. При цьому стрілка гальванометра вказуватиме на нульову позначку. Запишіть значення затримувальної напруги до таблиці 1.
5. Повторіть вимірювання для того самого світлофільтра ще 4 рази. Результати запишіть у таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Колір фільтра		Червоний	Помаранчевий	Жовтий	Зелений	Синій	Фіолетовий
λ , нм		630	580	560	525	470	430
$\Delta\lambda$, нм		2	2	2	2	2	2
ν , Гц $\cdot 10^{14}$							
$\Delta\nu$, Гц $\cdot 10^{14}$							
U_3 , В	№	1					
		2					
		3					
		4					
		5					
$\langle U_3 \rangle$, В							
$\Delta\nu_{max} =$		$\Delta U_3 =$					

Процес правильного позиціонування бігунка є трудомістким і передбачає рух в обох напрямках. При цьому стрілка гальванометра буде зазнавати коливань. Для їх гасіння в схему вмонтований ключ K_2 . Короткочасним натисканням на K_2 стрілка гальванометра швидко виводиться на свій рівноважний рівень.

- Повторіть операції, наведені у пунктах 4 та 5 для решти світлофільтрів з набору. Результати запишіть у таблицю 1.
- Визначте похибку вимірювання затримувальної напруги ΔU_3 за формулою

$$\Delta U_3 = \frac{\delta U \cdot U_{\max}}{100}, \quad (7)$$

де δU – клас точності вольтметра, зазначений на корпусі або на шкалі приладу; U_{\max} – його верхня межа вимірювання. Занесіть одержане значення до таблиці 1.

- Обчисліть значення частот, що відповідають значенням відповідних довжин хвиль згідно з виразом

$$v = c/\lambda, \quad (8)$$

де c ($\approx 2,98 \cdot 10^8$ м/с) – швидкість світла у вакуумі.

9. Підготуйте координатну площину $U_3(v)$ на міліметровому папері в такому масштабі, щоб експериментальні дані займали усе її поле.
10. Обчисліть середні значення U_3 та нанесіть точки, що відповідають експериментально знайденим даним $\langle U_3(v) \rangle$, на координатну площину.
11. За допомогою лінійки проведіть пряму лінію так, щоб кожна одержана експериментально точка лежала якомога ближче до неї.
12. Знайдіть тангенс кута нахилу одержаної прямої α , як показано на рисунку 4б

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta'U}{\Delta'v} \quad (9)$$

та розрахуйте сталу Планка за виразом (6).

13. Зробіть оцінку похибки вимірювань

$$\Delta h = h \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{\Delta'U_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta'v}\right)^2}. \quad (10)$$

Тут як ΔU слід брати інструментальну похибку ΔU_3 , а як Δv – максимальне значення похибки визначення частоти з ряду Δv_i , що відповідають кожному світлофільтру

$$\Delta v_i = \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i} v_i. \quad (11)$$

14. Підготуйте другу координатну площину $U_3(v)$ на міліметровому папері в такому масштабі, щоб одержати точку перетину експериментального графіка з віссю U_3 .
15. Знайдіть відстань U_1 між точкою перетину графіка з віссю U_3 та нулем координат і визначте роботу виходу A електронів з матеріалу катода

$$A = eU_1. \quad (12)$$

16. Зробіть оцінку похибки визначення A за формулою

$$\Delta A = \frac{\Delta U_3}{U_1} A. \quad (13)$$

17. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. У чому сутність явища фотоефекту?
2. Що називають затримувальною напругою?
3. Записати рівняння Ейнштейна для фотоефекту.
4. Накреслити принципову схему установки та пояснити призначення її елементів.
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Сформулювати три закони фотоефекту.
7. Що називають роботою виходу? Як її визначають та від чого вона залежить?
8. Яку форму має залежність затримувальної напруги від частоти? Відповідь аргументувати.
9. Нарисувати якісну типову вольт-амперну характеристику фотоелемента та пояснити процеси, що відбуваються на її основних ділянках.
10. Навести приклади застосування фотоефекту.

На оцінку “відмінно”

11. Пояснити різницю між внутрішнім та зовнішнім фотоефектами.
12. Розкрити методика визначення сталої Планка в лабораторній роботі.
13. Який фізичний зміст має стала Планка?
14. Як пояснюються закони фотоефекту з позицій корпускулярного уявлення про світло?
15. Вивести формулу визначення сталої Планка.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алагн ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.:Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная. физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М.: Наука, 1980.

Лабораторна робота 13

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИДИМОГО СПЕКТРА АТОМАРНОГО ВОДНЮ

1. МЕТА РОБОТИ

1. Експериментально переконатися у тому, що спектр випромінювання атомарного водню є дискретним.
2. Ознайомитися з принципом роботи монохроматора УМ-2.
3. Визначити сталу Рідберга.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Спектр випромінювання – це сукупність довжин (або частот) електромагнітних хвиль, які здатна випромінювати речовина. Також, коли говорять про спектр, автоматично мають на увазі характер розподілу енергії випромінювання за довжинами хвиль. Надалі будемо мати на увазі лише *оптичні спектри* або спектри, що відповідають *оптичному* діапазону довжин хвиль ($\sim 400\text{-}700$ нм).

Дослідження спектрів випромінювання різних хімічних елементів та їх сполук має велике значення як з фундаментальної, так і з практичної точок зору. Механізми випромінювання прямо пов'язані з будовою атома та принципами взаємодії його структурних елементів. Випромінювання атомом електромагнітної хвилі є наслідком зміни його стану, а енергія випромінювання слугує кількісною характеристикою таких змін. Таким чином, спектр випромінювання відображає хімічну та фізичну індивідуальність атомів і молекул та дає однозначну інформацію про їх внутрішню будову.

Практичне значення даного питання є прямим продовженням його фундаментальної цінності. Оскільки спектр є фактично “паспортом” хімічного елемента або сполуки, дослідження спектра випромінювання може дати якісну та кількісну інформацію про склад речовини. Метод визначення хімічного складу речо-

вини за допомогою вивчення спектра її випромінювання називають *спектральним аналізом*. У переважній більшості випадків спектральний аналіз точніший, швидший та більш чутливий за хімічні методи і тому широко застосовується у сучасному виробництві та наукових дослідженнях. Особливу роль даний метод відіграє в астрофізиці: тут це єдиний експериментальний метод визначення хімічного складу речовин зірок та міжзоряного середовища, а також швидкості руху космічних об'єктів.

Історія сучасних уявлень про мікроскопічну будову речовини починається з початку 20-го сторіччя і свідчить про ключову роль аналізу спектрів випромінювання. У 1911 р. англійський фізик Е. Резерфорд на основі аналізу даних відомого експерименту з розсіювання α -частинок на тонкому шарі золота запропонував так звану планетарну модель атома. Згідно з цією моделлю атом складається з позитивно зарядженого ядра, навколо якого обертаються електрони. При цьому майже вся маса атома зосереджена в ядрі, а характерні відстані електронів від центра ядра набагато більші від його діаметра. Класична електродинаміка передбачає безперервне випромінювання електромагнітної хвилі зарядженою частинкою, що рухається з прискоренням, за рахунок її енергії. Для електрона, що обертається навколо ядра, втрати енергії за рахунок випромінювання повинні зумовити поступове зменшення радіуса його орбіти до нульового значення. Останнє означає падіння електрона на ядро та припинення існування атома. Проте досвід показує, що час стабільного існування атомів може бути необмежено довгим.

З іншого боку, електрон, що обертається по орбіті змінного радіуса, повинен випромінювати хвилю змінної частоти безперервного спектра. Проте експериментально встановлено, що атомарні спектри хімічних елементів є *дискретними*. В цьому і полягає сутність другого протиріччя планетарної моделі атома з точки зору класичних уявлень про матерію.

Перша спроба розв'язати дану проблему була зроблена датським фізиком Н. Бором у 1913 р. В її основу покладено два постулати, які просто стали узагальненням експериментальних фактів та вважалися правильними, незважаючи на їх несумісність із класичною фізикою.

Перший постулат Бора пояснює можливість стабільного існування атомів і формулюється так: атом здатний необмежено довгий час перебувати лише в особливих стаціонарних станах, кожному з яких відповідає своя енергія W_n . Тут індекс n позначає номер стану, $n = 1, 2, 3, \dots$ – ціле додатне число, яке ще називають **головним квантовим числом**. У стаціонарних станах атом не випромінює та не поглинає енергію. Для планетарної моделі атома це означає, що електрон в атомі може рухатися лише по строго визначених колових стаціонарних орбітах. Радіуси стаціонарних орбіт визначаються з так званого **правила квантування моменту імпульсу**

$$L_n = m_e V_n r_n = 2\pi n h, \quad (1)$$

де L_n – момент імпульсу електрона; r_n – радіус орбіти електрона в n -му стані; V_n – швидкість руху електрона; m_e – маса електрона; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка. Таким чином, момент імпульсу має бути дискретною величиною.

Другий постулат Бора: випромінювання або поглинання атомом енергії відбувається лише при переходах з одного стаціонарного енергетичного рівня на інший. Частота випромінювання ν_{nm} при цьому визначається значеннями енергії в станах n та m

$$h \nu_{nm} = W_n - W_m. \quad (2)$$

Для планетарної моделі атома даний постулат зумовлює те, що випромінювання енергії відбувається під час переходу електрона з орбіти з більшим радіусом на орбіту з меншим радіусом. Перехід же електрона з орбіти з меншим радіусом на орбіту з більшим радіусом відбувається за рахунок поглинання енергії. Даний постулат необхідний для пояснення здатності атома випромінювати і поглинати хвилі, спектр яких є дискретним.

Знайдемо зв'язок між постулатами Бора та дискретністю спектра випромінювання атома водню. Будемо вважати електрон та ядро атома зарядженими матеріальними точками, динаміка яких відбувається за класичними законами. Оскільки маса ядра набагато більша від маси електрона, ядро можна вважати

нерухомим. На електрон з боку ядра буде діяти сила Кулона. За другим законом Ньютона рух електрона по стаціонарній орбіті описується таким рівнянням:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e V_n^2}{r_n}, \quad (3)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала. Сумісне розв'язання співвідношень (1) та (3) відносно радіуса та швидкості дасть

$$V_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 n h}, \quad r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2. \quad (4)$$

Повна енергія електрона визначається сумою кінетичної та потенціальної складових

$$W_n = W_n^{kin} + W_n^{nom} = \frac{m_e V_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}. \quad (5)$$

Підстановкою (4) в (5) одержимо вираз для енергії електрона

$$W_n = W(n) = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}. \quad (6)$$

З урахуванням (2) та співвідношення між циклічною частотою та довжиною хвилі $\nu = c/\lambda$ одержимо вираз, який задає дискретну послідовність довжин хвиль спектра атома водню

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{c} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (7)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$ – додатне ціле число, а

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ (с}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

називають *сталою Рідберга*. Зауважимо, що у планетарній моделі атома ціле число n позначає номер орбіти, з якої електрон переходить на нижчу орбіту, номер якої, у свою чергу, позначається числом m .

Вираз (7) визначає можливі довжини хвиль випромінювання атома водню, які напрочуд добре узгоджуються з експериментальними даними. Проте спроби описати за допомогою теорії Бора спектри більш складних атомів не дали позитивного результату. Тому на сьогодні дана теорія має виключно історичне значення як перехідний етап від класичної фізики до квантової.

Більш складний та послідовний підхід, який дозволяє, у принципі, описати спектри випромінювання усіх без винятку атомів, базується на так званому рівнянні Шредінгера. Дискретний спектр енергії валентних електронів у атомах впливає безпосередньо з умови існування розв'язку зазначеного рівняння. Цікаво, що серіальна формула (7) виявляється справедливою з позицій нової теорії, що, за великим рахунком, є випадковим збігом.

Спектральні лінії атома водню можна об'єднати у групи згідно зі значенням величини m у співвідношенні (7). Усі довжини хвиль випромінювання атомів, що відбувається при переході електронів з будь-якої орбіти на певну, яка визначається величиною m , називають **серією**. Серії в спектрі атома водню отримали свої назви.

- $m = 1$ – серія **Лаймана** ($n = 2, 3, 4, \dots$), належить до ультрафіолетової частини спектра;
- $m = 2$ – серія **Бальмера** ($n = 3, 4, 5, \dots$) – вивчається в даній роботі, лежить у видимій частині спектра;
- $m = 3$ – серія **Пашена** ($n = 4, 5, 6, \dots$), лежить у близькій інфрачервоній (ІЧ) області;
- $m = 4$ – серія **Брекета** ($n = 5, 6, 7, \dots$), лежить у близькій ІЧ-області;
- $m = 5$ – серія **Пфунда** ($n = 6, 7, 8, \dots$), лежить у далекій ІЧ-області.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Монохроматор УМ-2.
2. Блок живлення.
3. Капілярна трубка з воднем.
4. Індукційна високовольтна котушка.
5. Графік залежності довжини хвилі від показів барабана монохроматора (дисперсійна крива).

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Перепишемо співвідношення (7) у такому вигляді:

$$\lambda = \frac{c}{R} \cdot \frac{m^2 n^2}{n^2 - m^2}. \quad (9)$$

Для експериментальної перевірки справедливості виразу (9) в межах видимої частини спектра ($m = 2$) потрібно показати лінійність залежності

$$\lambda = \lambda(r) = Ar, \quad (10)$$

де

$$r = r(n) = \frac{4n^2}{n^2 - 4}, \quad (11)$$

а константа A дорівнює c/R . Тут $n = 3, 4, 5, 6$, оскільки у лабораторній роботі спостерігаються 4 спектральних лінії.

За кімнатних температур водень перебуває у молекулярному стані (H_2). Крім того, електрони у молекулах перебувають в основних станах, тому випромінювання відсутнє. У найпростіший спосіб одержати атомарний водень, електрони якого перебувають у збуджених станах, можна шляхом прикладання високої напруги до розрідженого молекулярного водню. В даній лабораторній роботі газ знаходиться у спеціальній капілярній трубці 2 (див. рис. 1), до якої підводиться напруга від індукційної високовольтної котушки 3. Наявні внаслідок спонтанної іонізації

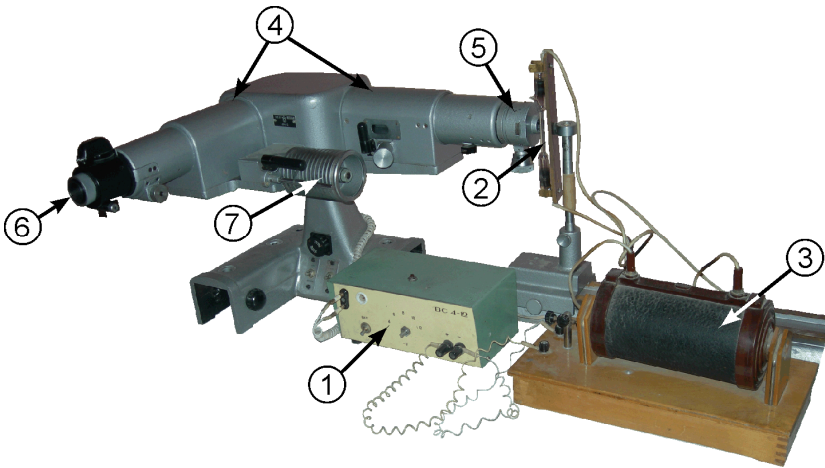


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – блок живлення; 2 – капілярна трубка з воднем; 3 – індукційна високовольтна котушка; 4 – монохроматор УМ-2; 5 – коліматор; 6 – окуляр; 7 – барабан

електрони та іони водню розганяються полем та стикаються з молекулами водню. Внаслідок цього з'являються нові іони та електрони, які, у свою чергу, також розганяються полем і т.д. Таким чином, має місце лавинний розряд, наслідком якого є утворення окремих атомів водню у збудженому стані. Самочинний перехід електронів зі збуджених станів до основного супроводжується випромінюванням світлових хвиль, і газ у трубці світиться яскраво-бузковим кольором.

Таке забарвлення свідчить про те, що джерело світла є **немонохроматичним**. Щоб одержати інформацію про спектральний склад даного світла, достатньо пропустити його вузький пучок через скляну призму. За рахунок того, що швидкість поширення електромагнітної хвилі в середовищі залежить від довжини хвилі (дане явище називають **дисперсією**), заломлене світло для різних довжин хвиль буде виходити з призми під різними кутами (див. рис. 2а). Кут виходу променя з призми (φ) є тією інформаційною ознакою, за якою можна виміряти довжину хвилі. Дана ідея реалізована у вимірювальному приладі, який називають

монохроматором (див. рисунок 1). У даній роботі використовується монохроматор типу УМ-2. Незважаючи на свій «поважний» вік (його було спроектовано у 50-х роках 20-го століття), дана модель використовується до цього часу через свою вдалу конструкцію. Оптична схема приладу наведена на рисунку 2б. Завдяки вхідній щілині 1 та системі лінз конденсора 2, що входять до коліматора, на систему призм 3 потрапляє вузький пучок світла від джерела. Система призм може обертатися у площині рисунка таким чином, що у полі зору окуляра 6 виявляються лише промені з того чи іншого діапазону довжин хвиль. Призми 3 повертаються шляхом обертання барабана 7 (див. рис. 1), на якому є шкала в градусах. Кожній поділці на барабані відповідає та довжина хвилі видимого діапазону, на яку вказує візир 5 (рисунок 2б). Зображення візира можна бачити у центрі поля зору окуляра 6 (див. рисунок 3а). Безпосереднє значення довжини хвилі залежно від показання барабана визначається за допомогою спеціального графіка – дисперсійної кривої даного монохроматора (див. рисунок 3б).

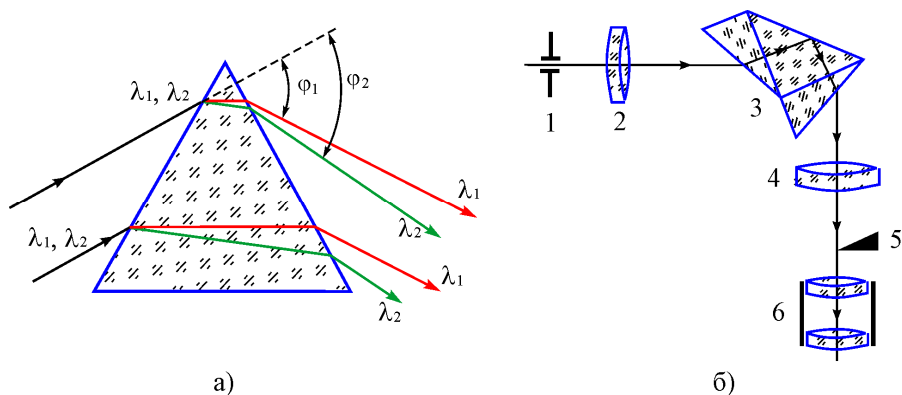


Рисунок 2 – Хід світлових хвиль з різною довжиною через призму (а). Оптична схема монохроматора УМ-2 (б): 1 – вхідна щілина коліматора; 2 – конденсор; 3 – дисперсійний елемент (призма Аббе); 4 – об’єктив; 5 – візир; 6 – окуляр

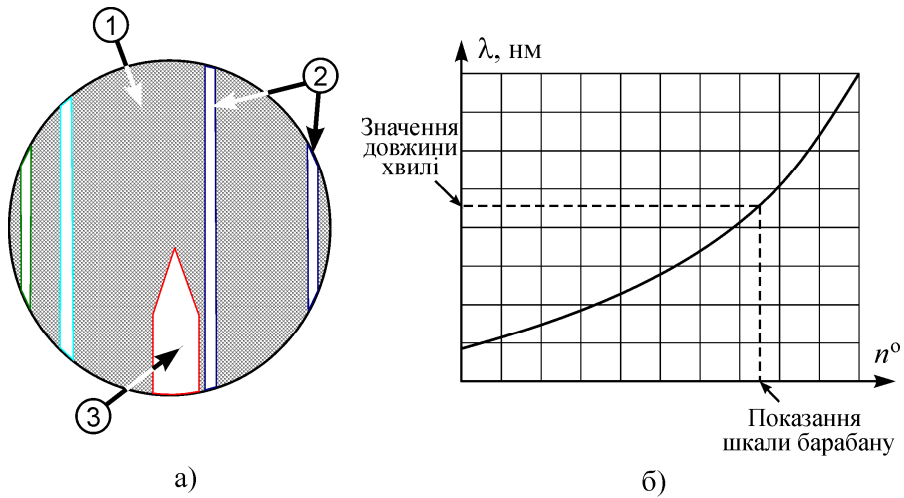


Рисунок 3 – Поле зору окуляра (а): 1 – темний фон; 2 – спектральні лінії; 3 – візир. Характерний вигляд дисперсійної кривої (б)

Якісний аналіз спектра випромінювання водню показує, що даний елемент дійсно випромінює лише хвилі на окремих частотах, що є прямим доказом дискретності спектра енергій електрона в атомі.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з будовою установки та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.

Увага! Окремі елементи лабораторної установки знаходяться під високою напругою. Тому заборонено знімати кожух з капілярної трубки та контактувати з індукційною котушкою 3 (див. рисунок 1).

2. Увімкніть установку в мережу. Натисканням пускової кнопки на блоці живлення 1 (рисунок 1) подайте напругу на трубку з воднем 2. Обертаючи барабан 7, позиціонуйте першу (червону) спектральну лінію точно за візиром. Показання на барабані запишіть до таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Колір лінії	n	$r(n)$	Кількість поділок					Середнє, в поділках	λ , нм
			№ досліду						
			1	2	3	4	5		
Червоний	3								
Зелено-блакитний	4								
Синій	5								
Слабко-фіолетовий	6								

Для запобігання виходу з ладу капілярної трубки не слід довго тримати пускову кнопку у ввімкненому положенні.

3. Повторіть дослід зі знаходження першої лінії ще 4 рази. Результат занесіть до таблиці 1.
4. Знайдіть решту спектральних ліній та виміряйте відповідні їм кількості поділок, як було зазначено у попередніх пунктах. Результати занесіть до таблиці 1.
5. Визначте середні значення показів барабана монохроматора для кожної спектральної лінії та за дисперсійною кривою (рисунок 3) знайдіть відповідні значення довжин хвиль.

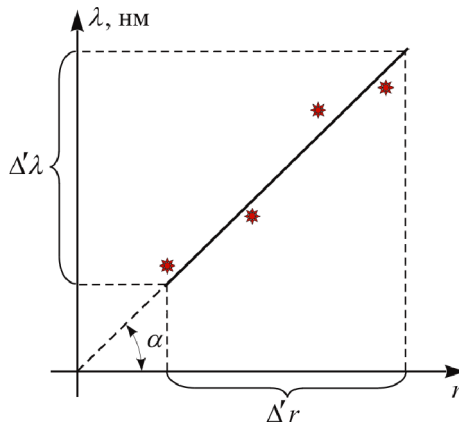


Рисунок 4 – До визначення сталої Рідберга за експериментальними даними

6. Заповніть решту таблиці 1. Значення $r(n)$ слід знаходити за формулою (11).
7. Одержані значення нанесіть на графік $\lambda(r)$ (див. рисунок 4) та проведіть пряму лінію так, щоб кожна одержана експериментально точка лежала якомога ближче до неї.
8. Знайдіть тангенс кута нахилу одержаної прямої α згідно з рисунком 4

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta' \lambda}{\Delta' r}. \quad (12)$$

9. Визначте сталу Рідберга як

$$R = c / \operatorname{tg} \alpha. \quad (13)$$

10. Порівняйте одержане за формулою (13) значення з теоретичним, що дається виразом (8).
11. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Описати планетарну модель атома.
2. Сформулювати постулати Бора.
3. Що називають дисперсійною кривою монохроматора?
4. Що таке спектроскопія?
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Пояснити механізм випромінювання електромагнітної хвилі атомом. Чому спектр випромінювання є дискретним?
7. У чому суть явища дисперсії? Її роль у роботі монохроматора.
8. Описати будову та принцип роботи монохроматора УМ-2.
9. У чому переваги спектроскопії над іншими методами? Навести приклади.

10. Як у даній роботі за експериментальними даними визначається стала Рідберга?

На оцінку “відмінно”

11. Які протиріччя містить теорія Бора?
12. Яким чином водень у капілярній трубці починає світитися? Якими процесами це супроводжується?
13. Розрахувати енергію, швидкість та радіус орбіти електрона в атомі водню.
14. Розрахувати для воднеподібного атома потенціал іонізації та роботу іонізації.
15. Вивести формулу теоретичного визначення сталої Рідберга (8).

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.:Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М.: Наука, 1980.

Лабораторна робота 14

ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ДІЇ ЕЛЕКТРОННОГО МІКРОСКОПА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ДЕ БРОЙЛЯ ЕЛЕКТРОНА

1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися з будовою та принципом дії електронного мікроскопа.
2. Визначити довжину хвилі де Бройля, користуючись електронограмами металевих полікристалічних зразків.
3. Дослідити вплив релятивістських ефектів на величину хвилі де Бройля.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Хвильові властивості речовини

Згідно з сучасними уявленнями про матеріальний світ класичні поняття “частинка” та “хвиля” є просто абстрактними моделями реальних об’єктів, які не здатні розкрити усієї множини явищ природи, особливо у мікросвіті. Будь-який реальний мікроскопічний об’єкт (наприклад, електрон або фотон) має як властивості частинки, так і властивості хвилі, і залежно від конкретних умов спостереження у нього можуть проявлятися або одні, або інші. Останнє твердження складає зміст так званого **корпускулярно-хвильового дуалізму** матерії. З квантової оптики відомо, що електромагнітній хвилі з частотою ν відповідає частинка – фотон – з енергією W , яка визначається співвідношенням

$$W = h\nu, \quad (1)$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка. За аналогією з цим французький фізик Луї де Бройль висловив гіпотезу, згідно з якою кожній частинці з імпульсом \vec{p} відповідає хвиля з довжиною λ . Зв’язок між модулем імпульсу p та λ визначається таким чином:

$$p = h/\lambda . \quad (2)$$

Хвилі, які відповідають частинкам, на честь автора ідеї називаються **хвилями де Бройля**.

Нехай електрон набуває швидкості під дією різниці потенціалів U . Тоді, скориставшись законом збереження енергії, одержимо

$$eU = W_k, \quad (3)$$

де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряду електрона; W_k – кінетична енергія, яка для нерелятивістського випадку (коли швидкість V руху електрона набагато менша від швидкості світла $c = 3 \cdot 10^8$ м/с) дорівнює

$$W_k = \frac{1}{2} m_e V^2, \quad (4)$$

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – маса спокою електрона. У релятивістському випадку (тобто коли виконується умова $V \sim c$) кінетична енергія визначається як

$$W_k = c\sqrt{p^2 + m_e^2 c^2} - m_e c^2. \quad (5)$$

З урахуванням співвідношень (2)-(5) можна показати, що довжина хвилі де Бройля електрона знаходиться як

$$\lambda = h/\sqrt{2m_e eU} \quad (V \ll c), \quad (6)$$

$$\lambda = h/\sqrt{2m_e eU(1 + eU/2m_e c^2)} \quad (V \sim c). \quad (7)$$

Гіпотеза де Бройля не є просто зручним прийомом, який дозволяє математично формалізувати закономірності мікросвіту. Ще раз підкреслимо, що об'єкти, які ми звикли вважати “частинками”, насправді можуть демонструвати хвильові властивості. Наприклад, явища інтерференції та дифракції електронів не лише можуть спостерігатися, а мають дуже широке застосування у фізиці та техніці.

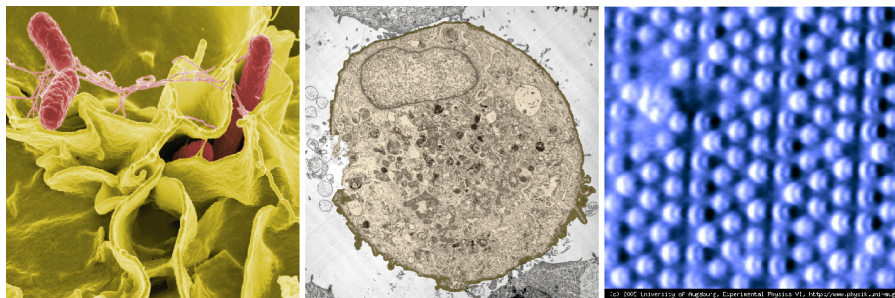
2.2. Електронний мікроскоп

До 80 % інформації людина одержує через органи зору. Тому інструментальні засоби візуального спостереження за об'єктами навколишнього світу невпинно вдосконалювалися впродовж усієї історії людства. При цьому традиційно використовувалися джерела світла оптичного діапазону, а розрахунок приладів проводився на базі формалізму геометричної оптики. Однак, як було показано англійським фізиком Релеєм, дві точки можуть бути зареєстровані роздільно лише тоді, коли кутлова відстань $\delta\varphi$ між ними

$$\delta\varphi \geq 1,22\lambda'/2R, \quad (8)$$

де λ' – довжина світлової хвилі; R – радіус лінзи, сферичного дзеркала або діафрагми. Для підвищення роздільної здатності стандартних оптичних приладів потрібно або збільшувати радіус R , або зменшувати довжину хвилі λ' . Перший спосіб обмежений технічними можливостями виробництва лінз. Зменшення ж довжини хвилі означає недоступність зображення для людського ока, оскільки тоді світлові хвилі будуть лежати в ультрафіолетовій частині спектра. Цю складність можна подолати за допомогою спеціальних перетворювачів та методу фотографії. Але ультрафіолетового діапазону не достатньо для істотного розширення меж вимірювання, а рентгенівськими променями неможливо керувати за допомогою звичних лінз, оскільки їх показник заломлення в цій області спектру майже дорівнює одиниці.

Саме тут і слід згадати про хвильові властивості мікрочастинок, зокрема електрона. Аналіз виразів (6) та (7) показує, що відповідна довжина хвилі де Бройля визначається прискорюючою різницею потенціалів U . Наприклад, величині $U \sim 100$ кВ відповідає $\lambda \sim 0,01$ нм. Цей факт і є фізичною основою для роботи цілого класу вимірювальних приладів – електронних мікроскопів. За стандартним означенням прилад, який дозволяє одержувати збільшені зображення об'єктів, використовуючи для їх освітлення потік розігнаних до високих швидкостей електронів, називається **електронним мікроскопом**. Проте зараз завдяки бурхливому розвитку методу електронної мікроскопії та виникненню



а)

б)

в)

Рисунок 1 – Зображення бактерії сальмонели, одержане за допомогою скануючого електронного мікроскопа (а); зображення клітини, одержане за допомогою просвічувального електронного мікроскопа (б); зображення атомів на поверхні кристала з гексагональною решіткою, одержане за допомогою атомно-силового мікроскопа (в)

широкого спектру модифікацій цього приладу, збільшення далеко не єдина його функція. Серед найбільш відомих можливостей сучасних електронних мікроскопів слід відзначити такі:

- а) дослідження топології поверхні матеріалів;
- б) дослідження внутрішньої будови твердих тіл;
- в) побудова тривимірних зображень мікрооб'єктів;
- г) дослідження їх електричних та магнітних властивостей;
- д) маніпулювання мікрооб'єктами.

Типові приклади зображень, одержаних за допомогою електронних мікроскопів, наведені на рисунку 1.

Розглянемо детально найпростіший тип електронного мікроскопа – *просвічувальний електронний мікроскоп* (ПЕМ). За принципом дії він подібний до звичайного оптичного мікроскопа, лише замість світла використовується пучок електронів – так званий електронний промінь. Однак конструкційно ПЕМ значно відрізняється від оптичного, у першу чергу принципом керування променем. Впливати на рух заряджених електронів можна за допомогою електричних та магнітних полів. Тому керування електронним променем відбувається за допомогою так званих *електростатичних* або *магнітних лінз*. Також необхідною умовою безперешкодного проходження електронного променя є глибокий вакуум. Тому вся оптична система ПЕМ розміщена у спеціальній евакуйованій колоні, тиск у якій у мільйони разів менший від атмосферного.

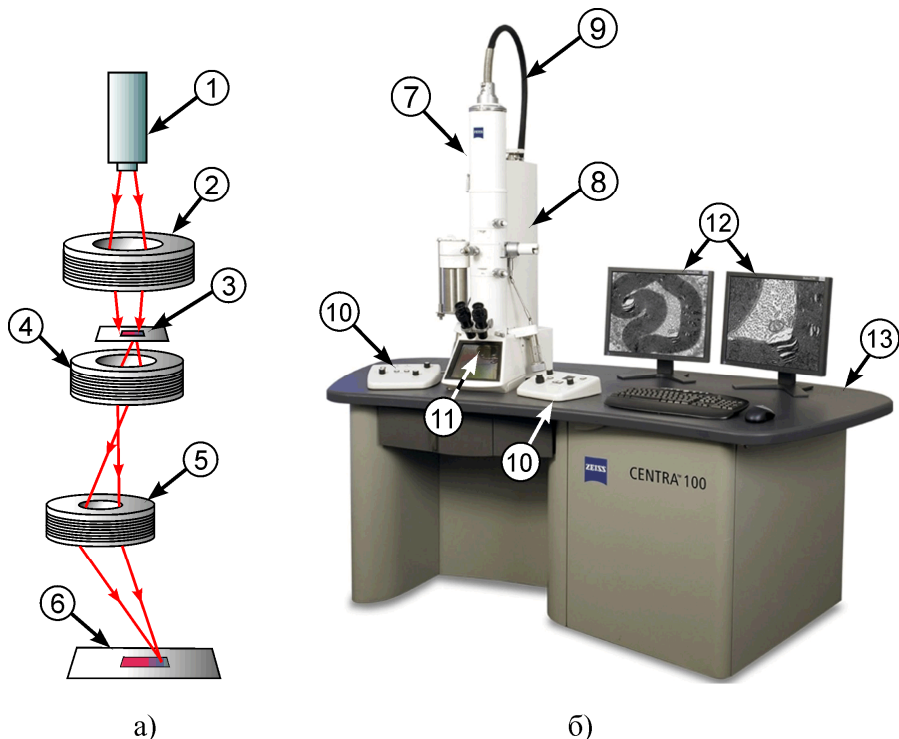


Рисунок 2 – Оптична схема ПЕМ (а); сучасний ПЕМ компанії “Carl Zeiss” (б): 1 – електронний прожектор; 2 – конденсорна лінза; 3 – досліджуваний зразок; 4 – проєкційна лінза; 5 – об’єктивна лінза; 6 – екран із зображенням; 7 – колона з оптичною системою ПЕМ; 8 – вакуумна система; 9 – високовольтний кабель; 10 – органи керування мікроскопом; 11 – вікно екрана; 12 – монітори комп’ютера; 13 – станина

Схематично будова оптичної частини ПЕМ наведена на рисунку 2а. Джерелом електронів, як і в електронно-променевої трубці, є так званий електронний прожектор 1. Він складається з підігрівного катода, який завдяки термоелектронній емісії випромінює електрони, та системи анодів, що фокусують їх у вузький пучок, а потім прискорюють. Подальше проєктування променя на екран 6 відбувається, як правило, за допомогою магнітних лінз. Магнітна лінза конструкційно являє собою котушку зі струмом, розміщену у спеціальному кожусі з кобальт-нікелевого сплаву.

Напруженість магнітного поля у центрі магнітної лінзи дуже велика і регулюється струмом у котушці. Кожна лінза має своє призначення. Перша, так звана **конденсорна** лінза 2, проектує електронний промінь на досліджуваний об'єкт 3. Після просвічування модифікований промінь проходить через **проекційну** 4 та **об'єктивну** 5 лінзи, які формують зображення на екрані. У цьому полягає аналогія з системою звичайного оптичного мікроскопа.

Зображення в ПЕМ формується завдяки розсіянню електронів у матеріалі досліджуваного зразка. При цьому ступінь розсіювання пропорційний товщині та густині ділянок зразка. Таким чином, за інтенсивністю променя, що потрапляє в результаті на екран, можна дізнатися про будову об'єкта досліджень. Кінцева обробка зображення може бути різноманітною. Наприклад, можна безпосередньо спостерігати зображення у спеціальний бінокулярний мікроскоп, фотографувати зображення або переводити його у цифрову форму за допомогою матриці фотодіодів та передавати у комп'ютер. Зовнішній вигляд сучасного ПЕМ наведений на рисунку 2б.

2.3. Електронографія

Будь-який ПЕМ може працювати у двох режимах:

- а) **режим мікроскопа**, коли на екрані спостерігається безпосередньо зображення об'єкта;
- б) **режим електронографії**, коли на екрані спостерігається дифракційна картина від зразка.

Електронографія – метод дослідження будови речовини, що базується на дифракції електронів на атомній структурі матеріалу. Даний метод є потужним інструментом дослідження внутрішньої будови речовини. За його допомогою визначають атомну структуру кристалів, аморфних тіл і навіть молекул. Так, структуру молекули ДНК розшифрували саме за електронограмами. **Електронограма** – фотографічний знімок дифракційної картини, яка утворюється під час розсіювання електронів об'єктами. Взаємне розміщення і ступінь освітленості дифракційних максимумів на електронограмі дають інформацію про структуру досліджуваного зразка.

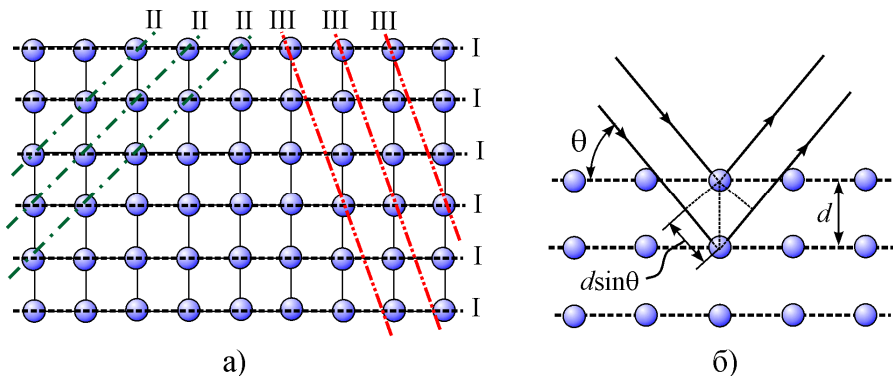


Рисунок 3 – Схематичне зображення кристалічної решітки. Площини, проведені через атомні площини у кристалі (а); до пояснення формули Вульфа-Брегга (б)

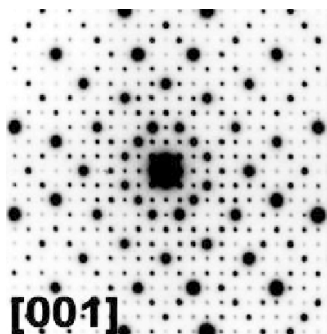
У подальшому будуть досліджуватися електроннограми кристалічних зразків, тому зупинимося більш детально саме на них. Атоми в кристалі розміщені впорядковано, утворюючи кристалічну решітку. Користуючись підходом, який запропонували Ю. Вульф, У.Л. Брегг та У.Г. Брегг, проведемо через періодично розміщені атоми умовні площини, які будемо називати **атомними площинами** (див. рисунок 3а). Електрони будуть відбиватися від сусідніх паралельних атомних площин та інтерферувати між собою подібно вторинним хвилям, що йдуть від різних щілин дифракційної решітки. Зі схеми на рисунку 3б простежується, що умова максимуму дифракційної картини матиме вигляд

$$2d \sin \theta = \pm n\lambda, \quad (9)$$

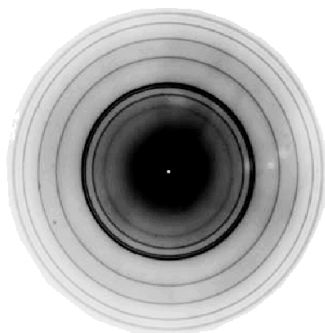
де d – відстань між атомними площинами (величина, відома для кожного типу матеріалу); θ – кут між напрямком падіння електронів та атомною площиною; $n = 1, 2, 3, \dots$ – ціле додатне число. Вираз (9) називається **формулою Вульфа-Брегга**. Атомних площин можна провести нескінченно багато, проте вони будуть відрізнятися щільністю розміщення атомів на них, як показано на рисунку 3а.

Завдяки внутрішній симетрії кристала одному й тому самому напрямку падіння електронного променя може відповідати декілька різних за положенням та інтенсивністю дифракційних мак-

симумів, а сама дифракційна картина матиме вигляд симетрично розміщених світлих плям різної інтенсивності (див. рисунок 4а). Кожен із таких максимумів буде задовольняти рівняння (9), що записане для конкретної системи паралельних атомних площин (див. рисунок 3а).



а)



б)

Рисунок 4 – Приклади електронограм: від монокристалічного телуриду талію $\text{Ta}_{97}\text{Te}_{60}$ (а); від полікристалічного берилію (б)

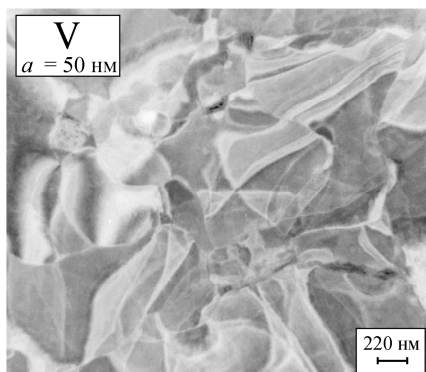
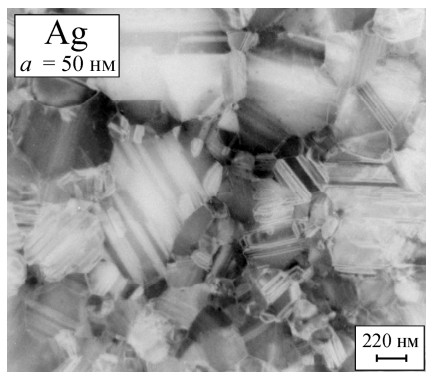


Рисунок 5 – Знімки полікристалічних плівок срібла та ванадію (одержані співробітниками кафедри прикладної фізики СумДУ за допомогою електронного мікроскопа ПЕМ-125К Сумського заводу “Selmi”)

Якщо зразок полікристалічний (див. рис. 5), то умова (9) буде виконуватись одночасно для багатьох хаотично зорієнтованих монокристалічних складових (так званих зерен) полікристала. У результаті для кожної системи атомних площин та кожного n одержимо не один напрямок максимуму дифракції, а їх множину, що утворює конічну поверхню. Вісь такої поверхні буде збігатися з напрямком початкового електронного променя, а кінцева дифракційна картина матиме вигляд системи дифракційних кілець (див. рис. 4б).

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Електронний мікроскоп.
2. Електроннограми полікристалічних зразків.
3. Лінійка.

4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ

Користуючись виразом (9) та знаючи всі величини, що входять до його складу, можна визначити довжину хвилі де Бройля електрона з електроннограми полікристалічного зразка. На рисунку 6а зображений хід електронного променя через зразок. У випадку, коли кут між атомною площиною та напрямком ходу променя становить θ , кут між початковим напрямком променя та напрямком його виходу буде становити 2θ . Якщо кут θ порівняно малий ($\theta \ll 1$), справедливі такі наближені рівності:

$$\operatorname{tg}2\theta \approx 2\theta \approx 2\sin\theta.$$

З урахуванням останнього виразу та того, що $\operatorname{tg}2\theta = D/2L$ (див. рисунок 6а), формула (9) для першого максимуму ($n = 1$) набуває вигляду

$$\lambda = \frac{1}{2L} D_i d_i, \quad (10)$$

де D_i – діаметр кільця електронограми, що відповідає першому максимуму дифракції від i -ї системи атомних площин; d_i – відстань між атомними площинами i -ї системи; L – ефективна відстань між зразком та фотопластинкою.

Перепишемо вираз (10) у такому вигляді:

$$D_i = 2\lambda L \frac{1}{d_i} = \operatorname{tg} \alpha_i \frac{1}{d_i}.$$

Останнє співвідношення дозволяє простежити, що довжина хвилі де Бройля λ входить у коефіцієнт пропорційності у лінійній залежності D_i від $1/d_i$. Цим можна скористатися для точного визначення величини λ з експериментальних даних. Якщо нанести одержані у результаті вимірювань значення D_i та d_i на координатну площину та провести пряму лінію, як показано на рисунку 6б, тангенс кута нахилу цієї прямої до осі $1/d$ і буде визначати величину довжини хвилі де Бройля як

$$\lambda = \frac{1}{2L} \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2L} \cdot \frac{D_{\max} - D_{\min}}{1/d_{\min} - 1/d_{\max}}, \quad (11)$$

де величини D_{\max} , D_{\min} , $1/d_{\max}$, $1/d_{\min}$ визначаються з рисунка 6б.

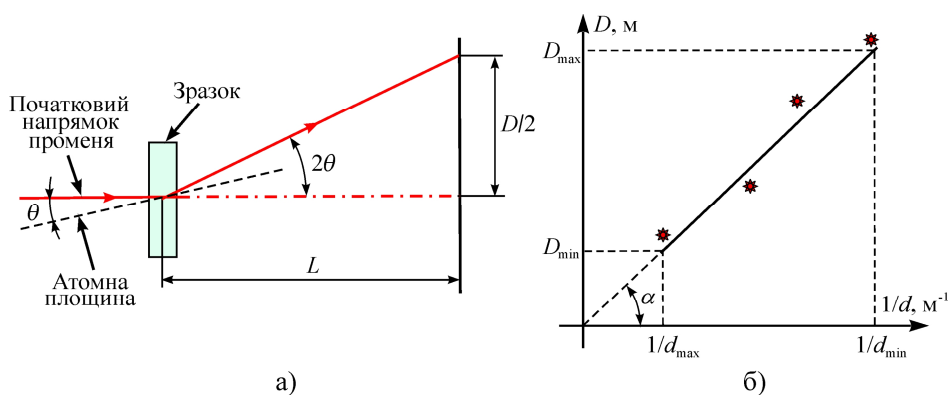


Рисунок 6 – Хід електронного променя через зразок (а); графік щодо визначення хвилі де Бройля з експериментальних даних (б)

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Особливість даної роботи полягає у тому, що студент не працює безпосередньо на електронному мікроскопі, оскільки даний прилад є надто складним в експлуатації, а одержання електронограм потребує значного часу .

1. Уважно ознайомтеся із попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Візьміть участь в екскурсії до лабораторії, де розміщений електронний мікроскоп, та уважно вислухайте розповідь відповідального лаборанта.
3. Одержіть у викладача електронограми від полікристалічних зразків і такі дані, необхідні для подальших розрахунків: а) величину прискорюючої напруги U_1 та U_2 для обох зразків; б) ефективну відстань L ; в) відстані d_i між атомними площинами (див. вираз (10)). Запишіть ці дані у таблицю 1.
4. Виміряйте не менше як три рази діаметри **всіх** дифракційних кілець електронограм двох зразків та запишіть їх у таблицю 1.
5. Побудуйте для кожного зразка графік згідно з рисунком 6б та визначте з нього величини $1/d_{\min}$, $1/d_{\max}$ та D_{\max} , D_{\min} . Дані запишіть у таблицю 1. Важливо врахувати, що зазначені залежності мають виходити з нуля координат.
6. Визначте довжини хвиль де Бройля для кожного зразка з одержаних даних за допомогою співвідношення (11).
7. Похибки визначення оцініть як

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D_{\min}}\right)^2}. \quad (12)$$

Тут похибкою ΔD слід вважати половину товщини дифракційного кільця на електронограмі.

8. Розрахуйте теоретичні значення λ згідно із виразами (6) та (7). Порівняйте одержані значення між собою та із експериментально визначеними довжинами хвиль.
9. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№ зра- зка	№ дифра- кційного кільця	d , нм	$1/d$, нм ⁻¹	№ ви- мірю- вання	D , мм	λ , нм	λ , нм теор. (6)	λ , нм теор. (7)
1	1			1				
				2				
				3				
				Середнє				
	...							
	N_{\max}							
2	1			1				
				2				
				3				
				Середнє				
	...							
	N_{\max}							

$U_1 =$	$D_{\min} =$	$D_{\max} =$	$1/d_{\min} =$	$1/d_{\max} =$	$\Delta\lambda_1 =$
$U_2 =$	$D_{\min} =$	$D_{\max} =$	$1/d_{\min} =$	$1/d_{\max} =$	$\Delta\lambda_2 =$

$\Delta D =$

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Сформулювати сутність корпускулярно-хвильового дуалізму матерії. Записати формули для визначення енергії та імпульсу мікрочастинки.
2. Що таке електронний мікроскоп? Для чого він використовується?
3. Що таке електроннограма?
4. Записати формулу Вульфа-Брегга.
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Записати вираз для визначення довжини хвилі де Бройля, якщо відомий імпульс частинки.
7. Що таке ПЕМ? В яких режимах він може працювати? Чим відрізняються ці режими?
8. Описати оптичну систему ПЕМ.
9. Одержати формулу Вульфа-Брегга. Дати визначення усіх величин, що до неї входять.
10. Що називають атомними площинами? Скільки їх може існувати в кристалі?

На оцінку “відмінно”

11. Пояснити, чому електронограми від монокристалічних та полікристалічних зразків мають саме такий вигляд, як наведено на рисунку 4.
12. Розкрити сутність методики визначення довжини хвилі де Бройля з електронограм.
13. Одержати формулу для визначення довжини хвилі де Бройля з електронограм.
14. Одержати вираз для підрахунку похибки (12).
15. Одержати співвідношення (6) та (7) для розрахунку теоретичних значень довжини хвилі де Бройля.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики: в 3 т. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.

Лабораторна робота 15

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1. МЕТА РОБОТИ

1. Експериментально переконатися у справедливості закону Бугера.
2. Визначити радіоактивний фон навколишнього середовища.
3. Визначити коефіцієнт поглинання заданого матеріалу.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Радіоактивність

Радіоактивністю називається самочинне перетворення одних атомних ядер в інші з випромінюванням суб'ядерних частинок. Як правило, розрізняють три види радіоактивних випромінювань, названі відповідно α -, β - та γ -променями. Аналіз їх траєкторій у магнітному полі показує, що α -промені є потоком ядер гелію; також їх ще називають α -частинками. Бета-промені є потоком електронів (або позитронів); їх ще називають β -частинками. Напрямок руху γ -променів не зазнає дії поля. У подальшому було встановлено, що це електромагнітне випромінювання з дуже малою довжиною хвилі ($\lambda = 10^{-13}$ - 10^{-10} м), тому його ще називають γ -квантами.

Альфа-частинки утворюються у результаті так званого α -розпаду. Загальна схема його проходження умовно записується як



де A – масове число атома або кількість протонів та нейтронів у ядрі атома; Z – зарядове число атома або кількість протонів у ядрі атома. Під час запису реакцій типу (1) завжди потрібно пам'ятати про те, що виконується **закон збереження** заряду та маси, тобто сума масових чисел у лівій частині виразу дорівнює аналогічній сумі у правій. Те саме виконується стосовно Z . Зрозуміло, що ядро

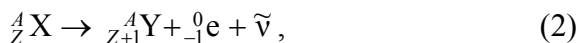
гелію (α -частинка) складається з двох протонів та двох нейтронів. У результаті випромінювання α -частинки ядро залишку Y, як правило, залишається у збудженому стані. Надлишок енергії може бути вивільнений у два способи. Перший полягає у випромінюванні ядром γ -кванта, а другий – у віддаванні енергії електрону внутрішньої оболонки, внаслідок чого електрон виходить за межі атома. Останнє явище називається *електронною конверсією*. Вакансія, яка виникає при цьому, заповнюється електроном з верхніх оболонок. У свою чергу, такі переходи електронів супроводжуються характеристичним рентгенівським випромінюванням.

Бета-частинки утворюються у результаті так званого **β -розпаду**. Всього відомо три типи такого розпаду:

- а) β^- - розпад (електронний розпад);
- б) β^+ - розпад (позитронний розпад);
- в) *електронне захоплення*.

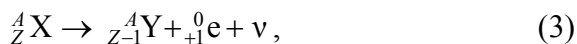
Розглянемо детально кожен.

Електронний розпад (або β^- - розпад) відбувається за схемою



де ${}^0_{-1} e$ – електрон; $\tilde{\nu}$ – так зване **антинейтрино**. Теоретичним підґрунтям існування такої частинки є закон збереження моменту імпульсу, який свідчить про те, що сумарний момент імпульсу частинок у лівій частині співвідношення (2) повинен дорівнювати сумі у правій частині. Оскільки антинейтрино не має заряду, а його маса набагато менша маси електрона, цю частинку дуже складно спостерігати експериментально, однак це було зроблено. Спектр енергій електронів, що випромінюються під час β -розпаду, є досить широким та щільним, оскільки енергія розподіляється між електроном та антинейтрино у довільних пропорціях.

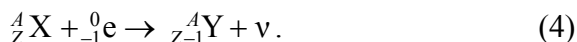
Позитронний розпад (або β^+ - розпад) відбувається за схемою



де ${}^0_{+1} e$ – позитрон – частинка, маса якої дорівнює масі електрона, а заряд за модулем дорівнює заряду електрона, проте є додатний;

ν – нейтрино – частинка, аналогічна до антинейтрино. Спостерігати позитрон можливо лише у вакуумі, оскільки після його утворення за рахунок кулонівської взаємодії він буде притягуватися до одного з електронів, наявних у речовині. У результаті зіткнення обидві частинки зникають, а їх енергія випромінюється у вигляді декількох γ -квантів. Цей процес називається *анігіляцією*.

Електронне захоплення полягає у тому, що один із протонів ядра поглинає електрон внутрішньої електронної оболонки атома. Схема процесу має такий вигляд:



Ядро Y , що виникає при цьому, може бути у збудженому стані, а перехід до основного стану супроводжується випромінюванням γ -квантів. Як і у описаному вище випадку α -розпаду, вакансія, яка виникає на місці захопленого електрона, заповнюється електроном з верхніх оболонок атома. А такі переходи електронів супроводжуються характеристичним рентгенівським випромінюванням.

2.1. Дія радіоактивного випромінювання на біологічні об'єкти

Акти перетворення (або розпаду) атомних ядер та випромінювання частинок мають ймовірнісний характер. Зрозуміло, що коли процеси розпаду відбуваються незалежно один від одного, кількість атомів радіоактивного хімічного елемента буде зменшуватися з часом за експоненціальним законом

$$N = N_0 \exp(-t/\tau), \quad (5)$$

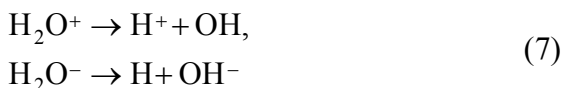
де τ – час, за який кількість ядер зменшується в e ($\approx 2,7183$) разів, залежить від типу матеріалу; N_0 – початкова кількість атомів. Вираз (5) називається **законом радіоактивного розпаду**. Кількість A актів розпаду, що відбувається за одиницю часу, називається **активністю радіоактивної речовини**. Зі співвідношення (5) нескладно одержати, що

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \frac{N_0}{\tau} \exp(-t/\tau) = \frac{N}{\tau}. \quad (6)$$

Одиницею вимірювання активності в СІ є **бекерель** (Бк). Нестандартною, широко застосовною одиницею активності є **кюрі**. Один кюрі – це активність такого препарату, в якому за 1 с відбувається $3,7 \cdot 10^9$ актів розпаду (активність 1 грама радію).

Дія радіоактивного випромінювання на об'єкти, що оточують радіоактивний препарат, залежить як від його активності, так і від типу випромінюваних частинок. Альфа-частинки завдяки своїй великій масі мають досить велику енергію (~ 1 МеВ), а також електричний заряд, тому дуже інтенсивно взаємодіють з речовиною. Сутність цієї взаємодії у першу чергу полягає в **іонізації** атомів речовини. Альфа-частинки сильно іонізують атоми середовища, однак досить швидко втрачають свою енергію, тому довжина вільного пробігу λ у них невелика ($\lambda \sim 10^{-5}$ м у твердому тілі та $\lambda \sim 10^{-2}$ м у повітрі). Бета-частинки характеризуються меншою енергією і вдвічі меншим зарядом. Це є причиною того, що їх іонізуюча дія менша порівняно з α -частинками. Однак, як наслідок, більшою є проникна здатність: $\lambda \sim 10^{-2}$ м у твердому тілі. Гамма-випромінювання має найменшу іонізуючу дію, проте має дуже велику проникну здатність. Так, шар залізобетону півметрової товщини ослаблює їх потік лише наполовину.

Біологічна дія радіоактивного випромінювання обумовлена його іонізуючою дією. Внаслідок іонізації атомів може відбуватися порушення структури молекул, з яких побудовані клітини живого організму. Первинні процеси іонізації не спричиняють великих порушень у тканинах. Руйнівна ж дія випромінювання пов'язана із вторинними реакціями, при яких відбувається розрив зв'язків усередині складних органічних молекул унаслідок дії **вільних радикалів**. Наприклад, дуже поширеним є так **званий радіоліз води** – розпад молекул води за схемою



з утворенням вільних радикалів H та OH , які мають винятково високу хімічну активність.

Інший тип дії радіоактивного випромінювання полягає не у руйнуванні клітин організму, а у частковій зміні їх будови та функціональності. Коли такі зміни не передаються наступному поколінню, кажуть, що мають місце **соматичні ефекти**. Якщо ж ці зміни мають місце у наступних поколіннях, кажуть про **генетичні ефекти**, або **мутації**.

Для характеристики дії радіоактивного випромінювання на біологічні об'єкти вводять величини, наведені нижче.

1) **Доза опромінення (експозиційна доза)**. Вона визначається кількістю іонів, що утворилась під дією випромінювання. Одиницею вимірювання в системі СІ є **кулон на кілограм** (Кл/кг). Позасистемною одиницею є **рентген** (Р). Один рентген відповідає дозі випромінювання, за якої в 1 см^3 сухого повітря за нормальних умов утворюється $2,08 \cdot 10^9$ пар іонів. Природно, що одна й та сама кількість іонізуючих частинок різного сорту утворює різну кількість іонів.

2) **Доза поглинання**. Вона визначається кількістю енергії іонізуючого випромінювання, яке поглинається одиницею маси. Одиницею вимірювання у системі СІ є **грей** (Гр = Дж/кг). Позасистемна одиниця – рад (1 Гр = 100 рад).

3) **Біологічна доза**. Біологічний ефект пов'язаний не лише з енергією, яка поглинається одиницею маси опромінюваної тканини, а залежить ще й від локальної густини іонізації. Тому вводять поняття **коефіцієнта відносної біологічної ефективності** (ВБЕ) випромінювання. Він показує, у скільки разів дія того чи іншого випромінювання ефективніша за рентгенівські промені. Так, для α -частинок ВБЕ = 20, для β -частинок ВБЕ = 1. Одиницею вимірювання біологічної дози у системі СІ є **зіверт** (Зв). Один зіверт – це доза будь-якого випромінювання, поглинання якої одним кілограмом живої тканини спричиняє таку саму дію, як доза поглинання 1 Гр рентгенівських променів. Позасистемною одиницею є “бер”, що є скороченням від “біологічний еквівалент рентгена”. Один бер – це доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, яка спричиняє таку саму біологічну дію, як і доза рентгенівського випромінювання 1 рентген.

4) **Гранично допустима доза** – це біологічна доза опромінення, що призводить до патологічних наслідків у вигляді соматичних ефектів. Як правило, за допустиму дозу опромінення для людини приймають 0,3 бер на тиждень. Таким чином, людина, яка опромінюється у таких дозах, за 30 років отримає дозу близько 450 бер. Але така сама доза, отримана середньостатистичною здоровою людиною віком до 30 років, при однократному опроміненні в 50 % випадків виявляється смертельною. Для генетичних ефектів не існує граничної дози. Їх прояв може спостерігатися навіть при дуже малих дозах.

Стійкість різних організмів до дії іонізуючих випромінювань коливається у дуже широких межах. При цьому чим більш складним є організм, тим легше він руйнується під дією випромінювання. Так, наприклад, бактерії у тисячі разів стійкіші до радіації, ніж людина і високорозвинені тварини.

2.2. Закон Бугера

Для захисту від радіоактивного випромінювання використовують різноманітні екрани, саркофаги і т. ін. Задача таких конструкцій полягає у поглинанні випромінювання. Кількість поглинутих частинок dn має бути пропорційною до товщини матеріалу dl , через який проходить випромінювання, та до початкової кількості n частинок у потоці (див. рисунок 1а). Тоді справедливим є вираз

$$-dn = \mu n dl, \quad (8)$$

де μ – так званий коефіцієнт поглинання, який залежить від типу матеріалу. Знак « $-$ » відображає той факт, що кількість частинок у початковому потоці зменшується. Інтегрування співвідношення (8) з урахуванням того, що інтенсивність випромінювання I пропорційна кількості частинок, дасть вираз

$$I = I_0 \exp(-\mu L), \quad (9)$$

де I_0 – початкова інтенсивність випромінювання; L – загальна товщина шару, який пройшов пучок частинок. Вираз (9) називається **законом Бугера**.

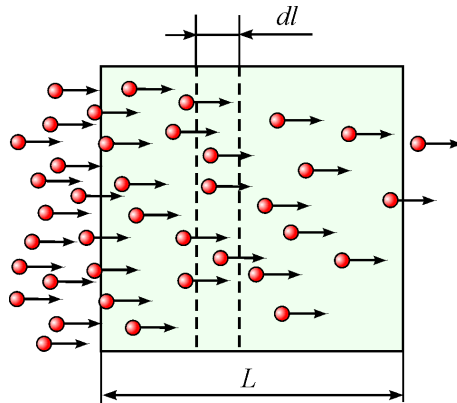


Рисунок 1 – Поглинання радіоактивного потоку речовиною

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Газорозрядний лічильник Гейгера-Мюллера.
2. Джерело радіоактивного випромінювання узакисному корпусі.
3. Металеві пластинки.
4. Мікрометр.
5. Секундомір.
6. Лічильник електричних імпульсів.

4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1. Лічильник Гейгера-Мюллера

Для визначення інтенсивності наявного радіоактивного випромінювання використовується лабораторна установка, наведена на рисунку 2. Основу установки становить так званий *лічильник Гейгера-Мюллера* 2. Конструкційно він являє собою газорозрядний діод (див. рисунок 3а), на який подано високу напругу. Частинка, яка потрапляє у простір між його електродами, іонізує атоми газу. Іони та електрони прискорюються електричним полем, що утворюється між анодом та катодом, зіштовхуються з неіонізованими атомами газу та іонізують їх і т.д. Таким чином, починається лавиноподібна іонізація газу, а простір між електродами діода стає провідним. У результаті електричне

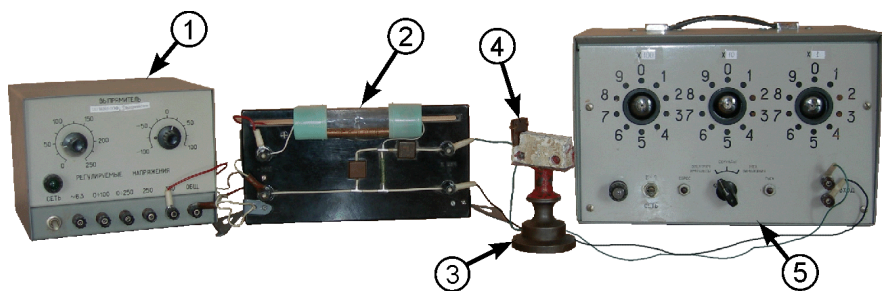


Рисунок 2 – Видгляд лабораторної установки: 1– блок живлення; 2 – лічильник Гейгера-Мюллера; 3 – штатив з радіоактивним препаратом; 4 – металеві поглинаючі пластини; 5 – лічильник імпульсів

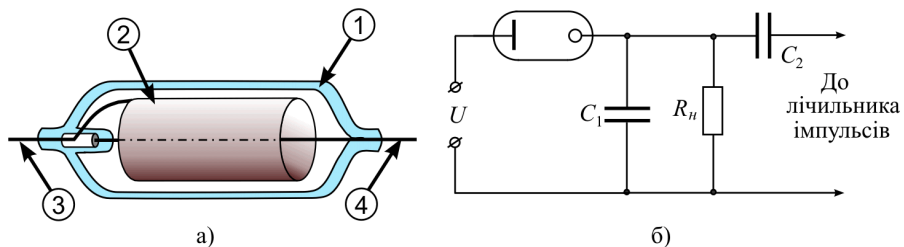


Рисунок 3 – Будова робочої частини лічильника Гейгера-Мюллера (а): 1 – скляна герметична колба; 2 – катод; 3 – вивід катода; 4 – анод. Принципова схема лічильника Гейгера-Мюллера (б)

коло замикається, і вся зовнішня напруга падає на баластному опорі R_n (див. рис. 3б). Сигнал з останнього через конденсатор C_2 подається на лічильник імпульсів 5, показання якого збільшуються на одиницю. У той самий час напруга на діоді різко зменшується, струм припиняється і лічильник знову готовий до роботи. Таким чином, лічильник буде рахувати кількість іонізуючих частинок, що потрапляють у простір між анодом і катодом. Конденсатори C_1 та C_2 у схемі (див. рис. 3б) відіграють допоміжну роль.

Лічильник Гейгера-Мюллера має практично стовідсоткову ймовірність реєстрації однієї частинки, оскільки для виникнення розряду достатньо однієї електрон-іонної пари. Однак тривалість реєстрації лічильника порівняно велика ($\sim 10^{-4}$ с). Саме цей час потрібен для того, щоб повільні позитивні іони від анода дійшли до катода та відновили чутливість детектора.

4.2. Методика визначення коефіцієнта поглинання

Для експериментальної перевірки справедливості виразу (9) досить одержати відомості про кількість іонізуючих частинок, що пройшли через різну кількість поглинаючих пластинок 4 (див. рис. 2) однакової товщини, зроблених з одного й того самого матеріалу. Зазначена кількість визначається за допомогою лічильника Гейгера-Мюллера 2, на який спрямовується потік іонізуючого випромінювання від джерела 3. На практиці лічильник буде показувати не лише інтенсивність випромінювання, що пройшло через поглинаючий матеріал, а й одночасно реєструватиме так званий **нульовий фон** I_{ϕ} . Природа останнього є різноманітною: до його складу входять частинки космічного походження, випромінювання з надр Землі, випромінювання від радіоактивних ізотопів, що містяться у конструкції будівлі. Тому завжди від виміряного у конкретному експерименті значення інтенсивності I потрібно віднімати інтенсивність фону I_{ϕ} .

Залежність (9) має нелінійний характер, тому для спрощення опрацювання експериментальних даних доцільно використовувати лінійний характер залежності $\ln[(I_0 - I_{\phi})/(I - I_{\phi})]$ від товщини l (див. рис. 4). Тангенс кута нахилу прямої визначатиме коефіцієнт поглинання матеріалу:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{I_0 - I_{\phi}}{I_{\min} - I_{\phi}} \right), \quad (10)$$

де L – загальна товщина усіх поглинаючих пластин, а величина $\ln[(I_0 - I_{\phi})/(I_{\min} - I_{\phi})]$ визначається безпосередньо з рисунка 4. Похибка визначення величини μ може бути знайдена у такий спосіб. Знайдемо по чергово логарифм та диференціал від правої та лівої частин виразу (10). Після заміни диференціалів на відповідні значення абсолютних похибок, а також знаків усіх від’ємних складових похибки μ з “мінус” на “плюс” одержимо

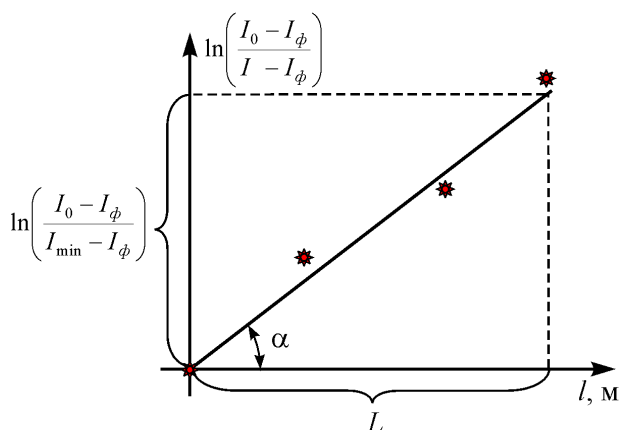


Рисунок 4 – Графік, що пояснює методику визначення коефіцієнта поглинання речовини за експериментальними даними з поглинання радіоактивного випромінювання

$$\Delta\mu = \mu \left\{ \frac{\Delta L}{L} + \left[\ln \left(\frac{I_0 - I_\phi}{I_{\min} - I_\phi} \right) \right]^{-1} \times \left[\frac{\Delta I_\phi (I_{\min} + I_0 - 2I_\phi)}{(I_{\min} - I_\phi)^2} + \frac{\Delta I_0}{I_{\min} - I_\phi} \right] \right\}, \quad (11)$$

де ΔI_ϕ , ΔI_0 - відповідно похибки визначення нульового фону та інтенсивності радіоактивного препарату без поглинаючих пластин. Ці похибки мають лише випадкові складові. Похибка визначення загальної товщини пластин ΔL містить як систематичну (інструментальну), так і випадкову складові. Величина I_{\min} визначається за допомогою знайденого з рисунка значення $\ln[(I_0 - I_\phi)/(I_{\min} - I_\phi)]$.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся із попередніми розділами даної лабораторної роботи та будовою установки.
2. Увімкніть установку в електричну мережу.

3. Виміряйте нульовий фон. Для цього **5 разів** запустіть лічильник імпульсів 5 (див. рисунок 2) на **1 хвилину** за умови, що лічильник Гейгера-Мюллера 2 розміщений поза зоною дії радіоактивного препарату 3. Результати запишіть у таблицю 1.
4. Виміряйте п'ять разів початкову інтенсивність препарату. Для цього розмістіть штатив з радіоактивним препаратом 3 на невеликій відстані (~ 10 см) від лічильника Гейгера-Мюллера 2 та спрямуйте отвір у його захисному корпусі на лічильник імпульсів 5. Вимірювання виконуйте впродовж одного й того самого часу (однієї хвилини). Результати запишіть у таблицю 1.

***Увага!** Отвір захисного корпусу, в якому міститься радіоактивний препарат, повинен бути завжди спрямований у бік, протилежний від людей, які знаходяться в аудиторії.*

5. Виконайте вимірювання з попереднього пункту, не змінюючи положення препарату 3 відносно лічильника 2 для випадків, коли у спеціальному пазу містяться 1, 2, ..., N_{\max} пластин поглинаючого матеріалу. Час вимірювань залишити незмінним.
6. Мікрометром виміряйте товщину поглинаючих пластин 5 разів та знайдіть їх середнє значення $\langle l_0 \rangle$. Випадкову складову $\Delta_2 L$ абсолютної похибки знайдіть як

$$\Delta_2 L = 3 \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (l_{0j} - \langle l_0 \rangle)^2} \quad (N=5). \quad (12)$$

7. Визначте абсолютну похибку визначення товщини пластини у відповідності до виразу

$$\Delta L = \sqrt{(\Delta_1 L)^2 + (\Delta_2 L)^2}, \quad (13)$$

де $\Delta_1 L = 0,005$ мм – інструментальна похибка мікрометра.

8. Знайдіть середні значення показів лічильника $\langle I_i \rangle$ у кожному експерименті та знайдіть випадкову складову похибки

$$\Delta I_i = 3 \sqrt{\frac{1}{N_i(N_i-1)} \sum_{j=1}^{N_i} (I_{ij} - \langle I_i \rangle)^2}, \quad (14)$$

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Умови досліджу	№ вимірювання	Показання лічильника I_i	$\Delta I_{ij} = \langle I_i \rangle - I_{ij}$	Кількість імпульсів без фону $I_i - I_\phi$	$\ln \frac{I_0 - I_\phi}{I_i - I_\phi}$	l , мкм	
Нульовий фон ($i \equiv \phi$)	1			0	-		
	2						
	3						
	4						
	5						
	$\langle \dots \rangle$						
З препаратом без пластинок ($i \equiv 0$)						0	
З 1 пластинкою ($i \equiv 1$)						$1 \cdot \langle I_0 \rangle$	
...						...	
З N_{\max} пластинами ($i \equiv N_{\max}$)						$N_{\max} \cdot \langle I_0 \rangle$	
$l_{01} =$	$l_{02} =$	$l_{03} =$	$l_{04} =$	$l_{05} =$	$\langle I_0 \rangle =$	$\Delta_1 L =$ 5 мкм	$\Delta_2 L =$

де N_i – кількість вимірювань. Результати занесіть до таблиці 1.

9. Відніміть середнє значення величини фону від середніх значень показань лічильника для випадків із препаратом. Заповніть решту таблиці 1.
10. За результатами вимірювань побудуйте графік, як показано на рисунку 4.
11. Визначте коефіцієнт поглинання матеріалу за формулою (10).
12. Знайдіть похибку визначення μ за формулою (11). Врахуйте, що похибка ΔL визначається у відповідності до виразу (13), а похибки I_0, I_ϕ визначаються згідно з виразом (14).
13. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Назвати види радіоактивного випромінювання та пояснити їх фізичну природу.
2. Якими величинами характеризують дію радіоактивного випромінювання на біологічні об’єкти? Дати їх визначення.
3. Записати закон радіоактивного розпаду.
4. Дати визначення активності радіоактивної речовини.
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Навести схеми, за якими відбуваються α - та β -розпади.
7. Перелічити та охарактеризувати види β -розпаду.
8. Охарактеризувати типи випромінювання за рівнем небезпеки для живих організмів.
9. Що таке нульовий фон? Яка його природа?
10. Одержати закон Бугера (9).

На оцінку “відмінно”

11. Одержати закон радіоактивного розпаду (5).
12. Пояснити природу рентгенівського характеристичного випромінювання.
13. Пояснити сутність біологічної дії радіоактивного випромінювання та роль іонізації у цьому процесу.
14. Викласти принцип роботи лічильника Гейгера-Мюллера.
15. Пояснити сутність методу визначення коефіцієнта поглинання у лабораторній роботі.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики: в. 3 т. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.

2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс фізики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике: в 3 т. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 8 т. Том 5. Атомная физика. – М.: Наука, 1980.

Навчальне видання

Лютий Тарас Володимирович,
Денисова Олена Станіславівна

Лабораторний практикум з фізики

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

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки Т. В. Лютого
Редактор Н. В. Лисогуб
Комп'ютерний набір та верстання Т. В. Лютого

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 11,62. Обл.-вид. арк. 10,30. Тираж 100 пр. Зам. №

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

