

А.М. Коструба, В.І. Саварин,  
О.М. Вихрист, Б.М. Яцик

Навчальний посібник

# **Лабораторний практикум з фізики**

для здобувачів вищої освіти  
спеціальності  
181 Харчові технології

Львів  
2023

УДК 53(075.8)

Рекомендовано до друку навчально-методичною радою  
факультету харчових технологій та біотехнології  
Львівського національного університету ветеринарної медицини  
та біотехнологій імені С.З. Гжицького  
Протокол №4 від 26 червня 2023 р.

**Укладачі:** Коструба А.М., Саварин В.І., Вихрист О.М.,  
Яцик Б.М.

**Рецензент:** д.т.н., проф., завідувач кафедри загально-  
технічних дисциплін Львівського національного університету  
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З.Гжицького  
**Ціж Б.Р.**

**Відповідальний за випуск: проф. Коструба А.М.**

**Лабораторний практикум з фізики:** Навчальний посібник.  
Укладачі Коструба А.М., Саварин В.І., Вихрист О.М., Яцик Б.М. –  
Львів, 2023.–134 с.

Навчальний посібник підготовлений на кафедрі фізики і  
математики Львівського національного університету  
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.

У посібнику зібрано і описано основні профілюючі  
лабораторні роботи з усіх розділів фізики, що відповідають  
діючим навчальним програмам.

Вступ знайомить здобувачів вищої освіти з методами  
обробки експериментальних даних. Кожна лабораторна робота  
містить теоретичну частину, опис експериментальної установки  
і методику вимірювань, порядок виконання роботи та запитання  
для самоконтролю.

ISBN

© Коструба А.М., Саварин В.І., Вихрист О.М.,  
Яцик Б.М., 2023

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.	6
I. ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ ТА ПРАВИЛ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ НА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТТЯХ.	7
II. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.	9
§1. Поняття про фізичні величини та загальні правила їх вимірювань.	9
§2. Обчислення та оцінка абсолютних і відносних похибок при одноразових вимірюваннях.	12
§3. Елементи теорії ймовірностей і математичної статистики.	13
§4. Випадкові похибки.	18
§5. Обчислення абсолютних і відносних похибок при непрямих вимірюваннях.	20
§6. Додавання випадкових і систематичних похибок.	23
§7. Визначення похибок при вимірюваннях електровимірювальними приладами.	23
III. МЕХАНІКА. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА.	25
<i>Лабораторна робота №1.</i> Визначення об'єму тіл правильної геометричної форми.	25
<i>Лабораторна робота №2.</i> Вивчення обертального руху твердого тіла за допомогою маятника Обербека.	31

<i>Лабораторна робота №3. Визначення періоду коливань математичного маятника і прискорення сил земного тяжіння.</i>	36
<i>Лабораторна робота №4. Визначення вологості повітря.</i>	40
<i>Лабораторна робота №5. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відливу краплі.</i>	44
<i>Лабораторна робота №6. Визначення коефіцієнта в'язкості рідини і критичної швидкості.</i>	50
<i>Лабораторна робота №7. Визначення модуля Юнга за деформацією прогину.</i>	56
<i>Лабораторна робота №8. Визначення густини молока лактоденсиметром.</i>	61
<b>IV. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ.</b>	66
<i>Лабораторна робота №9. Вимірювання опору провідників за допомогою міста сталого струму.</i>	66
<i>Лабораторна робота №10. Визначення параметрів трансформатора.</i>	72
<i>Лабораторна робота №11. Визначення індуктивного опору соленоїда.</i>	77
<i>Лабораторна робота №12. Визначення параметрів індукційного лічильника енергії змінного струму.</i>	83

V. ОПТИКА. АТОМНА ТА СУБАТОМНА ФІЗИКА.	88
<i>Лабораторна робота №13. Визначення довжини електромагнітної хвилі.</i>	88
<i>Лабораторна робота №14. Визначення збільшення мікроскопа та розмірів клітини.</i>	92
<i>Лабораторна робота №15. Визначення показника заломлення прозорих твердих тіл за допомогою мікроскопа.</i>	97
<i>Лабораторна робота №16. Перевірка закону Малюса.</i>	102
<i>Лабораторна робота №17. Визначення процентного вмісту цукру в розчині глюкози поляриметричним методом.</i>	107
<i>Лабораторна робота №18. Визначення довжини хвилі і енергії кванта випромінювання газового лазера.</i>	114
<i>Лабораторна робота №19. Вивчення взаємодії радіоактивного <math>\beta</math>-випромінювання з речовиною.</i>	120
ДОДАТКИ.	125

## ПЕРЕДМОВА

Фізика є основою усіх природничих наук. Багато законів і положень фізики про основні властивості матерії використовуються в процесі вивчення явищ живого світу. Останні десятиліття характеризуються взаємозближенням фізики і біології, тому виникли такі суміжні дисципліни як фізика з основами біофізики, що вивчають фізичні та фізико-хімічні явища у біологічних об'єктах та досліджують фундаментальні процеси, що становлять основу живої природи.

Процес вивчення фізики, фізики з основами біофізики та біофізики у навчальних закладах сільськогосподарського профілю стаціонарної і заочної форм навчання потребує врахування особливостей об'єктів, що вивчаються (сільськогосподарських тварин). Окрім цього розвиток сучасних технологій у тваринницькому виробництві та виробництві з них продуктів харчування вимагає ефективного використання отриманих теоретичних знань для практичного їх застосування з метою забезпечення максимальної продуктивності та конкурентної здатності харчової промисловості.

Структура практикуму передбачає засвоєння кожним здобувачем вищої освіти сучасної техніки та методів комп'ютерної обробки отриманих експериментально результатів та похибок вимірювань, застосування таблиць і довідкового матеріалу, що поміщений у кінці практикуму, системи Інтернет.

Кожна лабораторна робота має свою назву та пронумерована, висвітлено її практичну доцільність і мету, описано теоретичні відомості, наведено опис застосовуваних приладів, завдання, хід роботи, звітна таблиця і запитання для самоконтролю. Відповіді на контрольні запитання здобувачі вищої освіти зможуть дати, ознайомившись з лабораторною роботою та рекомендованою літературою.

Навчальний посібник рекомендований здобувачам вищої освіти 1-2 курсів, що вивчають дисципліни «Фізика», «Фізика з основами біофізики», «Біофізика» і «Біофізика з основами кваліметрії» та може бути корисним для здобувачів вищої освіти заочної форми навчання.

## **I. ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ ТА ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ НА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТТЯХ**

При виконанні лабораторних робіт необхідно дотримуватись вимог типової інструкції з техніки безпеки при роботі в кабінетах (лабораторіях) кафедри фізики і математики Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.

1. Дотримання вимог інструкції обов'язкове для здобувачів вищої освіти, які працюють у кабінетах (лабораторіях) кафедри фізики і математики Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.

2. Перебування сторонніх осіб у кабінеті під час проведення учбових занять дозволяється тільки з дозволу викладача.

3. Під час роботи у кабінеті здобувачі вищої освіти повинні постійно підтримувати порядок на робочих місцях.

4. Перед виконанням роботи необхідно добре засвоїти (вивчити за підручником або посібником) порядок її проведення. Слід дотримуватись усіх указівок викладача щодо правильного виконання окремих розділів роботи.

5. Категорично забороняється проводити самостійно будь-які досліди, що не передбачені даною роботою та навчальним планом.

6. При проведенні роботи забороняється використовувати прилади, які вийшли з ладу, а також прилади, що не мають прямого відношення до виконуваної роботи. Категорично забороняється користуватись приладами та обладнанням із пошкодженими корпусами, незаземленими та відкритими електроприладами (без захисних кожухів). Умикати в електромережу прилади (обладнання) слід тільки після дозволу викладача і під його наглядом. При використанні конкретного приладу слід дотримуватись правил техніки безпеки при роботі з ним.

7. Категорично забороняється їсти та пити в кабінеті (лабораторії), захаращувати проходи особистими речами (сумками, пакетами тощо), вносити в кабінет (лабораторію) сторонні речі.

8. При травмуванні, а також при поганому самопочутті здобувачі вищої освіти повинні негайно сповістити про це викладача або лаборанта.

9. Прибирання робочих місць опісля закінчення експерименту проводиться у відповідності зі вказівками викладача.

10. При виникненні у кабінеті (лабораторії) під час занять аварійної ситуації (пожежа, сторонні запахи, аварії водогону тощо) не допускати паніки і дотримуватись вказівок викладача.



## II. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

### § 1. Поняття про фізичні величини та загальні правила їх вимірювань

Основні положення і закони фізики безпосередньо пов'язані з експериментом. Як і в будь-якій точній науці, у фізиці результати експериментів характеризуються передусім сукупністю деяких чисел – числових значень фізичних величин. Це ті ж самі числові значення, які входять у математичні формули, що встановлюють зв'язок між фізичними величинами у явищах природи.

Основна мета практикуму – навчити правильно вимірювати фізичні величини і доцільно використовувати їх числові значення у формулах.

Фізична величина характеризує певну особливість фізичного об'єкта (явища), відображає його властивість, стан або процес, що відбувається в ньому і має якісний та кількісний зміст.

Вимірювання – це експериментальне визначення кількісного значення фізичної величини за допомогою спеціальних технічних засобів.

Виміряти фізичну величину – означає порівняти її з однорідною величиною, яка приймається за одиницю вимірювання (одиницю фізичної величини). Вибрати одиницю вимірювання – означає вибрати за одиницю числового значення фізичної величини (кількісний зміст фізичної величини) числове значення фізичної величини еталонного об'єкта. Наприклад, існують еталони довжини та маси – певні тіла, які зберігають у спеціальних умовах. Довжину та масу цих тіл приймають за одиницю. Відповідно одиницю довжини називають метром, а одиницю маси – кілограмом. Одиниці вимірювання можна вибрати довільно, але якщо вони вже вибрані, то повинні залишатись незмінними в межах вибраної системи одиниць.

У міжнародній системі одиниць (СИ), якою ми надалі будемо переважно користуватись, є 7 основних одиниць фізичних величин: метр (м) – довжини, кілограм (кг) – маси, секунда (с) – часу, ампер (А) – сили струму, кельвін (К) –

термодинамічної температури, кандела (кд) – сили світла, моль (моль) – кількості речовини; та дві величини геометричного змісту: радіан (рад) – плоского кута,стерадіан (страд) – тілесного (просторового) кута.

Процес вимірювання складається зі спостереження та виконання математичних операцій з визначення результату вимірювання.

Спостереження – експериментальна операція з метою знаходження значення фізичної величини. Результатом вимірювання є числове значення фізичної величини, тобто визначене число вибраних одиниць вимірювання. Як зазначалося вище, фізична величина має якісний та кількісний зміст. Тому поряд із числовим значенням вказують прийняті одиниці вимірювання. Наприклад, при вимірюванні маси тіла  $m$  визначено, що числове значення цієї фізичної величини становить 1,5 в одиницях маси еталонного тіла (кілограмах). Тоді записують  $m = 1,5$  кг, що означає: маса тіла дорівнює 1,5 кілограма. Одиницю вимірювання, яка вказується поряд із числовим значенням, називають розмірністю фізичної величини.

Розрізняють такі вимірювання:

1. прямі, при яких сигнал, що надходить на вхід засобу вимірювання, містить безпосередню інформацію про саму фізичну величину. Наприклад: вимірювання температури – термометром, тиску – барометром.
2. непрямі, коли значення величини знаходять на основі обчислень за відомими залежностями між цією величиною та величинами, вимірними за допомогою прямих вимірювань (тобто за формулою).
3. спільні, коли вимірюють декілька неоднойменних величин для встановлення залежності між ними. Як правило, результати спільних вимірювань представляють у вигляді графічних залежностей або таблиць.

Чому при вимірюваннях виникає необхідність у математичних операціях (обчисленнях) обробки результатів вимірювань? Тому що провести вимірювання абсолютно точно неможливо – будь-яке вимірювання завжди супроводжується похибкою, зумовленою принциповою неможливістю (через

загальний взаємозв'язок явищ у природі) цілком усунути всі сторонні впливи на процес вимірювання.

*Похибкою результату спостереження (вимірювання) є відхилення результату спостереження (вимірювання)  $x_0$  фізичної величини від її істинного значення  $x$ .*

*При обчисленні розрізняють два види похибок:*

абсолютну – виражається в одиницях вимірюваної величини:

$$\Delta x = |x - x_0| \quad (1.1)$$

і відносну, що виражається у відсотках від значення вимірюваної величини:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} 100\%. \quad (1.2)$$

Обернена до відносної похибки величина  $\psi = \frac{1}{\delta x}$  називається точністю. Через те що будь-яке вимірювання супроводжується похибкою, впливає висновок, що неможливо знайти абсолютно точне істинне значення, але можна вказати, в яких межах, що визначаються похибками вимірювань, воно міститься. Наприклад, розкривши знак модуля у формулі (1.1), отримаємо:

$$x_0 - \Delta x < x < x_0 + \Delta x, \quad (1.3)$$

але *результати вимірювань* замість (1.3) *записують у такому вигляді:*

$$x = x_0 \pm \Delta x. \quad (1.4)$$

Прийнято розрізняти три типи похибок *при вимірюванні*:

1. Систематична похибка. Така похибка є наслідком рівня недосконалості приладів, а також недоліків методики експерименту. При повторенні однакових спостережень ця похибка є сталою або закономірно змінюється. Якщо причина і значення цієї похибки відомі, то її можна позбутися у кінцевому результаті вимірювань введенням відповідних поправок. До систематичних похибок належить похибка вимірюваного приладу, яка визначається його класом точності від 0,05 до 4. Клас точності лежить в межах від 0,05 до 4 і виражає у відсотках систематичну похибку при максимальному значенні показника величини на даному діапазоні вимірювання приладу.

2. Випадкова похибка проявляється у хаотичній зміні результатів повторних спостережень, коли вони відрізняються

один від одного і від істинного значення, як наслідок неконтрольованого впливу багатьох випадкових факторів (навколишнього середовища, людського фактору та ін.).

3. Промахи. Ця похибка є результатом неправильної постановки експерименту, помилок при реєстрації та оцінці даних спостережень. Промахи залежать лише від експериментатора, тому їх цілком можна позбутись. Виявляють промахи при значній відмінності отриманих результатів від решти такого ж типу. При цьому обов'язково слід переконатись, що відмінності викликані саме помилками експериментатора, а не фізичною суттю явища.

У випадку, коли всі систематичні похибки враховані, клас точності вимірювального приладу відомий, і за відсутності суттєвих невідомих джерел систематичних похибок можна сформулювати два правила вимірювання:

1. Якщо систематична похибка значно перевищує випадкову, вимірювання досить провести один раз.
2. Якщо переважають випадкові похибки, вимірювання слід проводити стільки разів, щоб після спеціальної математичної (статистичної) обробки результатів спостережень випадкова похибка була менша за систематичну.

## **§ 2. Обчислення та оцінка абсолютних і відносних похибок при одноразових вимірюваннях**

Точність вимірювання характеризується його похибкою. Абсолютною похибкою вимірювання називають модуль різниці між знайденим у  $i$ -му досліді значенням  $x_i$  та істинним значенням  $x$  фізичної величини. Позначимо похибку вимірювання величини  $x$  символом  $\Delta x_i$ , тоді

$$\Delta x_i = |x_i - x|. \quad (2.1)$$

Крім абсолютної похибки  $\Delta x$  обчислюють відносну похибку  $\delta x$ , яка дорівнює відношенню абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини:

$$\delta x_i = \frac{\Delta x_i}{x} = \frac{|x_i - x|}{x} \quad (2.2)$$

Якість вимірювань найчастіше оцінюють саме відносною похибкою, яку можна виразити у відсотках, –  $\delta x_i \cdot 100\%$ . Наприклад, зрозуміло, що абсолютна похибка в 1 мм при

вимірюванні довжини кімнати не має суттєвого значення, а при визначенні діаметра цвяха є суттєвою. Але відносна похибка в першому випадку становить  $10^{-4}$  (0,01 %), а в другому десять і більше відсотків.

З формул (2.1) та (2.2) випливає, що для обчислення похибок необхідно знайти крім вимірюваного ще й істинне значення фізичної величини. Очевидно, що знаючи істинне значення величини, немає змісту проводити вимірювання. Однак мета вимірювань завжди полягає у тому, щоб дізнатись наперед невідоме значення фізичної величини, а саме істинне значення, або хоч би значення, яке відрізняється від нього на малу величину. Тому у вимірюваннях похибки не обчислюють, а здійснюють їх оцінку.

### § 3. Елементи теорії ймовірностей і математичної статистики

Розглянемо такі поняття, як випробування (дослід, експеримент) і подія.

Випробуванням називається здійснення певного комплексу умов, до яких належить методика проведення дослідів при його конкретному технічному забезпеченні, при яких проводять спостереження фізичного явища або фізичної величини.

Подією називається результат випробування. Події позначають великими літерами латинського алфавіту  $A, B, C, \dots$ . Наприклад, подія  $A = \{\text{при першому вимірюванні (випробуванні) отримане значення коефіцієнта в'язкості рідини } x_1\}$ . Очевидно, через наявність розглянутих вище похибок ця подія є випадковою. Закономірності реалізації випадкових подій виявляють при багаторазових випробуваннях.

Нехай випадкова подія  $A$  реалізувалася в  $n_A$  випробуваннях при загальній кількості  $n$  випробувань. Число  $n_A$  називають частотою, а відношення  $\frac{n_A}{n}$  відносною частотою  $W_A$  ( $W_A = \frac{n_A}{n}$ ) події  $A$  в даній серії випробувань. Відносна частота залежить від випадкових обставин, що супроводжують випробування. Якщо розглянути різні серії випробувань, то при значних кількостях випробувань відносні частоти будуть близькими за числовими значеннями. Розглянемо неможливу

подію  $B$ , тобто таку, яка не може відбутися при випробуванні, а також достеменно подію  $C$ , яка обов'язково відбувається при випробуванні. Очевидно, в першому випадку  $W_A = 0$ , а  $W_C = 1$ .

Чисельну міру можливості реалізації випадкової події називають ймовірністю випадкової події. Сформулюємо статистичне означення ймовірності випадкової події: ймовірність випадкової події  $A$  це границя відносної частоти цієї події при необмеженому збільшенні числа випробувань.

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n}. \quad (3.1)$$

У теорії ймовірностей неоднозначні наслідки випробувань, а саме отримані в результаті випробувань числові значення вимірюваних величин, називають випадковими величинами. Випадкові величини поділяють на дискретні та неперервні. Дискретна величина має скінченну кількість можливих значень (наприклад, відносна вологість повітря, виміряна з точністю до одного відсотка). Неперервна випадкова величина може набувати числових значень з інтервалу на числовій осі. Прикладом неперервних величин є висота стовпчика ртуті у термометрі при дослідженні температури тіла при його нагріванні чи охолодженні. Випадкові величини вивчають на основі закону розподілу - відповідності, яка встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини та їх ймовірностями.

Для дискретної випадкової величини  $X$  закон розподілу записують у вигляді таблиці

$X$	$x_1$	$x_2$	...	$x_i$	...	$x_n$
$P$	$p_1$	$p_2$	...	$p_i$	...	$p_n$

де  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – можливі значення величини  $X$ ;  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – відповідні ймовірності для цих значень, тобто  $p_i = P(X = x_i)$  – ймовірність того, що випадкова величина  $X$  при випробуванні набуде значення  $x_i$ .

Для неперервної випадкової величини  $X$  закон розподілу задають у вигляді функції розподілу  $F(x)$ , яка дорівнює ймовірності такої події, коли випадкова величина набуває значення, меншого від  $x$ :

$$F(x) = P(X < x). \quad (3.2)$$

Похідну функції розподілу називають функцією щільності розподілу ймовірностей:

$$f(x) = F'(x). \quad (3.3)$$

Властивості випадкових величин визначають такі числові характеристики розподілу (зірочкою позначені формули обчислення числових характеристик для неперервних випадкових величин, які набувають значень на інтервалі  $(a; b)$ ; решта формул стосуються дискретних випадкових величини):

Математичне сподівання:

$$M(X) = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (3.4)$$

або

$$M(X) = \int_a^b x f(x) dx; \quad (3.4)$$

дисперсія:

$$D(X) = M(X - M(X))^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - M(X))^2 p_i \quad (3.5)$$

чи

$$D(X) = \int_a^b (x - M(X))^2 f(x) dx; \quad (3.5)$$

середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}. \quad (3.6)$$

Математичне сподівання є «усередненим» значенням випадкової величини, а дисперсія та середньоквадратичне відхилення є мірою відхилення можливих значень випадкової величини від математичного сподівання.

Нехай потрібно дослідити певну кількість однорідних об'єктів, сукупність яких називають генеральною сукупністю.

Всі об'єкти неможливо дослідити через низку можливих причин: 1) дослідження всіх об'єктів вимагає значних матеріальних витрат; 2) при дослідженні об'єкти знищуються, наприклад, щоб визначити пружні властивості кістки тварини, її необхідно забити. Тому для дослідження вибирають (випадковим

чином) обмежене число  $n$  об'єктів з генеральної сукупності, а множина цих об'єктів називається вибіркою об'ємом  $n$ . Далі складають статистичний ряд розподілу випадкової величини – таблицю значень випадкової величини  $x_i$  з відповідними їм частотами  $n_i$  або відносними частотами  $\frac{n_i}{n}$ . Нехай складена вибірка об'ємом  $n$  і зафіксовано значення випадкової величини  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Побудуємо статистичний ряд розподілу:

$x_i$	$x_1$	$x_2$	...	$x_i$	...	$x_k$
$n_i$	$n_1$	$n_2$	...	$n_i$	...	$n_k$

Якщо досліджують неперервну випадкову величину, то інтервал її значень  $(a; b)$  розбивають на  $k$  інтервалів однакової довжини, у таблиці співвідношення  $x_i - n_i$  означає, що випадкова величина набувала значень на  $i$ -тому інтервалі в  $n_i$  випробуваннях.

Для оцінки властивостей випадкової величини обчислюються вибіркові числові характеристики:

Вибіркова середня:

$$\bar{X}_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i n_i; \quad (3.7)$$

вибіркова дисперсія:

$$D_b = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X}_b)^2 n_i; \quad (3.8)$$

виправлена дисперсія:

$$S^2 = \frac{n}{n-1} D_b; \quad (3.10)$$

вибіркове середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_b = \sqrt{D_b}; \quad (3.11)$$

виправлене вибіркове середнє квадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{S^2}.$$

Очевидно, що вказані величини є наближеними значеннями відповідних числових характеристик випадкової величини (формули (3.4) – (3.6)). Різниця між відповідними значеннями зменшується зі зростанням об'єму вибірки і, очевидно, що значення будуть однакові, якщо будуть досліджені всі об'єкти генеральної сукупності, тобто формально їх кількість співпадає з об'ємом вибірки.



Зазначимо, що величина  $S^2$  використовується замість  $D_b$  та відповідно  $S$  замість  $\sigma_b$  тільки при малих вибірках ( $n < 30$ ), а при великих вибірках ( $n > 30$ ) величини  $S^2$  і  $D_b$ ,  $S$  і  $\sigma_b$  практично збігаються.

Дуже часто випадкові величини у ветеринарії та при фізичних вимірюваннях мають нормальний закон розподілу. Для цих величин характерним є те, що причиною набуття певного числового значення (тобто того, що в результаті вимірювання вони отримали конкретне числове значення) є кілька факторів впливу на цю подію, причому серед них немає суттєво переважного. Кажуть, що випадкова величина  $X$  має нормальний закон розподілу, якщо її функція щільності ймовірностей має такий вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.12)$$

де  $\sigma$  і  $a$  - параметри розподілу ( $\sigma = \sigma(X)$ ;  $a = M(X)$ ).

Наведемо необхідні для практичного використання формули теорії ймовірностей та математичної статистики.

1. Ймовірність того, що нормально розподілена випадкова величина набуде значення на інтервалі  $(\alpha; \beta)$ , обчислюється за формулою:

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - a}{\sigma}\right), \quad (3.13)$$

де  $\Phi(x)$  – функція Лапласа.

2. Ймовірність  $\gamma$  того, що відхилення вибіркової середньої випадкової величини від її математичного сподівання не перевищує  $\delta$ , дорівнює:

$$\gamma = P(|\bar{X}_b - M(X)| < \delta) = 2\Phi\left(\frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma(X)}\right). \quad (3.14)$$

Ймовірність  $\gamma$  називається надійністю. Ввівши позначення  $t = \frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma(X)}$  (тоді  $\delta = \frac{t\sigma(X)}{\sqrt{n}}$ ), на основі (3.13) запишемо

$$P\left(|\bar{X}_b - M(X)| < \frac{t\sigma(X)}{\sqrt{n}}\right) = \gamma = 2\Phi(t), \quad (3.15)$$

Звідси за заданим значенням надійності  $\gamma$  можна знайти  $\delta$ , користуючись таблицею функції Лапласа  $\Phi(x)$ .

*Зауваження 1.* Для малих вибірок ( $n < 30$ ) використовують формулу

$$P\left(|\bar{X}_b - M(X)| < \frac{t_\gamma S}{\sqrt{n}}\right) = \gamma, \quad (3.16)$$

де для знаходження коефіцієнта Стьюдента  $\gamma(n, t_\gamma) = \gamma$  за заданим значенням  $\gamma$  (чи навпаки) використовується  $t$ -розподіл Стьюдента з  $n - 1$  ступенями вільності –  $\gamma(n, t_\gamma) = \gamma$ .

*Зауваження 2.* Якщо у формулі (3.13) нерівності  $|\bar{X}_b - M(X)| < \delta$  розкрити знак модуля, то отримаємо

$$\bar{X}_b - \delta < M(X) < \bar{X}_b + \delta,$$

тобто обчислена величина  $M(X)$  перебуває в інтервалі  $(\bar{X}_b - \delta; \bar{X}_b + \delta)$ , який називають надійним інтервалом.

Користуючись формулами (3.14) - (3.16), можна знайти надійний інтервал за заданою надійністю  $\gamma$  та числом  $n$ , або знайти об'єм вибірки  $n$  (необхідне число випробувань), щоб вибіркоче середнє потрапляло в заданий надійний інтервал із заданою надійністю.

#### § 4. Випадкові похибки

Будемо вважати, що систематичні похибки достатньо малі, щоб ними можна було знехтувати, а суттєвими є випадкові.

Розглянемо дані, отримані при вимірюванні температури тіла, до якої воно нагрівається в результаті механічного тертя (проведено 10 однакових дослідів):

№ дослідів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура, °C	40	39	41	40	42	40	39	38	39	40

Замість одного потрібного нам результату ми отримали десять, тому виникає питання: яке ж значення температури є найближчим до істинного і як оцінити похибку отриманого результату за формулою (1.4)?

Значення фізичної величини, отримане в результаті вимірювання, яке настільки близьке до істинного, що може використовуватись замість нього, називається дійсним значенням, а саме  $x_0$  у формулі (1.1). Очевидно, що виміряна

фізична величина є випадковою величиною. Тому найбільш імовірним значенням буде середнє арифметичне всіх результатів вимірювань (згідно з формулою (3.7) при  $n_i = 1$ ), яке можна прийняти за дійсне значення  $x_0 = x_{ca}$ :

$$x_{ca} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (4.1)$$

де  $n$  – кількість дослідів;  $x_i$  – виміряне значення в  $i$ -тому досліді.

Для наведеного прикладу отримаємо:  $x_{ca} = 39,8$  °C.

Існують різні способи оцінки абсолютної та відносної похибок (як для окремого вимірювання, так і для середнього арифметичного серії вимірювань). Для кожного окремого вимірювання обчислюють похибки за формулами (2.1) і (2.2), де замість  $x$  використовують значення  $x_{ca}$ , тобто дійсне значення. Середня абсолютна похибка серії (багаторазових) вимірювань обчислюється за формулою

$$\Delta x = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad (4.2)$$

а для нашого прикладу отримаємо  $\Delta x = 1,74$  °C. Тоді результат досліді згідно з (1.4) запишеться:  $x = (39,8 \pm 1,74)$  °C.

За формулою (3.6) обчислюють середню квадратичну похибку  $\sigma_x$  результату вимірювання:

$$\sigma_x = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}, \quad (4.3)$$

якій відповідає середнє квадратичне відхилення  $\sigma_b$  відповідно до (3.11). В нашому випадку  $\sigma_x = 1,16$  °C.

Результат досліді записують у такому вигляді:

$$x = (x_{ca} \pm \sigma_x) \text{ од. вим.} \quad (4.4)$$

Для розглянутої таблиці дослідних даних значення фізичної величини  $x$  записують, як  $x = (39,8 \pm 1,16)$  °C.

Проаналізуємо формули (4.1) і (4.3). Очевидно, що результат при правильній методиці досліді близький до істинного значення і в різних незалежних серіях вимірювань (випробувань) має незначні випадкові відхилення. Зі збільшенням числа дослідів середнє значення більше наближається до істинного.

Зауважимо, що вирази (4.3) і (4.4) слід використовувати при значній кількості вимірювань – кілька десятків, сотень і т.д., тобто лише у випадках практичних досліджень, що потребують особливої точності при визначенні значень величини. Тому при виконанні робіт у фізичному практикумі, де виконується незначна кількість вимірювань, рекомендується обчислювати абсолютні похибки за формулою (4.2).

### § 5. Обчислення абсолютних і відносних похибок при непрямим вимірюваннях

Часто фізичну величину  $x$  неможливо виміряти безпосередньо і її знаходять непрямим вимірюванням, тобто за результатами прямих вимірювань інших величин  $a, b, c, \dots$ , обчислюючи значення  $x$  як функцію цих величин

$$x = f(a, b, c, \dots). \quad (5.1)$$

Наприклад, потужність постійного струму обчислюється як добуток  $P = IU$ , де величини  $I$  та  $U$  вимірюють амперметром та вольтметром. Період коливань, що виникають у електричному коливальному контурі, знаходять за формулою  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ , де  $L$  – виміряне значення індуктивності, а  $C$  – виміряне значення ємності.

У цих випадках необхідно вміти обчислювати похибки при визначенні шуканої величини, якщо відомі похибки величин, які визначаються прямим вимірюванням і функцією яких є шукана величина. Згідно з положеннями попереднього параграфа результати прямих вимірювань можна записати таким чином:

$$a = a_0 \pm \Delta a_0; \quad b = b_0 \pm \Delta b_0; \quad \dots \quad (5.2)$$

Тоді шукану величину теж слід записати у вигляді

$$x = x_0 \pm \Delta x_0, \quad (5.3)$$

де  $x_0$  – середнє значення  $x$ , яке знаходять за формулою (5.1):

$$x_0 = f(a_0, b_0, c_0, \dots), \quad (5.4)$$

а  $\Delta x_0$  – середнє значення абсолютної похибки, яке виражається через величини  $a_0, b_0, c_0, \dots$  та їх похибки  $\Delta a_0, \Delta b_0, \Delta c_0, \dots$  опосередковано через функцію  $f$ . Очевидно, що похибка непрямого вимірювання залежить від функціональної залежності (5.1).

Розглянемо найпростіші випадки залежності (5.1). Нехай шукана величина дорівнює сумі двох величин, які визначаються прямим вимірюванням. Тобто:

$$x = a + b, \quad (5.5)$$

тоді згідно з (5.4)  $x_0 = a_0 + b_0$ , а враховуючи (5.3), отримаємо  $\Delta x_0 = \Delta a_0 + \Delta b_0$ , тобто похибку суми.

Виведемо формулу обчислення похибки добутку:

$$\begin{aligned} x &= ab = (a_0 \pm \Delta a_0) \cdot (b_0 \pm \Delta b_0) = \\ &= a_0 b_0 \pm a_0 \Delta b_0 \pm \Delta a_0 b_0 \pm \Delta a_0 \Delta b_0. \end{aligned} \quad (5.6)$$

У рівності (5.6) величиною добутку малих порівняно з  $a_0$  і  $b_0$  величин  $\Delta a_0 \Delta b_0$  ( $\Delta a_0 \ll a_0$ ,  $\Delta b_0 \ll b_0$ ) можна знехтувати як дуже малою. Таким чином, отримуємо похибку добутку

$$\Delta x_0 = a_0 \Delta b_0 \pm \Delta a_0 b_0. \quad (5.7)$$

Враховуючи, що відносна похибка шуканої величини виражається рівністю

$$\delta x_0 = \frac{\Delta x_0}{x_0} \cdot 100\%, \quad (5.8)$$

і користуючись результатами попередніх обчислень абсолютних похибок, знайдемо відносну похибку суми:

$$\delta x_0 = \frac{\Delta a_0 + \Delta b_0}{a_0 + b_0} \cdot 100\%, \quad (5.9)$$

та відносну похибку добутку:

$$\begin{aligned} \delta x_0 &= \frac{a_0 \Delta b_0 \pm \Delta a_0 b_0}{a_0 \cdot b_0} \cdot 100\% = \left( \frac{\Delta a_0}{a_0} + \frac{\Delta b_0}{b_0} \right) \cdot 100\% = \\ &= \delta a_0 + \delta b_0. \end{aligned} \quad (5.10)$$

З останньої рівності випливає висновок, що відносна похибка добутку дорівнює сумі відносних похибок множників.

Зазначимо, що для виведення формул обчислення похибок для різних видів функціональної залежності (5.1) зручно використовувати метод диференціального числення. Диференціал функції  $y = f(x)$  обчислюється як добуток похідної функції та приросту аргумента  $\Delta x$ :

$$dy = y' \cdot \Delta x. \quad (5.11)$$

Для малих значень  $\Delta x$  можна вважати, що приріст функції обчислюється за формулою

$$\Delta y = y' \cdot \Delta x. \quad (5.12)$$

Цю формулу використовують при складних функціональних залежностях типу  $x = a^n$ . Отже, згідно з (5.12):

$$\Delta x_0 = (a_0^n)' \cdot \Delta a_0 = n \cdot a_0^{n-1} \cdot \Delta a_0. \quad (5.13)$$

На основі наведених вище методів обчислень розрахована таблиця формул для обчислення похибок.

№ з.п.	Функціональна залежність	Похибка	
		Середня абсолютна	Середня відносна
1	$x = a + b$	$\Delta x_0 = \pm(\Delta a_0 + \Delta b_0)$	$\delta x_0 = \frac{\Delta a_0 + \Delta b_0}{a_0 + b_0} \cdot 100\%$
2	$x = a - b$	$\Delta x_0 = \pm(\Delta a_0 + \Delta b_0)$	$\delta x_0 = \frac{\Delta a_0 + \Delta b_0}{a_0 + b_0} \cdot 100\%$
3	$x = a \cdot b$	$\Delta x_0 = \pm(a_0 \Delta b_0 + \Delta a_0 b_0)$	$\delta x_0 = \delta a_0 + \delta b_0$
4	$x = \frac{a}{b}$	$\Delta x_0 = \pm \left( \frac{a_0 \Delta b_0 + \Delta a_0 b_0}{b_0^2} \right)$	$\delta x_0 = \delta a_0 + \delta b_0$
5	$x = a^n$	$\Delta x_0 = \pm(n \cdot a_0^{n-1} \cdot \Delta a_0)$	$\delta x_0 = n \delta a_0$
6	$x = \sqrt[n]{a} = a^{1/n}$	$\Delta x_0 = \pm \left( \frac{1}{n} a_0^{(1/n)-1} \cdot \Delta a_0 \right)$	$\delta x_0 = \frac{1}{n} \delta a_0$
7	$x = \sin \alpha$	$\Delta x_0 = \pm \cos \alpha_0 \cdot \Delta \alpha_0$	$\delta x_0 = \operatorname{ctg} \alpha_0 \cdot \Delta \alpha_0 \cdot 100\%$
8	$x = \operatorname{tg} \alpha$	$\Delta x_0 = \pm \frac{\Delta \alpha_0}{\cos^2 \alpha_0}$	$\delta x_0 = \frac{2 \cdot \Delta \alpha_0}{\sin 2\alpha_0} \cdot 100\%$
9	$x = \operatorname{ctg} \alpha$	$\Delta x_0 = \pm \frac{\Delta \alpha_0}{\sin^2 \alpha_0}$	$\delta x_0 = \frac{2 \cdot \Delta \alpha_0}{\sin 2\alpha_0} \cdot 100\%$
10	$x = \cos \alpha$	$\Delta x_0 = \pm \sin \alpha_0 \cdot \Delta \alpha_0$	$\delta x_0 = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \Delta \alpha_0 \cdot 100\%$
11	$x = \sqrt{a \cdot b}$	$\Delta x_0 = \pm \left( \frac{a_0 \Delta b_0 + \Delta a_0 b_0}{2\sqrt{a_0 \cdot b_0}} \right)$	$\delta x_0 = \frac{1}{2}(\delta a_0 + \delta b_0)$

## § 6. Додавання випадкових і систематичних похибок

Як правило, в експериментах наявні як систематичні, так і випадкові похибки. Нехай вони характеризуються відповідно стандартними похибками  $\sigma_c$  та  $\sigma_b$ . Тоді сумарну повну похибку  $\sigma_n$  знаходять за формулою

$$\sigma_n^2 = \sigma_c^2 + \sigma_b^2. \quad (6.1)$$

Ця формула показує, що за наявності систематичної та випадкової похибок повна похибка експерименту більша, ніж кожна з них, взятих окремо, що цілком природно.

Звернемо увагу на важливу особливість формули (6.1). Наприклад, якщо одна з похибок удвічі більша за іншу ( $\sigma_c = 2\sigma_b$ ), тоді отримаємо:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_b^2} = \sqrt{\sigma_c^2 + \left(\frac{1}{2}\sigma_c\right)^2} = \sqrt{\frac{5}{4}}\sigma_c = 1,12\sigma_c. \quad (6.2)$$

Тому в (6.2) з достатньою точністю можна прийняти  $\sigma_n = \sigma_c$ . Таким чином, менша похибка майже не впливає на результат, якщо вона становить хоч би половину від більшої.

Цей висновок дуже важливий. У випадку, якщо випадкова похибка дослідів хоч би вдвічі менша від систематичної, немає змісту проводити багато вимірювань, бо повна похибка дослідів при цьому не зменшується. Тоді вимірювання досить провести двічі-тричі, щоб пересвідчитись, що випадкова похибка дійсно мала.

## § 7. Визначення похибок при вимірюваннях електровимірювальними приладами

Для характеристики точності електровимірювальних приладів здебільшого користуються зведеною похибкою  $\delta\alpha_{зв}$ . Зведеною похибкою називається відношення абсолютної похибки до граничного значення вимірюваної величини  $\alpha_{зр}$ , тобто до найбільшого її значення, яке може бути виміряне за шкалою приладу на даному діапазоні:

$$\delta\alpha_{зв} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{зр}} \cdot 100\%. \quad (7.1)$$

За зведену похибку приладу з двобічною шкалою (нуль посередині) приймається похибка, яка дорівнює відношенню

абсолютної похибки до суми верхньої і нижньої границь вимірювання. Необхідність введення зведеної похибки пояснюється тим, що навіть при незмінності абсолютної похибки по всій шкалі приладу відносна похибка в міру зменшення значень вимірюваної величини не залишається сталою, а збільшується.

Точність електровимірювальних приладів є їх головною характеристикою і лежить в основі поділу приладів на класи. Відповідно до державного стандарту за ступенем точності вимірювання електровимірювальні прилади поділяються на вісім класів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Показник класу визначає зведену похибку вимірювання у відсотках. Абсолютна похибка визначається таким чином:

$$\Delta\alpha = \frac{\delta\alpha_{зв}\alpha_{зр}}{100\%}. \quad (7.2)$$

Наприклад, міліамперметр класу 1,0 зі шкалою 100 мА дає в будь-якому місці шкали абсолютну похибку

$$\Delta I = \pm \frac{1,0 \cdot 100}{100} = \pm 1,0 \text{ (мА)}. \quad (7.3)$$

Прилади класів 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 застосовують для точних лабораторних вимірювань і називають прецизійними. У техніці використовують менш точні прилади класів 1,0; 1,5; 2,5 і 4,0 (технічні). Клас приладу зазначається на його лицьовій панелі.



### ІІІ. МЕХАНІКА. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА

*Лабораторна робота №1.*

**Тема:** Визначення об'єму тіл правильної  
геометричної форми

**Мета роботи:** навчитися проводити практичні вимірювання розмірів тіл за допомогою штангенциркуля і мікрометра, оволодіти методами наближених обчислень і визначення похибок.

**Матеріали та обладнання:** штангенциркуль, мікрометр, набір тіл правильної геометричної форми.

#### *І. Теоретичні відомості*

Об'єм тіл правильної геометричної форми визначається зняттям вимірів за допомогою вимірювальних приладів. Отримані результати вимірювань підставляються у формули об'єму. Наприклад, для паралелепіпеда такою формулою є добуток довжин його ребер:  $V = abc$  (рис.1), для циліндра – добуток площі його основи на висоту:  $V = \frac{\pi d^2}{4} h$  (рис.2,  $\pi \approx 3,14$ ).

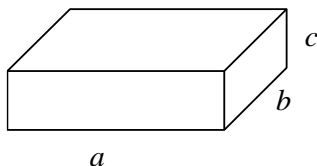


Рис. 1

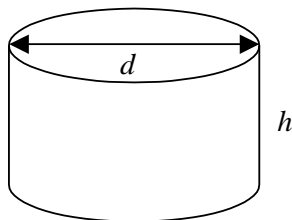


Рис. 2

#### *ІІ. Опис приладів та методика вимірювання*

Для визначення лінійних розмірів найчастіше користуються масштабною лінійкою з міліметровими

позначками, за допомогою якої можна визначати лінійні розміри тіла з точністю  $\pm 0,5$  мм. Для забезпечення вищої точності вимірювання (0,1; 0,05; 0,02 мм) користуються штангенциркулем і мікрометром. Одним із найважливіших конструктивних елементів цих приладів є відповідно ноніус і мікрометричний гвинт.

*Ноніусом* називають допоміжну лінійку, яку застосовують разом із масштабною лінійкою для відлічування десятих, двадцятих або п'ятдесятих часток міліметра. Якщо ноніус призначений для вимірювання десятих часток міліметра, то на ньому віддаль 9 або 19 мм поділяють на 10 рівних частин (рис.3). Тут відстань між поділками становить 0,9 або 1,9 мм. Отже, різниця між однією поділкою лінійки і поділкою ноніуса становить 0,1 мм. Це число називається *точністю ноніуса*. Оскільки точність вимірювання визначається точністю ноніуса, то в цьому випадку вона дорівнює 0,1 мм.

Шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,05 мм має 20 однакових поділок на довжині 19 мм (рис.4). Позначка цього ноніуса, яка збігається з однією з поділок основної шкали, показує число двадцятих частин міліметра. Для визначення лінійного розміру тіла зафіксуємо цілу кількість поділок масштабної лінійки (її вказує нульова позначка шкали ноніуса). Для визначення часток міліметра знаходимо на шкалі ноніуса ту позначку, яка найкраще збігається з будь-якою поділкою основної лінійки, і визначаємо лінійний розмір тіла за формулою

$$L = (m + 0,05k) \text{ мм}, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість цілих поділок масштабної лінійки;  $k$  – номер позначки ноніусної шкали, яка найкраще збігається з якоюсь поділкою масштабної лінійки.

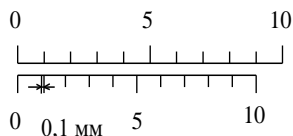


Рис. 3

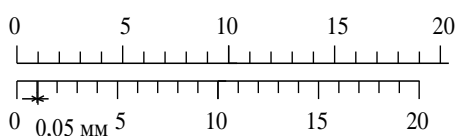


Рис. 4

Штангенциркуль (рис.5) складається з металевої масштабної лінійки 1, на якій нанесено поділки в міліметрах, нерухомого 2 та рухомого 3 виступів. В обоймі 4 рухомого

виступу 3 є вікно, на зрізі якого нанесена шкала ноніуса 5. Для закріплення обойми в фіксованому положенні використовується гвинт 6.

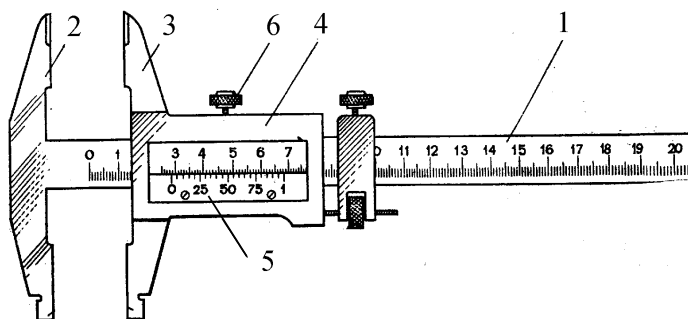


Рис. 5

Вимірювання за допомогою штангенциркуля здійснюються в такій послідовності:

1. Вставляють вимірювану деталь між нерухомим 2 та рухомим 3 виступами, переміщуючи при цьому обойму 4 з ноніусом так, щоб деталь була легко затиснута між виступами.
2. За основною шкалою визначають ціле число міліметрів. Воно дорівнює кількості поділок основної шкали, які розміщені зліва від нульового штриха ноніуса. Наприклад, якщо «0» шкали ноніуса міститься між  $m$  та  $m + 1$  поділкою міліметрової масштабної шкали, то ціле число міліметрів становить  $m$ .
3. Визначають число часток міліметра  $\Delta L$ . Згідно з формулою (1), вона дорівнює добутку точності ноніуса  $\Delta \alpha$  (0,05 мм) на номер  $k$  тієї поділки ноніуса, що найточніше збігається зі штрихом основної шкали:

$$\Delta L = k \cdot 0,05 \text{ мм.} \quad (2)$$

4. Точність ноніуса  $\Delta \alpha$  визначають, знаючи число поділок ноніуса та ціну поділки основної шкали:  $\Delta \alpha = \frac{1}{n}$  мм.
5. Вимірювану довжину  $L$  знаходять, додаючи цілі й дробові частини міліметра (див. формулу (1)).

Мікрометр (рис.6) складається зі сталюї скоби 1, на одному кінці якої розташована опорна п'ята 2, а на іншому – циліндрична трубка 3. Всередині трубки по різьбі переміщується

мікрометричний гвинт із кроком 0,5 мм, що має вимірювальну поверхню 4. До гвинта прикріплений барабан 5, по краю якого нанесено кругову шкалу, що має 50 однакових поділок. Уздовж внутрішньої трубки 3 нанесена риска, по обидва боки від якої є дві міліметрові шкали, зміщені одна відносно одної на 0,5 мм. При одному повному оберті зріз барабана і відповідно вимірювальна поверхня 4 переміщуються на 0,5 мм. Очевидно, що ціна поділки шкали барабана мікрометричного гвинта становить 0,01 мм.

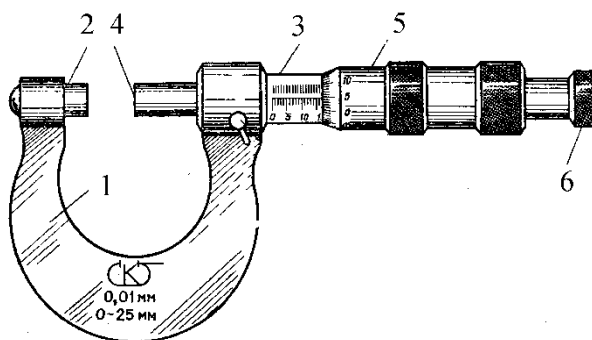


Рис. 6

Вимірювання за допомогою мікрометра виконують у такій послідовності:

1. Один кінець предмета прикладають до опорної п'яти 2, за допомогою спеціального пристрою 6 (т. зв. тріскачки) повертають гвинт доти, доки він не торкнеться іншого кінця предмета (при цьому чути характерний тріск).

2. Визначають число цілих і півцілих міліметрів, які відсікає край барабана.

3. Визначають число сотих часток міліметра. Для цього число, що стоїть навпроти поздовжньої риски, множать на 0,01.

4. Отримані значення цілих, півцілих і сотих часток міліметра додають і знаходять вимірювану довжину предмета.

### ***III. Порядок виконання роботи***

1. Визначити число поділок  $n$  ноніусної шкали й обчислити похибку ноніуса  $\Delta\alpha$ .

- Штангенциркулем виміряти довжину  $a$ , ширину  $b$  та товщину  $c$  паралелепіпеда. Повторити вимірювання величин  $a, b, c$  п'ять разів і знайти їх середні значення  $a_0, b_0, c_0$ .

- Обчислити об'єм паралелепіпеда за формулою

$$V = a_0 b_0 c_0. \quad (3)$$

- Обчислити абсолютні похибки  $\Delta a_i, \Delta b_i, \Delta c_i$  та середні абсолютні похибки  $\Delta a_0, \Delta b_0, \Delta c_0$ .

- Розрахувати відносну похибку об'єму паралелепіпеда за формулою

$$\delta V_0 = \left( \frac{\Delta a_0}{a_0} + \frac{\Delta b_0}{b_0} + \frac{\Delta c_0}{c_0} \right) \cdot 100 \%. \quad (4)$$

- Обчислити середню абсолютну похибку об'єму паралелепіпеда:

$$\Delta V_0 = \frac{\delta V_0 \cdot V_0}{100\%}. \quad (5)$$

- Мікрометром виміряти діаметр основи  $d$  та висоту  $h$  циліндра. Виміри повторити п'ять разів і знайти середні значення  $d_0$  та  $h_0$ .

- Обчислити об'єм циліндра за формулою

$$V_0 = \left( \frac{\pi_0 d_0^2}{4} \right) h_0. \quad (6)$$

- Обчислити абсолютні похибки  $\Delta d_i, \Delta h_i$  та середні абсолютні похибки  $\Delta d_0, \Delta h_0$ .

- Розрахувати відносну похибку об'єму циліндра за формулою:

$$\delta V_0 = \left( \frac{\Delta \pi_0}{\pi_0} + 2 \frac{\Delta d_0}{d_0} + \frac{\Delta h_0}{h_0} \right) \cdot 100 \%. \quad (7)$$

- Обчислити середню абсолютну похибку об'єму циліндра:

$$\Delta V_0 = \frac{\delta V_0 \cdot V_0}{100\%}. \quad (8)$$

- Записати остаточні результати вимірювання об'єму для паралелепіпеда та циліндра у вигляді

$$V = (V_0 \pm \Delta V_0) \text{ мм}^3 \text{ при } \delta V_0 = \dots \%. \quad (9)$$

- Результати вимірювань і обчислень записати у звітну таблицю.

#### **IV. Контрольні питання**

- Що таке ноніус і яка його будова?
- Які типи ноніусів найчастіше використовуються на практиці?

3. Яка будова ноніуса для вимірювання з похибкою  $\pm 0,05$  мм?
4. Яка будова штангенциркуля?
5. Яка будова мікрометра?
6. Опишіть методику вимірювань за допомогою штангенциркуля.
7. Опишіть методику вимірювань за допомогою мікрометра.
8. Записати формули для визначення об'єму паралелепіпеда і циліндра.
9. Записати формули для визначення абсолютної та відносної похибки об'ємів паралелепіпеда і циліндра.
10. Що означає запис результатів вимірювання у вигляді:  $V = V_0 \pm \Delta V_0$ ?

Звітні таблиці

Для паралелепіпеда

№ з.п.	$a$ , мм	$\Delta a$ , мм	$b$ , мм	$\Delta b$ , мм	$c$ , мм	$\Delta c$ , мм	$V$ , мм <sup>3</sup>	$\Delta V$ , мм <sup>3</sup>	$\delta V$ , %
1									
2									
3									
4									
5									
сер.									

Для циліндра

№ з.п.	$d$ , мм	$\Delta d$ , мм	$h$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\pi$	$\Delta \pi$	$V$ , мм <sup>3</sup>	$\Delta V$ , мм <sup>3</sup>	$\delta V$ , %
1									
2									
3									
4									
5									
сер.					3,14	0,005			

## Лабораторна робота №2

### Тема: Вивчення обертального руху твердого тіла за допомогою маятника Обербека

**Мета роботи:** навчитися визначати момент інерції твердого тіла відносно нерухомої осі обертання.

**Матеріали та обладнання:** маятник Обербека, секундомір.

#### 1. Теоретичні відомості

Рівняння обертального руху навколо нерухомої осі (другий закон Ньютона для обертального руху) має такий вигляд:

$$M = I \cdot \beta, \quad (1)$$

де  $M$  – результуючий момент сил обертання, які діють на тіло [Н·м];  $I$  – момент інерції тіла навколо нерухомої осі;  $\beta$  – кутове прискорення.

Момент інерції матеріальної точки, що обертається на віддалі  $R$  відносно нерухомої осі, дорівнює добутку маси  $m$  цього тіла на квадрат віддалі  $R$  від нерухомої осі до матеріальної точки:

$$I = mR^2. \quad (2)$$

Одиниці вимірювання - кг · м<sup>2</sup>.

Момент інерції твердого тіла відносно нерухомої осі обертання визначається як сума моментів інерції всіх його матеріальних точок відносно цієї осі:

$$I = \sum_i m_i R_i^2. \quad (3)$$

Отже, момент інерції твердого тіла відносно нерухомої осі обертання визначається просторовим розподілом матеріальних точок – геометрією мас. Наведемо приклади моментів інерції однорідних тіл різної геометричної форми відносно їх осей симетрії:

- момент інерції тонкостінного кільця (обруча) радіуса  $R$ :

$$I = mR^2; \quad (4)$$

- момент інерції диска (циліндра) радіуса  $R$ :

$$I = \frac{1}{2} mR^2; \quad (5)$$

- момент інерції кулі радіуса  $R$ :

$$I = \frac{2}{5} mR^2. \quad (6)$$

Залежність моменту інерції від  $R$  можна визначити за допомогою маятника Обербека.

### II. Опис приладів і методика вимірювання

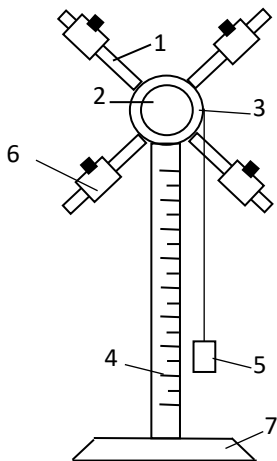


Рис. 1

Маятник Обербека (рис.1) складається з чотирьох однорідних стержнів 1, закручених у втулку 2. На втулку насаджений шків для намотування нитки. Один кінець нитки прикріплений до шківів 3, інший – до гири 5. Стержні 1 розташовані взаємно перпендикулярно, утворюючи хрестовину. На стержнях хрестовини закріплені тягарці 6 у формі циліндрів однакової маси. Втулка зі шківом 3 обертається навколо нерухокої горизонтальної осі. До стояка, що з'єднує втулку 2 та підставку 7, прикріплено вертикальну шкалу 4 завдовжки 1,5 м. Під дією ваги гири 5

нитка розмотується, вантаж опускається з прискоренням і приводить в обертальний рух маятник.

При опусканні гири з висоти  $h$  її потенціальна енергія  $W_n = mgh$  перетворюється на кінетичну енергію поступального руху гири  $W_k = \frac{mv^2}{2}$  та кінетичну енергію обертального руху маятника  $W_k = \frac{I\omega^2}{2}$ , де  $m$  – маса гири,  $h$  – висота підняття гири над підставкою 7;  $v$  – кінцева швидкість гири (швидкість її під час удару об підставку);  $I$  – момент інерції маятника;  $\omega$  – кутова швидкість обертання маятника в момент удару гири об підставку. У цьому випадку (без урахування сил тертя у підшипниках та опору повітря) закон збереження енергії для гири запишеться як:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}. \quad (7)$$



Рух падаючої гири 5 за допомогою нитки, намотаної на шків радіуса  $r$ , передається всій системі, і кінцева швидкість падіння гири дорівнює лінійній швидкості обертання ободу шківа:

$$v = \omega r. \quad (8)$$

Оскільки гиря рухається рівноприскорено, а початкова її швидкість дорівнює нулю, то

$$v = at; \quad h = \frac{at^2}{2}. \quad (9)$$

Беручи до уваги (8) і (9), отримуємо

$$v = \frac{2h}{t} \quad \text{і} \quad \omega = \frac{2h}{rt}. \quad (10)$$

Підставивши у рівність (7) значення  $v$  та  $\omega$  з формул (9), одержимо робочу формулу для визначення моменту інерції маятника Обербека:

$$I = \frac{mr^2(gt^2 - 2h)}{2h}. \quad (11)$$

### **III. Порядок виконання роботи**

1. Маса гири  $m$  і радіус шківа  $r$  вказані на установці. Записати їх у звітну таблицю.
2. Закріпити тягарці на стержнях на найбільшій відстані від осі обертання. При цьому прилад повинен бути збалансований (перебувати у рівновазі).
3. Нитку, до якої прикріплена гиря масою  $m$ , акуратно намотати на шків так, щоб основа гири була на рівні нульової позначки шкали. Відпустити маятник і одночасно увімкнути секундомір. У момент, коли гиря ударить об підставку, вимкнути секундомір, зафіксувавши час опускання гири  $t$ . Виміряти висоту опускання  $h$ . Дослід повторити тричі. Для кожного дослідів за формулою (11) обчислити  $I$ . Обчислити середнє значення  $I$  та похибки вимірювань за формулами:

$$I_0 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_i = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}; \quad \Delta I_i = |I_0 - I_i|;$$

$$\Delta I_0 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta I_i = \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3}{3}; \quad \delta I_0 = \frac{\Delta I_0}{I} \cdot 100\%. \quad (12)$$

4. Змінити відстань тягарців від осі обертання, перемістивши їх на середину стержнів. Виконати вимірювання та обчислення, вказані в п.3.
5. Змінити відстань тягарців від осі обертання, перемістивши їх максимально до осі обертання маятника. Виконати вимірювання та обчислення, вказані в п.3.
6. Результати вимірювань і обчислень записати у звітну таблицю.

#### ***IV. Контрольні питання***

1. Що таке момент інерції тіла?
2. За якою формулою визначається момент інерції матеріальної точки, що обертається на віддалі  $R$  відносно нерухомої осі?
3. За якою формулою визначається момент інерції однорідного диска радіуса  $R$ ?
4. За якою формулою обчислюється момент інерції однорідної кулі радіуса  $R$ ?
5. Яка одиниця вимірювання моменту інерції?
6. Виведіть формулу для обчислення моменту інерції маятника Обербека.
7. Яка формула виражає закон збереження механічної енергії для маятника Обербека? Назвати його складові.
8. Як визначити лінійну швидкість руху ободу шківів і кутову швидкість обертання маятника?
9. Чи зміниться момент інерції маятника, якщо його встановити у іншому місці?

Звітна таблиця.

№ досл.	№ п/п	Положення тягарця	$m$ , кг	$r$ , м	$h$ , м	$t$ , с	$I$ , кг·м <sup>2</sup>	$\Delta I$ , кг·м <sup>2</sup>	$\delta I$ , %
1	1	Найдальше	X	X	X	X	X	X	X
	2								
	3								
сер.	X				X				
2	1	Середнє	X	X	X	X	X	X	X
	2								
	3								
сер.	X				X				
3	1	Найближче	X	X	X	X	X	X	X
	2								
	3								
сер.	X				X				

## Лабораторна робота №3

### Тема: Визначення періоду коливань математичного маятника і прискорення сил земного тяжіння

**Мета роботи:** навчитися визначати період коливань математичного маятника, прискорення вільного падіння.

**Матеріали та обладнання:** математичний маятник, секундомір, метр.

#### 1. Теоретичні відомості

*Коливання* є одним з найпоширеніших видів руху. Коливна система може перебувати в *положенні рівноваги*. Це таке положення, в якому система може перебувати як завгодно довго, за відсутності зовнішніх впливів.

*Коливним рухом* називається рух системи відносно її положення рівноваги послідовно, то в одному, то в іншому напрямі. Коливним може бути не лише механічний рух. Можна казати про коливання будь-якої фізичної величини, якщо ця величина змінюється послідовно в протилежних напрямках від деякого свого значення.

Коливання називаються *вільними* (чи *власними*), якщо вони здійснюються за рахунок попередньо наданої системі енергії й відсутності в подальшому зовнішніх впливів на коливну систему.

*Вимушені коливання* зумовлюються зовнішнім впливом, який змінюється з часом за періодичним законом.

Коливна система може здійснювати періодичні коливання. *Періодичним* є такий рух системи, в якому, починаючи з певного моменту часу, всі її положення послідовно повторюються. *Період коливання* – час здійснення одного повного коливання:  $T = \frac{t}{N}$ , де  $t$  – час, протягом якого здійснюється  $N$  повних коливань. Умова періодичності функції  $f(t)$  математично записується у вигляді

$$f(t) = f(t + T) \quad (1)$$

*Частота* – величина, що чисельно рівна кількості коливань, які здійснюються за одиницю часу:  $\nu = \frac{N}{t}$ . Співставляючи ці формули, одержуємо  $\nu = \frac{1}{T}$ .

Серед різних видів коливань найбільш простою формою є *гармонічні коливання*, тобто такі, за яких коливна величина змінюється з часом за законом синуса чи косинуса.

Розглянемо коливання фізичного маятника (рис. 1).

**Фізичним маятником** називають тверде тіло довільної форми, яке коливається під дією тяжіння навколо горизонтальної осі. Зрозуміло, що вісь коливання маятника не збігається з його центром мас.

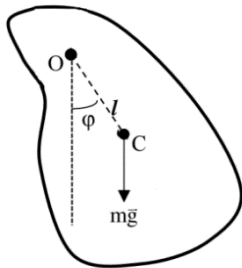


Рис. 1

Основне рівняння динаміки обертового руху

$$\sum_{i=1}^n M_i = J \cdot \beta$$

де  $J$  – момент інерції;  $\beta$  – кутове прискорення тіла, що коливається.

Момент сили  $M = [r \cdot F]$ . На фізичний маятник діє лише момент сили тяжіння (момент сил реакції опори дорівнює нулеві). Коливання фізичного маятника будуть гармонічними, якщо кути відхилення  $\varphi$  незначні, так, що  $\sin \varphi \approx \varphi$ . Величина моменту сили тяжіння  $M = -mgl \cdot \sin \varphi \approx -mgl \cdot \varphi$ , де  $l$  – відстань від точки підвісу до центру мас маятника. Знак моменту сили тяжіння протилежний до знаку  $\varphi$ , оскільки кут відхилення (зміщення) відраховується від положення рівноваги, а момент сили тяжіння в довільній точці траєкторії повертає маятник до положення рівноваги. Оскільки кутова швидкість  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$  і кутове прискорення  $\beta = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ , тоді рівняння гармонічних незгасаючих коливань фізичного маятника прийме вигляд:

$$-mgl \cdot \varphi = J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad \text{або} \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mgl}{J} \varphi = 0. \quad (2)$$

Його розв'язок  $\varphi = \varphi_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  – закон гармонічних коливань фізичного маятника. Колова частота  $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}$ .

Період коливань фізичного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}} \quad (3)$$

У частковому випадку, якщо маятник математичний, період коливань математичного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (4)$$

Математичним маятником називають матеріальну точку, підвішену на невагомій і нерозтяжній нитці, що коливається у вертикальній площині під дією сили тяжіння.

## II. Методика вимірювання

Використовуючи формулу (4) для періоду коливань математичного маятника, можна, вимірявши його довжину, обчислити період коливань.

Знаючи період коливань, можна знайти прискорення вільного падіння за формулою

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2} \quad (5)$$

Для визначення  $l$  необхідно знайти положення точки підвісу і центра тяжіння тіла, яке коливається.

## III. Порядок виконання роботи

1. Записати положення нижнього краю кульки ( $l_1$ ).
2. Відхиливши кульку на  $4 - 6^\circ$ , визначити  $t_1$  – час, за який відбувається  $N$  повних коливань.
3. Знайти період коливань математичного маятника  $T_1 = \frac{t_1}{N}$ .
4. Дослід провести для трьох різних довжин маятника.
5. За формулою (5) обчислити прискорення вільного падіння  $g_1, g_2, g_3$ .
6. Знайти середнє значення прискорення вільного падіння  $g_0$ .
7. Знайти абсолютні похибки  $\Delta g_1, \Delta g_2, \Delta g_3$  та середню абсолютну похибку  $\Delta g_0$ .

8. Обчислити відносну похибку  $\delta g_0$ .
9. Результати вимірювань і обчислень занести у звітну таблицю і записати кінцевий результат обчислень.

#### *IV. Контрольні питання*

1. Які коливання називаються власними коливаннями системи?
2. Які коливання називаються гармонічними?
3. Що таке період коливань?
4. Що таке частота коливань?
5. Чому маятник здійснює коливний рух?
6. Як залежить прискорення вільного падіння від географічної широти?

Звітна таблиця

№ з.п.	N	t, с	T, с	T <sup>2</sup> , с <sup>2</sup>	l, м	g, м/с <sup>2</sup>	Δg, м/с <sup>2</sup>	δg, %
1								X
2								
3								
сер.	X	X	X	X	X			

## Лабораторна робота №4

### Тема: **Визначення вологості повітря**

**Мета роботи:** навчитися визначати вологість повітря за допомогою психрометра Августа і аспіраційного психрометра.

**Матеріали та обладнання:** психрометр Августа, аспіраційний психрометр, гумові груша і піпетка, дистильована вода.

#### ***1. Теоретичні відомості***

У повітрі, що нас оточує, завжди є водяна пара. Вміст водяної пари в повітрі характеризують двома величинами: абсолютною і відносною вологістю.

*Абсолютна вологість повітря*  $f$  кількісно дорівнює масі водяної пари в кілограмах, яка міститься в  $1 \text{ м}^3$  (тобто її густині) при даній температурі. В метеорології абсолютну вологість характеризують парціальним тиском  $p$  водяної пари, яка є в повітрі (чисельно дорівнює парціальному тиску водяної пари в повітрі при даній температурі), і виражають в одиницях тиску.

*Максимальною вологістю*  $f_m$  називається маса водяної пари в кілограмах, яка насичує  $1 \text{ м}^3$  повітря при даній температурі, або відповідно парціальний тиск насиченої пари при тій же температурі.

Маса водяної пари  $f_m$ , яка насичує  $1 \text{ м}^3$  повітря (густина), і відповідний парціальний тиск  $p_m$  насиченої пари при деяких температурах наведені в таблиці 7 (*Додатки, с.132*).

*Відносна вологість*  $B$  визначається відношенням абсолютної вологості  $f$  до максимальної  $f_m$  і виражається у відсотках:  $B = (f/f_m) \cdot 100 \%$  або через парціальний тиск:  $B = (p/p_m) \cdot 100 \%$ .

Відносна вологість характеризує ступінь насичення повітря водяною парою. Чим менша відносна вологість повітря, тим швидше випаровується вода в даних умовах і навпаки.

Ступінь наближення до стану насичення визначає дефіцит вологості. Дефіцит вологості  $d$  – це різниця між максимальною вологістю  $f_m$  і абсолютною вологістю повітря  $f$  при даній температурі:  $d = f_m - f$ . При відносній вологості 100% дефіцит вологості дорівнює нулю.



Вологість повітря має важливе значення для життєдіяльності живих організмів. За рахунок окисних реакцій в організмі виділяється теплова енергія, частина якої віддається в навколишнє середовище при випаровуванні води з легень і з поверхні шкірного покриву. Для життя людини і тварин нормальною вважається відносна вологість 40 – 70 %. Необхідна вологість підтримується в музеях і бібліотеках для кращого збереження творів мистецтва, рукописів і рідкісних книг.

## II. Опис приладів і методика вимірювання

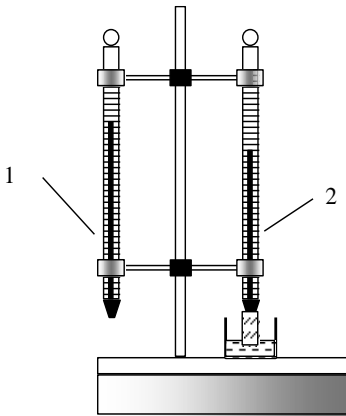


Рис. 1

Вологість повітря вимірюють за допомогою спеціальних приладів – гігрометрів і психрометрів. Найпоширенішим є психрометр Августа, що складається з двох термометрів – сухого і мокрого (рис.1). Сухий термометр 1 показує температуру повітря. Резервуар мокрого термометра обтягнутий клаптиком батисту, кінець якого опущений у воду. Вода піднімається по тканині і резервуар термометра завжди мокрий. Внаслідок випаровування

води з поверхні тканини резервуар охолоджується і мокрий термометр показує температуру, нижчу ніж сухий.

У звичайних умовах між показами сухого  $t_c$  і мокрого  $t_m$  термометрів одержується психрометрична різниця температур  $\Delta t$ . Чим сухіше повітря, тим інтенсивніше випаровування, тим більша психрометрична різниця, і, навпаки, вона менша, якщо більша відносна вологість. При відносній вологості 100 % психрометрична різниця  $t_c - t_m = 0$ .

За допомогою психрометра визначають відносну вологість  $V$ . Її знаходять через зіставлення показів сухого і мокрого термометрів, за допомогою спеціально розрахованої психрометричної таблиці 8 (Додатки, с.133).

Покази психрометра Августа сильно залежать від швидкості повітряних потоків в області малих значень швидкостей, а при великих швидкостях змінюються мало. Тому

запропоновано конструкцію психрометра з примусовим рухом повітря – аспіраційний психрометр. Для забезпечення сталої швидкості повітряних потоків в аспіраційному психрометрі використовують вентилятор, який приводиться в рух пружинним механізмом. Крім того, обидва термометри в аспіраційному психрометрі закріплені в блискучій металевій оправі, що захищає їх від зовнішнього випромінювання.

### **III. Порядок виконання роботи**

1. Змочити батист сухого термометра аспіраційного психрометра, звернувши при цьому увагу на те, щоб вода не потрапила на сухий термометр. Через 5-10 хв, коли покази встановляться, записати  $t_c$  і  $t_m$ .
2. За показами сухого  $t_c$  і мокрого  $t_m$  термометрів психрометра Августа і за табл. 7 і 8 визначити  $f_m$  і  $B$ .
3. Обчислити абсолютну вологість  $f$  і дефіцит вологості  $d$  відповідно за формулами:

$$f = f_m \cdot B / 100 \% ; d = f_m - f.$$

4. Змочити батист мокрого термометра аспіраційного психрометра, звернувши при цьому увагу на те, щоб вода не потрапила на сухий термометр і на внутрішню поверхню трубки. Ключем завести вентилятор (4-5 поворотів ключа) і стежити за показами термометрів. Через 4-5 хв, коли покази встановляться, записати значення  $t_c$  і  $t_m$ .
5. За таблицями і формулами, вказаними в пунктах 2 і 3, визначити  $f_m$ ,  $B$ ,  $f$  і  $d$ .
6. У кожному випадку дослід повторити не менше трьох разів у різних місцях лабораторії й порівняти результати.
7. Результати вимірювань і обчислень записати у звітну таблицю.
8. Для кожного значення температури  $t_c$ , записаної у звітну таблицю, з табл. 7 знайти  $p_m$  і обчислити  $p$  та дефіцит вологості  $d'$  за формулами:

$$p = p_m \cdot B / 100 \% ; d' = p_m - p.$$

### **IV. Контрольні питання**

1. Яку пару називають насиченою? Ненасиченою?
2. Що таке абсолютна вологість повітря?
3. Що таке максимальна вологість повітря?

4. Що таке відносна вологість повітря?
5. Яка формула використовується для визначення дефіциту вологості?
6. Чому вологий термометр показує нижчу температуру, ніж сухий?
7. Якою буде різниця в показах температури термометрів психрометра при відносній вологості повітря 100 %?
8. Яка формула використовується для визначення відносної вологості повітря?
9. Яке практичне значення має вимірювання вологості повітря?

Звітна таблиця для психрометра Августа

№ з.п.	$t_c$ , °C	$t_m$ , °C	$f_m \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$p_m \cdot 10^2$ , Па	$B$ , %	$f \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$p \cdot 10^2$ , Па	$d \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$d' \cdot 10^2$ , Па
1									
2									
3									

Звітна таблиця для аспіраційного психрометра

№ з.п.	$t_c$ , °C	$t_m$ , °C	$f_m \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$p_m \cdot 10^2$ , Па	$B$ , %	$f \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$p \cdot 10^2$ , Па	$d \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$d' \cdot 10^2$ , Па
1									
2									
3									

## Лабораторна робота №5

### Тема: **Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву краплини**

**Мета роботи:** засвоїти метод відриву краплини для визначення коефіцієнта поверхневого натягу.

**Матеріали та обладнання:** сталагмометр, розчини спирту різної концентрації, дистильована вода, резинова груша, термометр, хімічний стакан.

#### ***1. Теоретичні відомості***

Поверхневий натяг відіграє важливу роль у природі та медицині. Для життєдіяльності живих істот велике значення мають властивості поверхневого шару рідини, який знаходиться в специфічному стані натягу. Якщо в судину попадають бульбашки повітря, поверхневий шар рідини є причиною закупорки судин.

Значення коефіцієнта поверхневого натягу біологічних рідин може служити діагностичним показником. Так, наприклад, при захворюванні на жовтяницю поверхневий натяг сечі різко зменшується внаслідок наявності у ній жовчних кислот.

При діабеті та деяких інших захворюваннях підвищується вміст ліпази у крові, а від її концентрації залежить коефіцієнт поверхневого натягу. На поверхнях розділу рідини та її насиченої пари, двох незмішуваних рідин, рідини і твердого тіла виникає сила, зумовлена різною міжмолекулярною взаємодією на межі цих середовищ. Кожна молекула всередині рідини рівномірно оточена сусідніми молекулами і взаємодіє з ними. Але рівнодійна цих сил рівна нулю. На молекулу, яка знаходиться поблизу межі двох середовищ, діє сила, не скомпенсована іншими молекулами рідини. Виникає напружений стан поверхневого шару рідини, який називають *поверхневим натягом* (він обумовлений силами взаємодії між молекулами цього шару).

Векторна сума сил притягання, які діють на контур, що обмежує поверхню рідини, називається *силою поверхневого натягу*  $F$ . Вона пропорційна числу молекул, прилягаючих до контуру, яке, в свою чергу, пропорційне його довжині  $l$ :

$$F = \alpha l, \quad (1)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом поверхневого натягу:

$$\alpha = \frac{F}{l} \quad (2)$$

Тобто, *коефіцієнт поверхневого натягу* рідини чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, прикладеній до одиниці довжини контуру, що обмежує поверхню рідини.

В СІ розмірність  $[\alpha] = \frac{H}{m}$ , в СГС  $[\alpha] = \frac{Дн}{см}$ .

Поверхневий натяг може бути визначений і енергетично: для переміщення молекул з об'єму в поверхневий шар необхідно виконати роботу. І тоді поверхневий натяг визначається роботою, витраченою на створення деякої поверхні рідини при сталій температурі, до площі цієї поверхні:

$$\alpha = \frac{A}{S}. \quad (3)$$

В системі СІ розмірність  $[\alpha] = \frac{Дж}{m^2}$ , в СГС  $[\alpha] = \frac{Ерг}{см^2}$ .

Зміна температури сильно впливає на значення коефіцієнта поверхневого натягу. Поблизу критичної температури значення  $\alpha$  спадає лінійно із зростанням температури. На значення  $\alpha$  дуже впливають і домішки, що знаходяться в рідині. Речовина, що зменшує  $\alpha$  рідини, називається *поверхнево-активною*.

Для води поверхнево-активними є спирт, ефір, нафта, мило і т. д. Це явище пояснюється молекулярною теорією будови речовини: сили притягання між молекулами рідини більші від сил притягання між молекулами рідини і поверхнево-активними домішками. Тому молекули поверхневого шару рідини притягаються усередину рідини сильніше, ніж молекули домішок – причому молекули поверхнево-активної речовини витісняються на її поверхню. Деякі речовини збільшують  $\alpha$  рідини. Стосовно води прикладами такого роду домішок є цукор і сіль.

Очевидно, що молекули таких домішок будуть втягнуті усередину рідини і в поверхневому шарі залишаться переважно молекули рідини. Для визначення коефіцієнта поверхневого натягу існують такі методи:

1. *Метод підрахунку краплин* – найбільш часто використовується в медицині. При повільному витіканні рідини з вузької вертикальної трубки (капіляра) на її нижньому кінці утворюються краплини. Краплина відривається в той момент, коли її вага ( $P$ ) стає рівною силі поверхневого натягу ( $F_H$ ):

$$P = F_H \quad (4)$$

Згідно визначення, сила поверхневого натягу

$$F_H = \alpha l \quad (5)$$

Довжина контуру  $l$ , вздовж якого діють сили поверхневого натягу, для краплини рівна:

$$l = 2\pi r, \quad (6)$$

де  $r$  – радіус шийки капіляра. Тоді рівняння (4) можна записати у вигляді:

$$P = 2\pi r \alpha \quad (7)$$

Вага однієї краплини:

$$P = \frac{\rho V}{n}, \quad (8)$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $n$  – число краплин в даному об'ємі  $V$ . Підставивши значення  $P$  з формули (8) у формулу (7), одержимо:

$$\frac{\rho V}{n} = 2\pi r \alpha, \quad (9)$$

звідки

$$\alpha = \frac{\rho V}{2\pi r n}. \quad (10)$$

Цією формулою зручно користуватися для визначення відносного коефіцієнта поверхневого натягу.

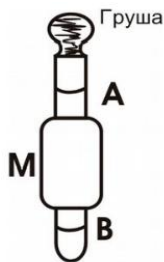


Рис. 1.  
Сталагмометр.

Якщо маємо дві різні рідини і підрахуємо кількість краплин  $n_0$  та  $n_1$ , утворених при витіканні однакових об'ємів цих рідин через один і той же капіляр (однакове  $r$ ), то, згідно формули (10), для першої і другої рідини одержимо:

$$\alpha_0 = \frac{\rho_0 V}{2\pi r n_0}; \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{\rho_1 V}{2\pi r n_1}. \quad (12)$$

Поділивши рівняння (11) на рівняння (12), одержимо:

$$\frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \frac{\rho_0}{\rho_1} \cdot \frac{n_1}{n_0}. \quad (13)$$

Звідси коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини буде рівний:

$$\alpha_0 = \frac{\rho_1 n_0}{\rho_0 n_1} \cdot \alpha_0. \quad (14)$$

Це і є робоча формула даного методу. А відповідний прилад називається *сталагмометром* (рис.1).

2. *Метод капілярних трубок* – рідина, стикаючись з твердим тілом, або його змочує, або не змочує. Якщо скляну трубку з малим (капілярним) отвором опустити в посудину з рідиною, поверхня рідини приймає в капілярі вигнуту (при змочуванні – рис.2, а) або опуклу (при незмочуванні – рис.2, б) форму. За рахунок викривлення поверхні рідини виникає додатковий тиск  $\Delta P$ . Цей тиск визначається за формулою Лапласа:

$$\Delta P = \frac{2\alpha}{R}, \quad (15)$$

де  $R$  – радіус кривизни поверхні рідини,  $\alpha$  – її коефіцієнт поверхневого натягу.

Рівень рідини в капілярі підіймається при змочуванні або опускається при незмочуванні на висоту  $h$  над рівнем у посудині. Підняття або опускання рідини в капілярі відбувається до такої висоти  $h$ , на якій гідростатичний тиск рідини  $\rho gh$  зрівноважує додатковий тиск  $\Delta P$ , тобто:

$$\frac{2\alpha}{R} = \rho gh. \quad (16)$$

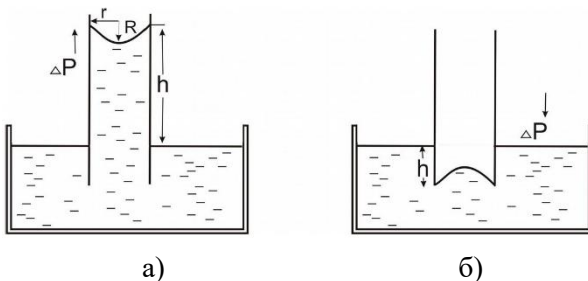


Рис. 2. Підняття (а) та опускання (б) води в капілярі.

При повному змочуванні радіус кривизни поверхні рідини в капілярі  $R$  дорівнює радіусу капіляра  $r$ :  $R = r$ . Знаючи густину рідини, висоту її підняття в капілярі і радіус  $r$  капіляра, можна обчислити коефіцієнт поверхневого натягу за формулою:

$$\alpha = \frac{r}{2} \cdot \rho g h. \quad (17)$$

3. *Метод відриву кільця* – оснований на вимірюванні сили  $F_n$ , необхідної для відриву тонкого кільця, яке своїм торцем торкається поверхні рідини і утримується силою поверхневого натягу, що діє по зовнішньому та внутрішньому обводам кільця:  $l = \pi \cdot D_1 + \pi \cdot D_2$ , де  $D_1$  – внутрішній, а  $D_2$  – зовнішній діаметр кільця. Тоді  $F_n = \alpha \pi (D_1 + D_2)$ , звідки коефіцієнт поверхневого натягу

$$\alpha = \frac{F_n}{\pi(D_1 + D_2)}. \quad (18)$$

Силу  $F_n$  визначають з допомогою торзійних терез.

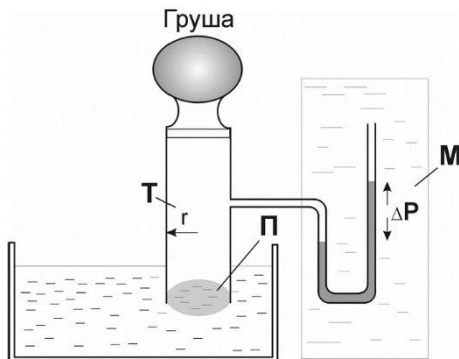


Рис. 3. Схема методу Ребіндера

4. *Метод Ребіндера* (або максимального тиску бульбашки). При цьому в посудину з досліджуваною рідиною опускають на невелику глибину капілярну трубку Т радіусом  $r$ , з'єднану з резиновою грушею Г і чутливим водяним манометром М (рис.3).

Обережно нагнітаючи грушею в трубку повітря, добиваються утворення на її кінці бульбашки П. В момент відриву бульбашки по манометру фіксують  $\Delta P$ , який зрівноважує додатковий тиск під криволінійною поверхнею бульбашки. Цей тиск  $\Delta P = \frac{2\alpha}{r}$  (радіус бульбашки прирівнюється до радіуса  $r$



трубки). Звідси  $\alpha = \frac{r \cdot \Delta P}{2}$ . Цим методом можна також визначити коефіцієнт поверхневого натягу, який виникає на межі розділу двох незмішуваних рідин.

### **III. Порядок виконання роботи**

1. Наповнити резервуар М (рис.1) дистильованою водою до верхньої мітки А.
2. Знявши резинову грушу, почати відраховувати краплини до тих пір, поки вода не опуститься до мітки Б. Таким чином буде отримано  $n_0$ .
3. Проробити те ж саме з досліджуваними рідинами – розчинами спирту різної концентрації – підрахувати  $n_1, n_2, n_3$ .
4. За формулою (14) обчислити коефіцієнти поверхневого натягу  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  досліджуваних рідин (значення  $\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_3$  і  $\rho_4$  взяти з таблиць).
5. Результати вимірів і обчислень записати у звітну таблицю.
6. Розрахувати середню абсолютну похибку у визначенні  $\alpha_1$  досліджуваної рідини  $\Delta\alpha_{10}$ . Відповідь записати у вигляді  $\alpha = \alpha_{10} \pm \Delta\alpha_{10}$ .
7. Розрахувати відносну похибку:

$$\delta\alpha_1 = \frac{\Delta\alpha_{10}}{\alpha_{10}} \cdot 100\%$$

8. Побудувати залежність  $\alpha = f(C\%)$  та записати висновки.

### **IV. Контрольні питання**

1. Як виникає поверхневий натяг?
2. У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу та його одиниці виміру?
3. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу?
4. Які є методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу?
5. Навести приклади значення коефіцієнта поверхневого натягу в біології та медицині.
6. Яка роль коефіцієнта поверхневого натягу при діагностиці захворювань?

Звітна таблиця

№ з.п.	$C$ , %	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\alpha_0$ , дн/см	$n_0$ , штук	$n$ , штук	$\alpha_1$ , дн/мм	$\alpha_2$ , дн/мм	$\alpha_3$ , дн/мм	$\Delta\alpha_1$ , дн/см	$\delta\alpha_1$ , %
1											
2											
3											
сер.											

**Тема: Визначення коефіцієнта в'язкості рідини  
і критичної швидкості течії**

**Мета роботи:** ознайомитися з будовою віскозиметра ВПЖ-1, навчитись користуватися ним для визначення в'язкості рідини.

**Матеріали та обладнання:** капілярний віскозиметр ВПЖ-1, секундомір, досліджувана рідина.

**I. Теоретичні відомості**

При відносному зміщенні шарів рідини або газу виникає сила внутрішнього тертя, яка гальмує рух шарів, що рухаються з більшою швидкістю, і прискорює рух шарів з меншою швидкістю (рис.1).

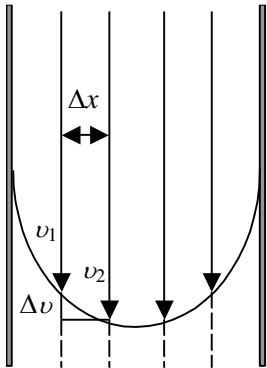


Рис.1.

Сила внутрішнього тертя є результатом дії сил молекулярного зчеплення на межі двох шарів і переходом молекул з одного шару в інший.

Сила внутрішнього тертя

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (1)$$

де  $\Delta v$  – різниця швидкостей рухомих шарів;  $\Delta x$  – найкоротша відстань між цими шарами;  $\Delta v / \Delta x$  – градієнт швидкості;  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя або динамічна в'язкість.

Динамічна в'язкість  $\eta$  чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка виникає між двома шарами рідини одиничної площі  $S$ , при градієнті швидкості, що дорівнює одиниці. Одиниця вимірювання динамічної в'язкості – паскаль-секунда (Па·с). 1 Па·с – це динамічна в'язкість рідини, для якої на 1 м<sup>2</sup> поверхні дотику шарів при градієнті швидкості 1 с<sup>-1</sup> діє сила 1 Н (1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>).

Спостерігаються два види течії рідини (або газу). В одних випадках рідина розділяється на шари, які ковзають один відносно одного не перемішуючись. Така течія називається *ламінарою* (лат. lamina – пластина).

При збільшенні швидкості або поперечних розмірів потоку виникає перемішування шарів рідини. Така течія називається *турбулентною*.

Англійський учений Рейнольдс, досліджуючи потоки рідин і газів, з'ясував, що характер будь-якого потоку визначається безрозмірним числом

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta},$$

де  $\rho$  – густина рідини або газу;  $v$  – швидкість потоку;  $l$  – характерний для поперечного перетину розмір (наприклад, сторона при квадратному перетині, діаметр чи радіус при круглому перетині);  $\eta$  – в'язкість. Знайдене таким способом число називається *числом Рейнольдса*.

Для потоку в круглій трубі діаметром  $d$  при  $Re < 2000$  потік ламінарний, а при  $Re > 2000$  потік нестійкий і легко переходить у турбулентний.

Отже, для певного діаметра труби існує *критична швидкість течії*  $v_{кр}$  – це швидкість, вище від якої течія рідини переходить у турбулентну. За Рейнольдсом

$$v_{кр} = \frac{\eta 2000}{\rho d} = v \frac{2000}{d}.$$

Відношення динамічної в'язкості  $\eta$  до густини  $\rho$  рідини називається *кінематичною в'язкістю*:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

і вимірюється в  $\text{м}^2/\text{с}$ .

В'язкість залежить від молекулярної будови рідини чи газу і їх температури. З підвищенням температури в'язкість рідин зменшується, а в'язкість газів збільшується.

В'язкість є важливою характеристикою рідин і газів. В'язкість води і повітря спричинює значний опір швидкохідному транспорту; в трубопроводах в'язкість рідин і газів зумовлює спад тиску; в'язкість характеризує якість мастил.

В'язкість є важливою константою опису патологічних процесів у медицині та ветеринарії. Наприклад, в'язкість крові знижується при анемії й підвищується при поліцитемії.

## II. Опис приладів і методика вимірювання

На практиці в'язкість вимірюється різними методами, зокрема методом протікання рідин через капіляри. Він ґрунтується на використанні рівняння Пуазейля

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8 \eta l}, \quad (2)$$

де  $V$  – об'єм рідини, що протекла за час  $\tau$  через капіляр радіусом  $r$  і довжиною  $l$ ,  $\Delta p$  – різниця тисків на кінцях капіляра. Рівняння (2) дійсне для ламінарної течії при значному часі протікання рідини (100 с і більше).

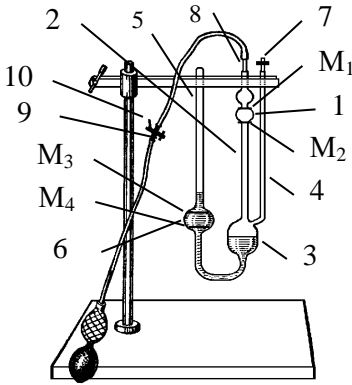


Рис. 2

Визначивши в процесі досліду об'єм та інші величини, що входять у рівняння Пуазейля (2), можна обчисливши коефіцієнт в'язкості рідини.

Прилад для вимірювання в'язкості рідин – капілярний вискозиметр ВПЖ-1 (рис.2) – складається з вимірювального резервуара 1, який обмежений двома кільцевими позначками  $M_1$  і  $M_2$ . Резервуар 1 переходить у капіляр 2 і резервуар 3, з'єднаний з зігнутою трубкою і трубкою 4.

Нижня частина трубки 5 завершується резервуаром 6, на якому нанесено дві позначки  $M_3$  і  $M_4$ . Досліджувану рідину заливають у чистий вискозиметр через трубку 5 так, щоб її рівень опинився між позначками  $M_3$  і  $M_4$ . Кінець трубки 8 за допомогою гумової трубки та триходового крана 9 з'єднаний з гумовою грушею. На кінець трубки 4 насаджена гумова трубка з краном 7. Досліджувана рідина за допомогою гумової груші втягується по капілярі 2 з резервуара 3 в резервуар 1. Під час досліду рідина з резервуару 1 по капіляру 2 стікає в резервуар 3 під дією сили тяжіння. Якщо рідина витікає тільки під впливом власної ваги, то різниця тисків на кінцях капіляра  $\Delta p$  дорівнює гідростатичному тискові  $\Delta p = \rho gh$ , де  $\rho$  –

густина рідини,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $h$  – висота води в капілярі.

Підставивши значення  $\Delta p$  у формулу (2), отримаємо

$$V = \frac{\pi \rho g h r^4 \tau}{8 \eta l},$$

звідки

$$\eta = \frac{\pi \rho g h r^4 \tau}{8 V l},$$

і відповідно

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi g h r^4 \tau}{8 V l}, \quad (3)$$

Для даного віскозиметра ВПЖ-1 при протіканні одного і того ж об'єму  $V$  рідини величина  $\frac{\pi g h r^4}{8 V l} = C$  є сталою і вказана на приладі. З урахуванням цього формула (3) набуде вигляду

$$\nu = C \tau, \quad (4)$$

де  $\tau$  – час протікання рідини через капіляр від позначки  $M_1$  до позначки  $M_2$ .

З формули (4) бачимо, що час витікання рідини прямо пропорційний кінематичній в'язкості. Вираз (4) є робочою формулою для визначення кінематичної в'язкості за допомогою капілярного віскозиметра ВПЖ-1.

Знаючи кінематичну в'язкість  $\nu$  і діаметр капіляра  $d$ , можна визначити критичну швидкість потоку рідини в цьому капілярі за формулою

$$v_{кр} = \nu \frac{2000}{d}. \quad (5)$$

### ***III. Порядок виконання роботи***

1. Перекрити краном 7 трубку 4.
2. Повернути триходовий кран 9 так, щоб позначка на ньому збіглася за напрямом з трубкою 10.
3. Стиснути грушу, після чого повернути триходовий кран на  $180^\circ$  і повільно відпускати грушу доти, доки не заповниться досліджуваною рідиною резервуар 3 і половина розширення трубки 8.

4. Триходовий кран повернути на  $90^\circ$  так, щоб позначка на ньому збіглася з трубою, до якої під'єднана груша. Відпустити грушу.
5. Триходовий кран повернути так, щоб позначка на ньому збіглася з трубою 10. Зачекати, доки рідина в капілярі 2 не підніметься вище позначки  $M_1$ . Повернути триходовий кран 9 у початкове положення.
6. Відкрити кран 7. Рідина з трубки почне витікати через капіляр 2.
7. У той момент, коли рівень рідини проходить через позначку  $M_1$ , увімкнути секундомір, а в момент переходу через  $M_2$  – вимкнути.
8. Дослід повторити 4 рази, записуючи кожен раз числове значення часу  $\tau$  у звітну таблицю.
9. Обчислити середнє значення часу  $\tau_0$  і середню абсолютну похибку  $\Delta\tau_0$ .
10. Використовуючи середнє значення часу  $\tau_0$  обчислити кінематичну в'язкість  $\nu_0$  за формулою (4). Значення  $C_0$  вказано на установці.
11. Знаючи  $\nu_0$  і діаметр капіляра  $d_0$ , обчислити критичну швидкість за формулою (5). Діаметр капіляра  $d_0$  вказано на установці.
12. Похибки обчислюються за такими формулами:
 
$$\delta\nu_0 = \left( \frac{\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta\tau_0}{\tau_0} \right) \cdot 100\%; \quad \delta v_{\text{кр}0} = \left( \frac{\Delta\nu_0}{\nu_0} + \frac{\Delta d_0}{d_0} \right) \cdot 100\%;$$

$$\Delta\nu_0 = \frac{\delta\nu_0 \cdot \nu_0}{100\%}; \quad \Delta v_{\text{кр}0} = \frac{\delta v_{\text{кр}0} \cdot v_{\text{кр}0}}{100\%}.$$
13. Результати вимірювань і обчислень занести у звітну таблицю.
14. Записати кінцевий результат для  $\nu$  і  $v_{\text{кр}}$ .

#### ***IV. Контрольні питання***

1. Що зумовлює в'язкість рідини?
2. За якою формулою визначається сила внутрішнього тертя?
3. Що таке градієнт швидкості?
4. В яких одиницях вимірюється градієнт швидкості?
5. У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта динамічної в'язкості?

6. Дайте визначення одиниці вимірювання коефіцієнта динамічної в'язкості.
7. Що таке кінематична в'язкість?
8. В яких одиницях вимірюється кінематична в'язкість?
9. Який режим течії називається ламінарним?
10. Який режим течії називається турбулентним?
11. Як записується рівняння Пуазейля? Назвіть величини, що входять до нього.
12. Виведіть робочу формулу для визначення коефіцієнта кінематичної в'язкості.
13. Що таке критична швидкість?
14. Яка робоча формула для визначення критичної швидкості?

Звітна таблиця

№ з.п.	$\tau$ , с	$\Delta\tau$ , с	$C$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	$\Delta C$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\Delta\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\delta\nu$ , %	$d$ , м	$\Delta d$ , м	$v_{кр}$ , м/с	$\Delta v_{кр}$ , м/с	$\delta v_{кр}$ , %
1												
2												
3												
4												
5												
сер.												



**Тема: Визначення модуля Юнга за деформацією прогину**

**Мета роботи:** навчитися визначати модуль Юнга за деформацією прогину.

**Матеріали та обладнання:** Установка для визначення модуля Юнга методом прогину, штангенциркуль, мікромметр, набір тягарців, досліджуваний стержень.

**1. Теоретичні відомості**

Будь-яке тіло під дією зовнішньої сили зазнає деформації, тобто зміни свого розміру або форми. Залежно від характеру зовнішньої дії можуть здійснюватися деформації різних видів. Розрізняють п'ять основних видів деформації: розтяг, стиск, зсув, кручення і згин. Деформації твердих тіл бувають пружними і пластичними.

Пружною називається деформація, яка зникає разом з припиненням дії зовнішньої сили. Тобто тіло після такої деформації повертається у початковий стан.

Пластичною називається деформація, яка зберігається після припинення дії зовнішніх сил.

Деформація характеризується відносною деформацією  $\varepsilon$ , яка дорівнює відношенню зміни  $\Delta x$  будь-якого розміру тіла під дією сили до початкової величини  $x$ :

$$\varepsilon = \Delta x / x. \quad (1)$$

При деформації в тілі виникає особливий стан, який називається механічним напруженням  $\sigma$ .  $\sigma$  – фізична величина, яка чисельно дорівнює пружній силі  $F$ , що припадає на одиницю площі  $S$  перерізу тіла, нормального до напрямку сили. Отже,  $\sigma = F/S$ .

Відповідно до закону Гука, відносна деформація пружно деформованого тіла  $\varepsilon$  прямо пропорційна механічному напруженню, тобто

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де  $E$  – коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом пружності (або модулем Юнга), який залежить від матеріалу тіла.

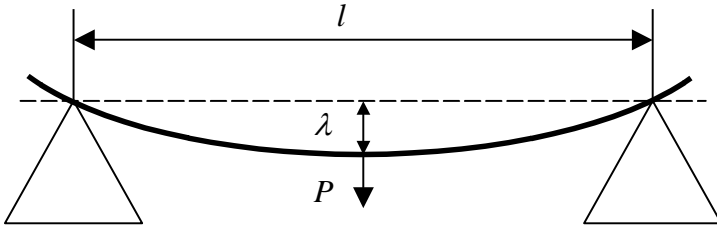


Рис. 1

Модуль Юнга це таке механічне напруження, яке настає в тілі при його одиничній відносній деформації:  $E = \sigma$ , якщо  $\varepsilon = \Delta x/x \equiv 1$ .

В СІ модуль Юнга вимірюється в Н/м<sup>2</sup>.

Модуль Юнга можна визначити за деформацією прогину. Для цього два кінці досліджуваного стержня кладуть на гострі краї двох призм (рис.1), а до його середини підвішують тягарець вагою  $P$ . При прогині стержня його середина переміщується вниз на деяку величину  $\lambda$ , яка називається «стрілою прогину». Ця величина є мірою деформації прогину і для даного стержня залежить від деформуючої сили та модуля пружності матеріалу, з якого виготовлений стержень. Можна показати, що стріла прогину в даному випадку дорівнює:

$$\lambda = \frac{Pl^3}{4Eab^3}, \quad (3)$$

де  $P$  – вага тягарця;  $l$  – довжина стержня (віддаль між призмами);  $a$  – ширина поперечного перерізу стержня;  $b$  – товщина стержня.

Із (3) знаходимо модуль Юнга:

$$E = \frac{Pl^3}{4ab^3\lambda}. \quad (4)$$

Формула (4) є робочою для визначення модуля Юнга за деформацією прогину.

## II. Опис приладів і методика вимірювання

Прилад для визначення модуля Юнга методом прогину (рис.2) складається з масивної платформи 9 з двома стояками 7,

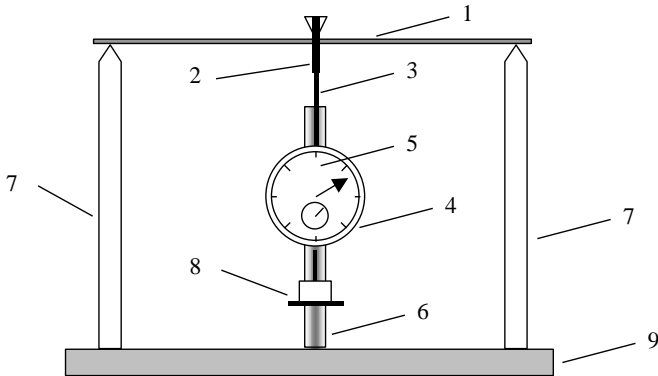


Рис. 2

верхні кінці яких мають форму тригранних призм. Відстань між стояками при потребі можна змінювати, але ребра призм повинні бути паралельні між собою. Посередині між стояками на платформі нерухомо закріплений стержень 6. До цього стержня прикріплений індикатор годинникового типу 5. Індикатор являє собою вимірювальний прилад із зубчатою передачею, дія якого ґрунтується на перетворенні малих лінійних переміщень вимірювального стержня 3 на обертові переміщення стрілки індикатора. Лінійному переміщенню стержня 3 на один міліметр відповідає повний оберт стрілки індикатора. Ціна поділки шкали індикатора становить 0,01 мм. Відлік цілих міліметрів реалізується малою стрілкою на шкалі індикатора.

Досліджуваній стержень 1 встановлюють усередину хомутика 2 і обом кінцями кладуть на гострі краї тригранних призм. При цьому ребро тригранної призми хомутика 2 повинне доторкатися до верхньої площини досліджуваного стержня. Установка індикатора на нуль здійснюється обертанням обідка 4, з'єданого зі шкалою індикатора. Індикатором визначають стрілу прогину стержня  $\lambda$  під дією тягарців, розташованих на підвісі 8.

### ***III. Порядок виконання роботи***

1. Штангенциркулем виміряти відстань між гострими ребрами призм стояків 7. Ця відстань дорівнює довжині  $l$  досліджуваного стержня.

2. Мікрометром виміряти п'ять разів у різних місцях ширину  $a$  і товщину  $b$  перерізу стержня. Обчислити середнє значення  $a_0$  і  $b_0$ .
3. Просунути стержень у хомутик 2 й покласти його на гострі ребра тригранних призм стояків 7 так, щоб вони торкалися площини стержня.
4. Покласти на підвіс тягарець і за шкалою індикатора визначити стрілу прогину  $\lambda_1$  стержня. Потім, поклавши на перший другий тягарець, виміряти  $\lambda_2$ ; поклавши третій - виміряти  $\lambda_3$ .
5. Розвантажити стержень поступово (знімати по одному тягарцю) і записати відповідні  $\lambda_4$  і  $\lambda_5$ .
6. Підставивши знайдені експериментальні значення  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  та  $\lambda_5$ , і відповідні їм значення величини навантаження  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ , а також  $l$  і середні значення  $a_0$  та  $b_0$  у формулу (4), обчислити модуль Юнга  $E_1, \dots, E_5$  і знайти середнє значення  $E_0$ .
7. Похибки обчислити за такими формулами:

$$\Delta E_i = |E_0 - E_i|; \quad \Delta E_0 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta E_i = \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3}{3};$$

$$\delta E_0 = \frac{\Delta E_0}{E_0} \cdot 100 \text{ \%}.$$

8. Результати вимірювань і обчислень записати у звітну таблицю.
9. Записати кінцевий результат для  $E$ .

#### **IV. Контрольні питання**

1. Що таке деформація?
2. Яка деформація називається пружною?
3. Яка деформація називається пластичною?
4. Які є основні види деформації?
5. Що таке відносна деформація?
6. Як формулюється закон Гука?
7. Що характеризує модуль Юнга?
8. Яка одиниця вимірювання модуля Юнга в СІ?
9. Яка формула «стріли прогину» стержня?
10. Яка робоча формула для визначення модуля Юнга?

Звітна таблиця

№ з.п.	$l$ , м	$a$ , м	$b$ , м	$P$ , Н	$\lambda$ , м	$E$ , Н/м <sup>2</sup>	$\Delta E$ , Н/м <sup>2</sup>	$\delta E$ , %
1	X							X
2								
3								
4								
5								
сер.				X	X			

## Лабораторна робота №8

### Тема: Визначення густини молока лактоденсиметром

**Мета роботи:** вивчити принцип роботи і будову лактоденсиметра та оволодіти методикою визначення ним густини молока.

**Матеріали та обладнання:** мензурка циліндричної форми, лактоденсиметр, молоко.

### 1. Теоретичні відомості

Молоко є цінним продуктом харчування. Воно характеризується багатоконпонентним складом, який залежить від цілої низки факторів: годівлі, умов утримання і періоду лактації, віку та породи тварин. Нижче наведений середній склад молока у %:

Вода	87,3		
Суха речовина	12,7		
у тому числі:			
білки	3,2	органічні кислоти	0,16
жири	3,6	мінеральна речовина	0,7
вуглеводи	4,6	макроелементи мікроелементи вітаміни	дуже мала кількість

Середні показники фізичних властивостей мають такий вигляд:

Густина	1028,5 кг/м <sup>3</sup>	Питома теплоємність	3890,9 Дж/(кг·К)
В'язкість	1,79 мПа·с	Питома електропровідність	0,455 См/м
Коефіцієнт поверхневого натягу	0,044 Н/м	Показник заломлення	1,35

Залежність фізико-хімічних властивостей молока від його складу покладена в основу методів визначення якості молока, тобто його біологічної цінності та придатності до вживання.

Процес визначення якості молока громіздкий, оскільки полягає у визначенні перелічених вище компонентів. Одним із найпростіших і найпоширеніших аналізів, за допомогою якого визначають придатність молока до вживання, є визначення його густини.

*Густина речовини* – це фізична величина, що дорівнює масі речовини в одиниці об'єму. Якщо речовина масою  $m$  займає об'єм  $V$ , то її густина дорівнює:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Густина вимірюється у  $\text{кг}/\text{м}^3$ . У практичній діяльності густину частіше вимірюють у  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Густина рідини залежить від температури. Для усіх рідин, крім води, в температурному інтервалі від  $0^\circ\text{C}$  до  $4^\circ\text{C}$  спостерігається зменшення густини при нагріванні. Густина води при зростанні температури від  $0^\circ\text{C}$  до  $4^\circ\text{C}$  збільшується і становить  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$  при  $4^\circ\text{C}$ .

Густина якісного молока при  $20^\circ\text{C}$  повинна перебувати в межах  $1,027\text{-}1,032 \text{ г}/\text{см}^3$  ( $1027\text{-}1032 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), а знежиреного –  $1,033\text{-}1,036 \text{ г}/\text{см}^3$ .

### ***II. Опис приладів та методика вимірювання***

Прилад, який часто використовується у ветеринарно-гігієнічній практиці для визначення густини молока, називається лактоденсиметром (молочним ареометром).

Принцип дії ареометра (рис.1, а) ґрунтується на законі Архімеда. Відомо, що на тіло, занурене в рідину, діє виштовхувальна сила  $\vec{F}_A$  (рис.2), яка визначається законом Архімеда: *на тіло, занурене в рідину (газ), діє з боку цієї рідини напрямлена вгору виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої рідини:*

$$F_A = \rho_p g V_2,$$

де  $\rho_p$  – густина рідини;  $V_2$  – об'єм зануреної в рідину частини тіла.

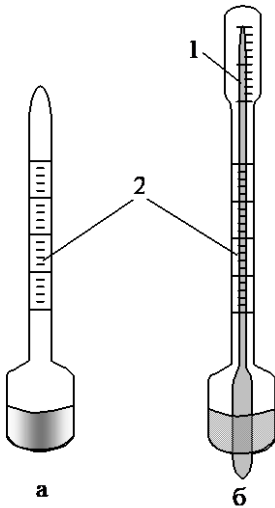


Рис. 1

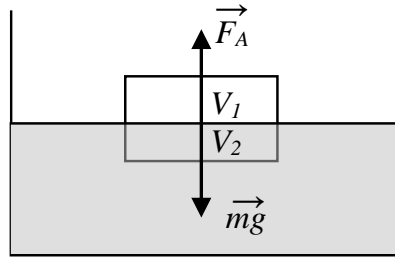


Рис. 2

Лактоденсиметр (рис.1, б) відрізняється від ареометра (рис.1, а) тим, що в ньому поряд зі шкалою густини 2 міститься термометр зі шкалою 1.

У ветеринарно-гігієнічній практиці поширеними є лактоденсими-метри проградуїзовані в градусах ареометра ( $^{\circ}A$ ). Для переведення виміряного значення в метричну міру густини ( $г/см^3$ ) необхідно перед значенням густини в ( $^{\circ}A$ ) поставити перші дві цифри (1,0). Наприклад, виміряна густина рівна  $35,5^{\circ}A$ , то в метричних одиницях густини вона становитиме  $1,0355 г/см^3$ .

Одержання градусів ареометра необхідно від числового значення густини, вираженої в  $г/см^3$ , відкинути перші дві цифри (1,0) і переставити кому на два знаки праворуч. Наприклад, густина молока  $1,0355 г/см^3$ , густина, виражена в градусах ареометра, становитиме  $35,5^{\circ}A$ .

На практиці густина молока визначається при температурі від  $10^{\circ}C$  до  $25^{\circ}C$ . Оскільки густина молока залежить від температури, то її прийнято визначати при температурі  $20^{\circ}C$ . Якщо густина молока визначається при температурі, відмінній від  $20^{\circ}C$ , то вводиться поправка  $0,2^{\circ}A/^{\circ}C$ , яка дає змогу теоретично обчислити густину молока при  $20^{\circ}C$ .

Розглянемо два приклади.

**Приклад 1.** Нехай визначили за допомогою лактоденсими-метра, що при температурі  $12^{\circ}C$  густина молока  $\rho_{\text{вим}}$  становила  $30,6^{\circ}A$  ( $1,0306 г/см^3$ ). Тоді:



- 1) визначаємо температурну поправку  $t_n$  (тобто на скільки градусів відрізняється температура досліджуваного молока від 20°C):

$$t_n = (12^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = -8^\circ\text{C};$$

- 2) знаходимо поправку до густини молока  $\rho_n$ :

$$\rho_n = 0,2^\circ\text{A}/^\circ\text{C} \cdot t_n = 0,2^\circ\text{A}/^\circ\text{C} \cdot (-8^\circ\text{C}) = -1,6^\circ\text{A};$$

- 3) знаходимо теоретично обчислену густину молока при 20°C:

$$\rho = \rho_{\text{вим}} + \rho_n = 30,6^\circ\text{A} - 1,6^\circ\text{A} = 29,0^\circ\text{A} \quad (1,029 \text{ г/см}^3).$$

**Приклад 2.** Нехай визначили за допомогою лактоденсиметра, що при температурі 24°C густина молока  $\rho_{\text{вим}}$  становила 38,4°A (1,0384 г/см³). Тоді:

- 1) визначаємо температурну поправку  $t_n$  (тобто на скільки градусів відрізняється температура досліджуваного молока від 20°C):

$$t_n = (24^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 4^\circ\text{C};$$

- 2) знаходимо поправку до густини молока  $\rho_n$ :

$$\rho_n = 0,2^\circ\text{A}/^\circ\text{C} \cdot t_n = 0,2^\circ\text{A}/^\circ\text{C} \cdot 4^\circ\text{C} = 0,8^\circ\text{A};$$

- 3) знаходимо теоретично обчислену густину молока при 20°C:

$$\rho = \rho_{\text{вим}} + \rho_n = 38,4^\circ\text{A} + 0,8^\circ\text{A} = 39,2^\circ\text{A} \quad (1,0392 \text{ г/см}^3).$$

### **III. Порядок виконання роботи**

1. По стінці мензурки налити 500 мл добре перемішаного молока.
2. Чистий сухий лактоденсиметр повільно занурити у молоко. Лактоденсиметр не повинен торкатися стінок мензурки.
3. Через 1-2 хв зробити два відліки: за температурною шкалою 1 визначити температуру молока, за шкалою 2 – його густину.
4. Виміри повторити двічі при різній температурі молока.
5. Обчислити густину молока  $\rho_1$  (°A) та  $\rho_2$  (г/см³) при температурі 20°C.
6. Обчислити середні значення, абсолютні та відносні похибки  $\rho_{10}$  (°A) і  $\rho_{20}$  (г/см³) за формулами:

$$\rho_{10} = \frac{\rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{13}}{3}; \quad \rho_{20} = \frac{\rho_{21} + \rho_{22} + \rho_{23}}{3};$$

$$\Delta\rho_{1i} = |\rho_{10} - \rho_{1i}|; \quad \Delta\rho_{2i} = |\rho_{20} - \rho_{2i}|;$$

$$\Delta\rho_{10} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta\rho_{1i} = \frac{\Delta\rho_{11} + \Delta\rho_{12} + \Delta\rho_{13}}{3};$$

$$\Delta\rho_{20} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta\rho_{2i} = \frac{\Delta\rho_{21} + \Delta\rho_{22} + \Delta\rho_{23}}{3};$$

$$\delta\rho_{10} = \frac{\Delta\rho_{10}}{\rho_{10}} \cdot 100\%;$$

$$\delta\rho_{20} = \frac{\Delta\rho_{20}}{\rho_{20}} \cdot 100\%.$$

7. Результати вимірювань і обчислень записати у звітну таблицю.

#### *IV. Контрольні питання*

1. Що таке густина речовини?
2. Який фізичний зміст густини?
3. Від яких фізичних параметрів залежить густина?
4. В яких одиницях вимірюється густина в СІ?
5. Яка будова лактоденсиметра?
6. На якому законі ґрунтується дія лактоденсиметра?
7. Як формулюється закон Архімеда?
8. Як вводиться температурна поправка при визначенні густини молока?
9. Як перевести одиниці густини °А в г/см<sup>3</sup>?
10. Як обчислюється температурна поправка густини молока, якщо його температура при вимірюванні відмінна від 20°С.

Звітна таблиця

№ з.п	$t, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{вим}1}, ^\circ\text{A}$	$\rho_{\text{вим}2}, \text{г/см}^3$	$\rho_n, ^\circ\text{A}$	$\rho_1, ^\circ\text{A}$	$\rho_2, \text{г/см}^3$	$\Delta\rho_1, ^\circ\text{A}$	$\Delta\rho_2, \text{г/см}^3$	$\delta\rho_1, \%$	$\delta\rho_2, \%$
1										X	X
2											
3											
сер.	X	X	X	X	X						

## IV. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

### *Лабораторна робота №9*

**Тема: Вимірювання опору провідників за допомогою містка сталого струму**

**Мета роботи:** ознайомитись з принципом роботи моста Р4833 і визначити опори резисторів

**Матеріали та обладнання:** міст Р4833, набір резисторів, провідники.

### ***I. Теоретичні відомості***

Усі тіла за характером проходження через них електричного струму поділяються на провідники, напівпровідники та діелектрики. До провідників належать метали, які мають полікристалічну структуру – складаються з дрібних хаотично орієнтованих у просторі кристаликів. Будову окремого кристалика можна уявити собі у вигляді величезної кількості елементарних комірок, періодично розміщених у просторі. У вузлах комірок містяться позитивно заряджені іони, які коливаються навколо свого положення рівноваги. Між іонами рухаються вільні електрони. За поведінкою сукупність вільних електронів подібна до ідеального газу, тому її ще називають «електронним газом».

За відсутності електричного поля вільні електрони в металі рухаються хаотично. Якщо до провідника прикласти напругу, то на вільні електрони почне діяти сила Кулона  $F = eE$ , де  $e$  – заряд електрона,  $E$  - величина напруженості електричного поля. Під дією сили Кулона рух електронів стає впорядкованішим – більшість з них починає рухатись проти поля. Таким чином, накладання зовнішнього поля на провідник зумовлює виникнення в ньому електричного струму.

Якщо б у вузлах ґратки не було іонів, швидкість електронів під дією сили Кулона весь час зростала б. Однак у процесі свого руху вільні електрони стикаються з позитивно зарядженими іонами ґратки, віддають їм частину своєї енергії, внаслідок чого швидкість напрямленого руху електронів

зменшується, а метал нагрівається. Протидія з боку іонів кристалічної ґратки напрямленому рухові електронів називається *опором*  $R$  *провідника*. За одиницю вимірювання  $R$  в СІ прийнято Ом. 1 Ом – це опір такого провідника, в якому при напрузі 1 В проходить струм величиною 1 А. Опір залежить від матеріалу та геометричних розмірів провідника. Для провідників циліндричної форми, в яких діаметр поперечного перерізу набагато менший за його довжину  $l$ , величина опору виражається формулою

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

де  $S$  – площа його поперечного перерізу;  $\rho$  – питомий опір. *Питомий опір* – це опір провідника довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>.

Одиниці вимірювання  $\rho$  – Ом·м. Питомий опір залежить тільки від матеріалу та агрегатного стану речовини, з якої виготовлений провідник.

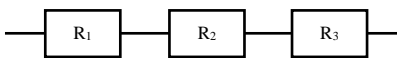
З підвищенням температури опір металів зростає за законом

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (2)$$

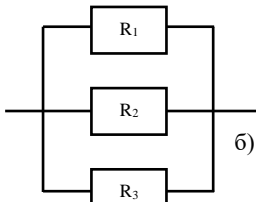
де  $R_0$  – опір металу при температурі 0°C,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору, який дорівнює  $\frac{1}{273}$  К<sup>-1</sup>,  $t$  – температура в °С.

Часто резистори (опори) з'єднують між собою послідовно (рис.1, а) або паралельно (рис.1, б). При послідовному з'єднанні резисторів сумарний опір дорівнює сумі опорів:

$$R_{\text{пос}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (3)$$



а)



б)

Рис. 1

При паралельному з'єднанні сумарний опір визначається з формули:

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (4)$$

На практиці часто доводиться розраховувати електричні кола, які мають розгалуження (вузли). Такі кола називаються розгалуженими. *Вузол* (рис.2) – це будь-яка точка розгалуження кола, у якій збігається не менше трьох провідників.

Розрахунок розгалужених кіл значно полегшується, якщо скористатися правилами Кірхгофа.

Перше правило Кірхгофа (для вузла): алгебраїчна сума струмів  $I_i$ , що збігаються у вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (5)$$

де  $n$  – число струмів, що збігаються у вузлі. При цьому струми, напрямлені до вузла, вважають позитивними, струми, які відходять від вузла, – негативними.

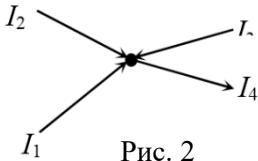


Рис. 2

Застосуємо перше правило Кірхгофа до зображеного на рис.2 вузла:

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0. \quad (6)$$

Друге правило Кірхгофа є узагальненням закону Ома для замкнутого електричного контуру на розгалужені кола і формулюється так: у будь-якому замкнутому довільно вибраному контурі розгалуженого кола алгебраїчна сума добутків сил струмів  $I_i$  на опори  $R_i$  відповідних ділянок контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил  $E_i$  у контурі:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n E_i \quad (6)$$

де  $n$  – кількість окремих ділянок, на які вузли поділяють контур. Усі струми  $I_i$ , напрям яких збігається з напрямом обходу контуру за годинниковою стрілкою, вважають позитивними.  $E_i$  джерел струмів, які створюють струми, співнаправлені з напрямом обходу контуру за годинниковою стрілкою, вважають позитивними.

## II. Опис приладів та методика вимірювання

Є багато способів вимірювання опору провідників. Одним з найбільш поширених і достатньо точних є метод «містка Уінстона», на принципі якого діє Р4833.

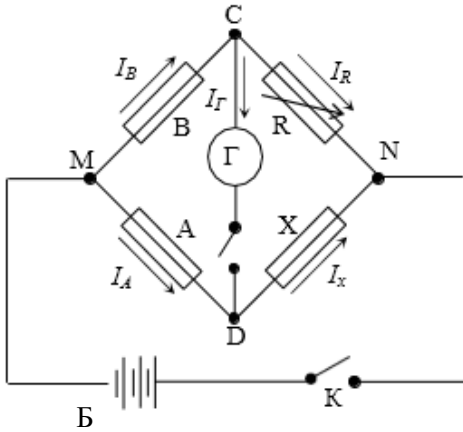


Рис. 3

Принципова схема моста (рис.3) являє собою коло, складене з двох паралельно увімкнених віток MCN і MDN. Вітка MCN складається з двох плечей MC і CN, а вітка MDN - з плеча MD і DN. Плечі утворюють замкнутий чотирикутник. У плечі MD увімкнений резистор з опором  $A$ , у DN – з опором  $X$ , у MC – з опором  $B$ , у CN – зі

змінним опором  $R$ . З чотирьох опорів  $X$  є невідомим. До протилежних вершин моста під'єднується джерело сталого струму  $B$  з електрорушійною силою  $E$  та гальванометр  $\Gamma$ .

Застосуємо перше правило Кірхгофа (5) до вузлів  $C$  і  $D$ :

- для вузла  $C$ :  $I_B - I_\Gamma - I_R = 0$ ; (7)

- для вузла  $D$ :  $I_A + I_\Gamma - I_X = 0$ ; (8)

Застосуємо друге правило Кірхгофа (5) до контурів MCDM і CNDC:

- для контура MCDM:  $I_B B + I_\Gamma R_\Gamma - I_A A = 0$ ; (9)

- для контура CNDC:  $I_R R - I_X X - I_\Gamma R_\Gamma = 0$ ; (10)

Змінюючи опір  $R$ , можна добитися того, що струм через гальванометр не буде проходити. Це буде тоді, коли потенціали точок  $C$  і  $D$  однакові. Рівняння (7) – (10) будуть мати такий вигляд:

$$I_B = I_R; \quad (7') \quad I_B B = I_A A; \quad (9')$$

$$I_A = I_X; \quad (8') \quad I_R R = I_X X; \quad (10')$$



Врахувавши (7') та (8'), поділимо (9') на (10'):  $\frac{B}{R} = \frac{A}{X}$ ,

звідки

$$X = \frac{A}{B} R \quad (11)$$

Формула (11) є робочою для розрахунку невідомого опору  $X$  за допомогою моста Р4833.

### **III. Порядок виконання роботи**

1. Установити всі декадні перемикачі на «0» та відпустити всі кнопки моста.
2. Під'єднати резистор  $R_1$  до клем  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$ .
3. Натиснути кнопки «Г», «БМ», «МО-2», «Z».
4. Ручкою відношення плечей А/В встановити множник діапазону напроти поділки зі значенням 1.
5. Повертанням ручки декадних перемикачів при натиснутій кнопці , а потім при натиснутій кнопці  встановити стрілку гальванометра на «0» шкали. При необхідності змінити значення множника діапазону. За формулою (11) обчислити опір резистора  $R_1$ .
6. Виміряти опори резисторів  $R_2$  та  $R_3$  та послідовне і паралельне з'єднання опорів  $R_1, R_2, R_3$  згідно з п.5.
7. За класом точності  $\gamma$  приладу (для моста Р4833  $\gamma = 0,5$ ) і граничним значенням приладу на даному діапазоні визначити абсолютну та відносну похибки
$$\Delta X_0 = \frac{\gamma \cdot X_{гр}}{100 \%}; \quad \delta X_0 = \frac{\Delta X_0}{X} \cdot 100 \%$$
8. Обчислити опір паралельного  $X_{пар}$  та послідовного  $X_{пос}$  з'єднань за формулами (3) та (4), відповідно.
9. Результати вимірювань і обчислень записати у звітну таблицю.

### **IV. Контрольні питання**

1. Що таке електричний струм?
2. Що таке опір провідника?
3. У якому випадку опір провідника дорівнює 1 Ом?
4. Що таке питомий опір провідника?
5. Запишіть формулу залежності опору провідника від температури.
6. За якою формулою обчислюється залежність опору провідника від геометричних розмірів?

7. Чому дорівнює сумарний опір послідовного з'єднання опорів?
8. Чому дорівнює сумарний опір паралельного з'єднання опорів?
9. Сформулюйте і запишіть перше правило Кірхгофа.
10. Сформулюйте і запишіть друге правило Кірхгофа.
11. Намалюйте і поясніть принципову схему моста Р4833.
12. Як записується перше правило Кірхгофа для вузлів С і D?
13. Як записується друге правило Кірхгофа для контурів MCDM і CNDC?
14. Виведіть розрахункову формулу для невідомого опору X.

Звітна таблиця

	$A/B,$ --	$R,$ Ом	$X,$ Ом	$\Delta X,$ Ом	$\delta X,$ %	$X_{\text{пос}},$ Ом	$X_{\text{пар}},$ Ом
1						X	X
2						X	X
3						X	X
пос.							X
пар.						X	



Тема: **Визначення параметрів трансформатора**

**Мета роботи:** ознайомитися з будовою трансформатора, навчитися обчислювати коефіцієнт трансформації і коефіцієнт корисної дії трансформатора.

**Матеріали та обладнання:** однофазний трансформатор, два амперметри, два вольтметри, реостат, вимикач, з'єднувальні провідники.

**1. Теоретичні відомості**

Трансформатор – це електромагнітний прилад, який служить для перетворення змінної напруги і сили струму при незмінній частоті.

Трансформатор складається із замкнутого осердя, виготовленого з м'якої сталі або феромагнетика і складеного з окремих ізольованих один від одного листів для ослаблення вихрових струмів, на якому є дві ізольовані одна від одної котушки (їх називають обмотками) з різним числом витків. Первинну обмотку вмикають у мережу змінного струму. Обмотка, до якої під'єднуються споживачі, називається вторинною.

Струм у первинній обмотці створює в осерді змінний магнітний потік, який наводить однакову е.р.с. індукції  $\varepsilon_i$  в кожному витку обох обмоток:  $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ . Якщо первинна обмотка має  $n_1$ , а вторинна  $n_2$  витків, то е.р.с. індукції в обмотках прямо пропорційна числу витків у них:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1)$$

При розімкнутому колі вторинної обмотки («холостий» хід трансформатора) напруга  $U_2$  на її затискачах дорівнює е.р.с.  $\varepsilon_2$ . У первинній обмотці при цьому проходить слабкий струм  $I_0$ , який називають струмом «холостого» ходу. Оскільки спад напруги на опорі обмотки дуже малий, то напруга  $U_1$  буде трохи більша за е.р.с.  $\varepsilon_1$ , але практично  $U_1 = \varepsilon_1$ .

Отже, в процесі «холостого» ходу трансформатора напруги на обмотках прямо пропорційні числу витків обмоток:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (2)$$

Якщо число витків у вторинній обмотці  $n_2$  більше, ніж у первинній  $n_1$ , то трансформатор називають підвищувальним за напругою, а якщо  $n_2$  менше, ніж  $n_1$  – знижувальним. З (2) слідує, що для знижувального трансформатора сила струму у вторинній обмотці більша, ніж у первинній, тому такі трансформатори використовують при електрозварюванні. Підвищувальні трансформатори застосовують при передачі електричної енергії на великі відстані у лініях електропередач. Відношення числа витків вторинної обмотки до числа витків первинної обмотки називають коефіцієнтом трансформації:

$$k = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (3)$$

Отже,  $k$  підвищувального трансформатора більше за одиницю, а знижувального – менше за одиницю.

Якщо коло вторинної обмотки замикають (робочий хід трансформатора), то струм вторинної обмотки  $I_2$  створює в осерді магнітний потік, напрямлений назустріч потоку первинної обмотки. Тому струм у ній зростає до такого значення  $I_1$ , при якому її магнітний потік скомпенсує зустрічний потік вторинної котушки, і результуючий потік в осерді буде попереднім.

Оскільки магнітний потік котушки пропорційний числу її витків і струму, можна наближено вважати, що  $I_1 n_1 = I_2 n_2$  (насправді  $I_1 n_1$  трохи більше від  $I_2 n_2$ ). Звідси

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (4)$$

тобто сила струму в обмотках обернено пропорційна числу витків.

У трансформаторі існують незначні втрати енергії, тому його коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) менший за одиницю.

Коефіцієнтом корисної дії трансформатора називається відношення кількості енергії  $W_2$ , яку вторинна обмотка віддає споживачу, до кількості енергії  $W_1$ , яка підводиться до первинної обмотки:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

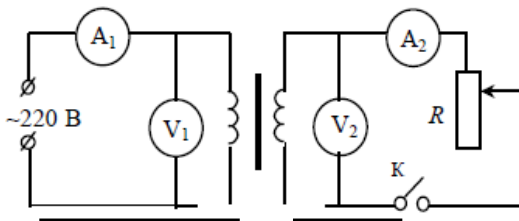
Енергію можна виразити через потужність  $P$  та час  $t$ :  $W = Pt$ . Тоді

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

Отже, к.к.д. трансформатора дорівнює відношенню корисної потужності  $P_2$  до потужності  $P_1$ , яку споживає трансформатор з електричної мережі.

## II. Опис приладів та методика вимірювання

Параметри трансформатора можна визначити за допомогою установки, електрична схема якої зображена на рис.1, де  $A_1$  і  $V_1$  – амперметр і вольтметр для вимірювання сили струму і напруги у



первинному колі,  $A_2$  і  $V_2$  – амперметр і вольтметр для визначення сили струму і напруги у вторинному колі,  $K$  – ключ,  $R$  – реостат.

Рис. 1

## III. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло за схемою рис.1.
2. Визначити класи точності всіх вимірювальних приладів, граничні значення вимірюваної величини та обчислити абсолютні похибки амперметрів та вольтметрів відповідно за такими формулами:

$$\Delta I = \frac{I_{гр} \delta I_{зв}}{100 \%}; \quad \Delta U = \frac{U_{гр} \delta U_{зв}}{100 \%}$$

3. Після перевірки кола викладачем при розімкненому вимикачі виміряти напругу на первинній і вторинній обмотках трансформатора і записати їх значення в табл.1.
4. Обчислити коефіцієнт трансформації

$$k_0 = \frac{U_2}{U_1}, \quad (7)$$

відносну похибку

$$\delta k_0 = \left( \frac{\Delta U_{2_0}}{U_{2_0}} + \frac{\Delta U_{1_0}}{U_{1_0}} \right) \cdot 100 \%, \quad (8)$$

середню абсолютну похибку

$$\Delta k_0 = \frac{k_0 \delta k_0}{100 \%}. \quad (9)$$

5. Реостат  $R$  увімкнути на повний опір і замкнути коло вторинної обмотки. Записати покази вимірювальних приладів в табл.2.
6. Замкнути коло вторинної обмотки. Поступово зменшити опір навантаження вторинної обмотки реостатом  $R$  і записати покази вимірювальних приладів.
7. Дослід провести сім разів.
8. Обчислити значення к.к.д. трансформатора для кожного значення навантаження вторинної обмотки за формулою:

$$\eta_0 = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \cdot 100 \%. \quad (10)$$

9. Для найбільшого і найменшого навантаження обчислити відносну похибку

$$\delta \eta_0 = \left( \frac{\Delta I_2}{I_2} + \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta U_1}{U_1} \right) \cdot 100\% \quad (11)$$

і абсолютну похибку:

$$\Delta \eta_0 = \frac{\eta_0 \delta \eta_0}{100} \quad (12)$$

10. Дані та результати обчислень записати у звітні таблиці.
11. Побудувати графік залежності к.к.д. трансформатора  $\eta$  від величини струму навантаження  $I_2$  ( $\eta = f(I_2)$ ).

#### ***IV. Контрольні питання***

1. Що таке трансформатор?
2. З яких елементів складається трансформатор?
3. Яка обмотка трансформатора називається первинною?
4. Яку е.р.с. індукції наводить струм у первинній котушці?
5. Який режим роботи трансформатора називається «холостим»?
6. Що таке коефіцієнт трансформації?
7. Який трансформатор називається підвищувальним?
8. Який режим роботи трансформатора називається робочим?
9. Що таке к.к.д. трансформатора?

10. За якою формулою можна обчислити к.к.д. трансформатора?

Звітна таблиця 1.

$U_1,$ В	$\Delta U_1,$ В	$U_2,$ В	$\Delta U_2,$ В	$k$ -	$\Delta k$ -	$\delta k,$ %

Звітна таблиця 2.

№ з.п.	$I_1$	$\Delta I_1$	$U_1$	$\Delta U_1$	$I_2$	$\Delta I_2$	$U_2$	$\Delta U_2$	$\eta$	$\Delta \eta$	$\delta \eta$
	А	А	В	В	А	А	В	В	%	%	%
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											

## Лабораторна робота №11

Тема: **Визначення індуктивного опору соленоїда**

**Мета роботи:** визначити індуктивний опір соленоїда, а також вплив металевих осердь на величину індуктивного опору.

**Матеріали та обладнання:** соленоїд, амперметр, вольтметр, два реостати, вимикач, набір металевих осердь, з'єднувальні провідники.

### 1. Теоретичні відомості

При проходженні змінного струму через контур змінюється магнітний потік навколо цього контура і в ньому виникає електрорушійна сила (е.р.с.) індукції. Виникнення е.р.с. індукції в колі внаслідок зміни в ньому струму називається явищем самоіндукції. Е.р.с. самоіндукції створює індукційний струм, який за законом Ленца протидіє зміні струму в колі: сповільнює його зростання або зменшення. Величина е.р.с. самоіндукції  $\varepsilon_c$  пропорційна швидкості зміни струму  $\frac{dI}{dt}$  в провіднику і визначається за формулою

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

де  $L$  – індуктивність контуру.

Одиниця індуктивності називається генрі (Гн). Генрі – це індуктивність провідника, в якому при зміні сили струму на 1А за 1с виникає е.р.с. самоіндукції 1В.

Індуктивність залежить від форми і розмірів контуру, а також від середовища, в яке він поміщений. Індуктивність лінійних провідників мала. Велику індуктивність мають соленоїди – котушки циліндричної форми з дроту, витки яких намотані в одному напрямі. Для безмежно довгого соленоїда індуктивність визначається за формулою:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V,$$

де  $n$  – число витків на одиницю довжини соленоїда;  $V$  – об'єм соленоїда;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна сила;  $\mu$  – відносна магнітна проникність середовища, яка має великі числові значення для феромагнітних матеріалів (залізо, кобальт, нікель тощо).

Опір соленоїда постійного струму називається активним опором. Він залежить лише від матеріалу, з якого виготовлений провідник та його геометричних розмірів. Якщо соленоїд увімкнути в коло змінного струму, то внаслідок періодичної зміни струму виникає е.р.с. самоіндукції, яка протидіє прикладеній до соленоїда напрузі. В результаті цього його опір зростає. Отже, в колі змінного струму соленоїд матиме крім активного опору  $R_0$ , ще й індуктивний опір  $R_L$ . У замкнутому колі змінного струму ці опори додаються (рис.1, а).

Нехай до кінця обмотки соленоїда прикладено напругу, яка змінюється за косинусоїдальним законом:

$$U_L = U_m \cos \omega t,$$

де  $U_m$  – амплітудне значення напруги;  $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$  – циклічна частота;  $T$  – період коливань;  $f$  – частота.

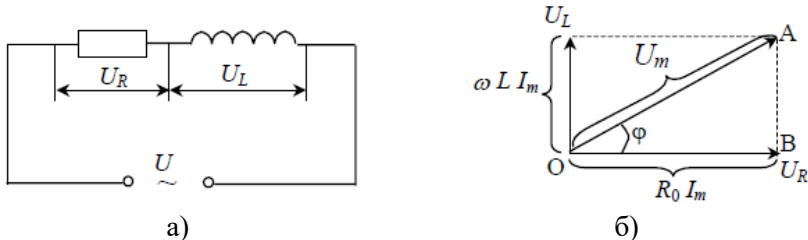


Рис. 1

Відповідно до другого закону Кірхгофа, прикладена до електричного кола напруга дорівнює сумі спадів напруг на активному ( $R_0$ ) та індуктивному ( $R_L$ ) опорах. Спад напруги на активному опорі дорівнює  $IR_0$ , а на індуктивному -  $L \frac{dI}{dt}$ . Тому

$$U_m \cos \omega t + IR_0 - L \frac{dI}{dt} = 0, \quad (2)$$

Із (2) випливає, що (при  $R_0 = 0$ )

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = U_m \cos \omega t, \quad (3)$$

тому

$$dI = \frac{1}{L} U_m \cos \omega t dt, \quad (4)$$

Проінтегрувавши (4)

$$\int_0^I dI = \frac{1}{L} \int_0^t U_m \cos \omega t dt, \quad (5)$$

отримаємо

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (6)$$

де  $I_m = U_m / (\omega L)$ . Тоді за аналогією з законом Ома для ділянки кола величину

$$R_L = \omega L = 2\pi f L \quad (7)$$

називають індуктивним опором. З рівняння (7) випливає, що на сталому струмі індуктивний опір котушки дорівнює нулю.

Підставивши (6) у (3), отримаємо

$$U_L = \omega L I_m \cos \omega t. \quad (8)$$

Порівняння виразів (6) та (8) приводить до висновку, що падіння напруги  $U_L$  випереджає за фазою струм  $I$ , який проходить через котушку, на  $\pi/2$ , що й показано на векторній діаграмі (рис.1, б). При активному опорі  $R \neq 0$ , амплітуда  $U_m$  прикладеної напруги повинна дорівнювати сумі амплітуд спадів напруг на активному  $R$  та індуктивному опорах. Як бачимо з векторної діаграми (рис.1, б), кут  $\varphi$  визначає різницю фаз між напругою та силою струму:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R_0}. \quad (9)$$

Із прямокутного трикутника ОАВ отримаємо

$$(R_0 I_m)^2 + (\omega L I_m)^2 = U_m^2. \quad (10)$$

З (10) знайдемо амплітудне значення сили струму

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_0^2 + (\omega L)^2}}. \quad (11)$$

Величина

$$Z = \sqrt{R_0^2 + (\omega L)^2}. \quad (12)$$

називається повним опором (імпедансом) кола. З рівняння (12) знайдемо індуктивність  $L$ :

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_0^2}}{2\pi f}. \quad (13)$$

Амплітудне значення сили струму (11), враховуючи (12), можна подати у наступному вигляді:



$$I_m = \frac{U_m}{Z}. \quad (14)$$

Амперметри і вольтметри вимірюють ефективні (середні за період коливань) значення сили струму  $I_{\text{еф}}$  і напруги  $U_{\text{еф}}$ , які зв'язані амплітудними ( $I_m$  і  $U_m$ ) співвідношеннями:

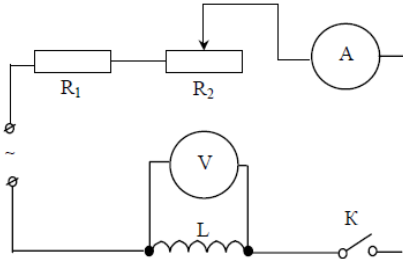


Рис. 2

$$\begin{aligned} I_m &= \sqrt{2}I_{\text{еф}}; \\ U_m &= \sqrt{2}U_{\text{еф}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Ефективна сила (напруга) змінного струму дорівнює силі (напрузі) постійного струму, який має таку ж потужність, що і даний змінний струм.

Враховуючи співвідношення (15), формулу (14) можна записати у наступному вигляді:

$$Z = \frac{U_{\text{еф}}}{I_{\text{еф}}}. \quad (16)$$

## II. Опис приладів та методика вимірювання

Індуктивний опір соленоїда визначається за допомогою електричного кола, схема якого представлена на рис.2, де  $R_1$  і  $R_2$  – реостати, А – амперметр, V – вольтметр, К – вимикач, L – соленоїд.

## III. Порядок виконання роботи

1. Частотоміром визначити частоту змінного струму  $f$  в електричній мережі.
2. Зібрати електричне коло за схемою рис.2. Після перевірки кола викладачем, увімкнути в коло джерело.
3. Замкнути коло вимикачем К. За допомогою реостата  $R_2$  змінити опір кола так, щоб в ньому проходив струм силою 0,55 А. За показами вольтметра визначити ефективний спад напруги на соленоїді. Також ефективні спади напруги на соленоїді виміряти для струмів силою 0,65 і 0,75 А. Результати вимірювань занести в звітну таблицю.
4. Значення  $R_0$  вказано на соленоїді.

- За формулою (16) обчислити повні опори  $Z$  для заданих значень сил струмів і вимірних спадів напруги на соленоїді.
- За формулою (13) для трьох значень  $Z$  визначити індуктивність соленоїда  $L$ . Знайти середнє значення  $L_0$ :

$$L_0 = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (17)$$

та середню абсолютну похибку:

$$\Delta L_0 = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3}{3}. \quad (18)$$

- За формулою (7) користуючись середнім значенням індуктивного опору  $L_0$  обчислити індуктивний опір.
- Обчислити середню відносну похибку:

$$\delta R_{L_0} = \left( \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta f_0}{f_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} \right) \cdot 100\% \quad (19)$$

та абсолютну похибку:

$$\Delta R_L = \frac{R_{L_0} \delta R_L}{100\%}. \quad (20)$$

- Кінцевий результат записати у вигляді

$$R_L = (R_{L_0} \pm \Delta R_L) \text{ Ом.} \quad (21)$$

- В отвір соленоїда вставити залізне осердя. При силах струму 0,45; 0,55; 0,65 А згідно з пунктами 3-8 визначити індуктивність  $L_3$  та індуктивний опір  $R_{L_3}$  соленоїда.
- Визначити, у скільки разів індуктивний опір соленоїда з залізним осердям  $R_{L_3}$  більший від індуктивного опору соленоїда без залізного осердя  $R_L$ .
- Результати вимірювань і обчислень записати у звітну таблицю.

#### ***IV. Контрольні питання***

- У якому випадку в контурі наводиться е.р.с. індукції?
- Що таке явище самоіндукції?
- За якою формулою визначається е.р.с. самоіндукції?
- У якому випадку індуктивність котушки дорівнює 1 Гн?
- Яка будова соленоїда?
- За якою формулою визначається індуктивність безмежно довгого соленоїда?

7. Якою формулою виражається другий закон Кірхгофа для замкнутого кола з активним та індуктивним опорами?
8. За якою формулою визначають індуктивний опір?
9. Що таке ефективна сила струму і як вона зв'язана з амплітудним значенням сили струму?
10. За якою формулою знаходиться індуктивність соленоїда?

Звітні таблиці.

Без залізного осердя												
№ з.п.	$I$ , А	$U$ , В	$f$ , Гц	$\Delta f$ , Гц	$Z$ , Ом	$L$ , Гн	$\Delta L$ , Гн	$\pi$ -	$\Delta \pi$ -	$R_L$ , Ом	$\Delta R_L$ , Ом	$\delta R_L$ , %
1												
2												
3												
сер.												

№ з.п.	$I$ , А	$U$ , В	$Z$ , Ом	$L$ , Гн	$\Delta L$ , Гн	$R_{L_3'}$ , Ом	$\Delta R_{L_3'}$ , Ом	$\delta R_{L_3'}$ , %	$\frac{R_{L_3'}}{R_L}$
1									
2									
3									
сер.									

**Тема: Визначення параметрів індукційного лічильника енергії змінного струму**

**Мета роботи:** ознайомитися з будовою лічильника електричної енергії та визначити параметри, що його характеризують.

**Матеріали та обладнання:** індукційний лічильник електричної енергії, вольтметр, міліамперметр, реостат, ламповий реостат, секундомір, з'єднувальні провідники.

***1. Теоретичні відомості***

Електричний лічильник – це прилад для обліку використаної за певний час електричної енергії. Лічильник змінного струму побудований на індукційному принципі. Індукційними називаються вимірювальні прилади, переміщення рухомої частини яких здійснюється внаслідок взаємодії змінних магнітних потоків зі струмами, наведеними ними, в активному елементі рухомої частини.

Індукційний лічильник складається з рухомого алюмінієвого диска, постійного гальмівного магніту, двох електромагнітів, лічильного механізму. На осердя одного електромагніту насаджено дві котушки А з товстого дроту і з малою кількістю витків. Ці котушки вмикають в коло сітки послідовно з споживачами електроенергії. На друге осердя насаджена одна котушка В з великою кількістю витків з тонкого ізолюваного дроту, яку вмикають у коло паралельно до споживачів.

При увімкненні індукційного лічильника в коло змінного струму по котушках А проходить струм  $I_1$ , унаслідок чого в електромагніті створюється змінний магнітний потік  $\Phi_I$ , пропорційний струмові  $I_1$ . Цей потік, пронизуючи у двох місцях диск лічильника, індукуватиме в диску вихрові струми Фуко  $i_1$ .

При напрузі  $U$  по обмотці котушки В буде проходити струм  $I_2$ , унаслідок чого виникає магнітний потік  $\Phi_U$ , пропорційний до напруги. При зміні цього потоку, що перетинає диск, в останньому індукуються вихрові струми  $i_2$ . В результаті взаємодії вихрових струмів  $i_1$  і  $i_2$  з магнітними потоками  $\Phi_U$  та

$\Phi_I$ , створюється результуючий обертовий момент  $M_{об}$ , який пропорційний активній потужності  $P$ , витраченій в колі:

$$M_{об} = k_{об}P, \quad (1)$$

де,  $k_{об}$  – коефіцієнт пропорційності.

Під впливом обертового моменту диск лічильника обертається, причому швидкість обертання збільшується доти, доки обертовий момент не зрівноважиться гальмівним моментом, який діє на диск.

Гальмівний момент створюється взаємодією магнітного потоку постійного магніту зі струмами Фуко завдяки обертанню диска в полі постійного магніту. Гальмівний момент  $M_{Г}$  пропорційний швидкості обертання диска (числу обертів диска за 1 с):

$$M_{Г} = k_{Г}n, \quad (2)$$

де  $k_{Г}$  – коефіцієнт пропорційності.

При сталій швидкості обертання диска обертовий і гальмівний моменти рівні між собою, а саме:

$$M_{об} = M_{Г}, \quad (3)$$

або з урахуванням співвідношень (1) та (2):

$$P = \frac{k_{Г}}{k_{об}} n. \quad (4)$$

Помноживши обидві частини рівняння (4) на час  $t$  і позначивши  $k = \frac{k_{Г}}{k_{об}}$ , одержимо, що витрачена енергія пропорційна числу обертів диска за час  $t$  споживання енергії:

$$W = kN, \quad (5)$$

де  $W = Pt$  – використана енергія;  $N = nt$  – число обертів диска лічильника за час  $t$ ;  $k$  – стала лічильника. Відлік числа обертів диска здійснюється за допомогою лічильного механізму, що приводиться в дію від черв'ячної передачі.

Електричний лічильник характеризується такими параметрами: чутливістю, порогом чутливості, номінальною сталою, дійсною сталою.

Чутливістю лічильника  $\xi$  називається відношення струму  $I_0$ , при якому диск здійснює один оберт за 1 хв, до номінального струму  $I_N$ , який зазначений на лицевій панелі лічильника (виражається у відсотках):

$$\xi = \frac{I_0}{I_H} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Поріг чутливості – це мінімальне навантаження (виражене у відсотках від номінального), при якому рухома частина починає без зупинки обертатись.

Номінальною сталою  $k_H$  лічильника називається кількість енергії, яка відповідає одному оберту диска. На лицевій панелі лічильника вказано число обертів диска  $N_H$ , що відповідає використаній енергії  $W_H$ . Тоді

$$k_H = \frac{W_H}{N_H} \quad (7)$$

Через наявність властивих індукційним вимірювальним механізмам похибок, зокрема, похибок від тертя і додаткових гальмівних моментів, що виникають у результаті перетину диском потоків  $\Phi_U$  і  $\Phi_I$ , дійсна стала лічильника дещо відрізняється від номінальної.

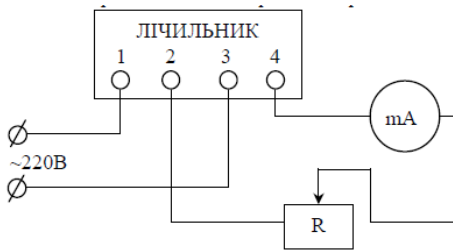


Рис. 1

де  $I$  – струм;  $U$  – напруга в колі;  $N$  – кількість обертів за час  $t$ .  
Відносна похибка лічильника дорівнює

$$\delta k = \frac{k_g - k_H}{k_g} 100 \% \quad (9)$$

Дійсною сталою лічильника називається кількість енергії, яка реально витрачається в електричній мережі за час одного оберту диска:

$$k_g = \frac{IU_t}{N}, \quad (8)$$

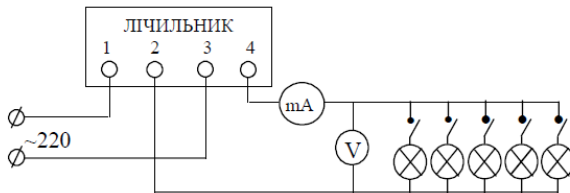


Рис. 2

## **II. Опис приладів і методика вимірювань**

Для визначення чутливості лічильника використовується установка, електрична схема якої зображена на рис.1.

Дійсна стала лічильника визначається за допомогою установки, електрична схема якої показана на рис.2.

## **III. Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитись з будовою лічильника.
2. Визначити з лицевої панелі приладу значення номінального струму  $I_n$ .
3. Зібрати електричне коло за схемою, зображеною на рис.1.
4. Виставити реостат  $R$  на максимальне значення опору.
5. Після перевірки кола викладачем встановити реостатом таку силу струму  $I_0$ , при якій диск лічильника здійснює оберт за 1 хв.
6. За формулою (6) визначити чутливість лічильника.
7. Визначити з лицевої панелі приладу число обертів диска  $N_n$ , що відповідає витраченій енергії  $W_n$ .
8. За формулою (7) визначити номінальну сталу лічильника.
9. Зібрати електричне коло за схемою, наведеною на рис.2.
10. Після перевірки кола викладачем замкнути коло й увімкнути 2 лампочки. Визначити час  $t$  десятих обертів диска і записати значення струму  $I$  та напруги  $U$ .
11. Збільшити навантаження кола, поступово вмикаючи 3, 4, 5 лампочок. Записати при кожному навантаженні час  $t$  десяти обертів диска і значення струму  $I$  і напруги  $U$ .
12. Обчислити за формулою (8) значення дійсної сталої лічильника при кожному навантаженні.
13. Обчислити за формулою (9) відносну похибку  $\delta k$  сталої лічильника.
14. Результати вимірювань і обчислень записати у звітні таблиці 1 та 2.

## **IV. Контрольні питання**

1. Які вимірювальні механізми називаються індукційними?
2. З яких частин складається лічильник?
3. Як визначається обертовий момент, що діє на диск?
4. Чим створюється гальмівний момент?
5. Що таке чутливість лічильника?

6. Що таке поріг чутливості лічильника?
7. За якою схемою визначається чутливість лічильника?
8. Що таке номінальна стала лічильника?
9. Що таке дійсна стала лічильника?
10. За якою формулою обчислюється дійсна стала лічильника?

Звітна таблиця 1.

$I_0,$ А	$I_H,$ А	$\xi,$ %	$W_H,$ Дж	$N_H,$ об.	$k_H,$ Дж/об.

Звітна таблиця 2.

№ з.п.	$I,$ А	$U,$ В	$N,$ об.	$t,$ с	$k_g,$ Дж/об.	$\delta k,$ %
1						
2						
3						
4						



## V. ОПТИКА. АТОМНА ТА СУБАТОМНА ФІЗИКА

### Лабораторна робота №13

**Тема:** Визначення довжини електромагнітної хвилі за допомогою двопровідникової лінії

**Мета роботи:** навчитися визначати довжину електромагнітної хвилі за допомогою двопровідникової лінії.

**Матеріали та обладнання:** ламповий генератор, двопровідникова лінія, контрольна лампочка, масштабна лінійка, шкала.

#### I. Теоретичні відомості

Електромагнітна хвиля являє собою процес поширення змінного електромагнітного поля у просторі. Це один з особливих видів рухомої матерії, який існує незалежно від електричних зарядів.

Хвиля характеризується довжиною  $\lambda$ , швидкістю  $v$ , інтенсивністю  $I$ . Швидкість електромагнітної хвилі дорівнює:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}}, \quad (1)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість хвилі у вакуумі;  $\mu$  - відносна магнітна проникність речовини, а  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність речовини. Швидкість поширення світлової хвилі в середовищі характеризує абсолютний показник заломлення  $n$ :  $n = \frac{c}{v}$ .

Інтенсивністю хвилі  $I$  називається фізична величина, що чисельно дорівнює середній енергії, яку переносить хвиля за одиницю часу крізь одиницю площі поверхні, перпендикулярно до напрямку поширення хвилі. Одиниця вимірювання Вт/м<sup>2</sup>.

$$I = \frac{\langle E \rangle}{tS} = \frac{\langle E \rangle}{tSv} v = \frac{\langle E \rangle}{V} v = \omega v, \quad (2)$$

де  $V = tSv$  – об'єм, який займає поле;  $\omega = \frac{\langle E \rangle}{V}$  – об'ємна густина енергії електромагнітного поля.

У векторній формі формула (2) має наступний вигляд:

$$\vec{I} = \omega \vec{v}. \quad (3)$$

Вектор  $\vec{I}$ , який показує напрям поширення хвилі і чисельно дорівнює її інтенсивності, називається вектором Умова-Пойнтінга.

Електромагнітні хвилі мають дуалістичний характер, тобто їм притаманні корпускулярні та хвильові властивості одночасно. Чим більша довжина хвилі, тим чіткіше проявляються хвильові властивості світла. До явищ, у яких проявляється хвильова природа світла, належать інтерференція, дифракція, поляризація. Чим коротша довжина хвилі, тим чіткіше проявляються квантові (корпускулярні) властивості електромагнітних хвиль. Явищами, в яких проявляється корпускулярна природа світла, є фотоефект, теплове випромінювання і люмінесценція тощо.

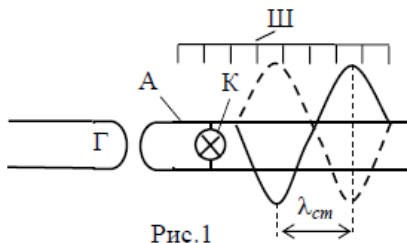
Шкала довжин електромагнітних хвиль включає:

1. радіодіапазон від  $\lambda = 10$  км до  $\lambda = 0,1$  мм;
2. інфрачервоний (тепловий) діапазон - від  $\lambda = 1 - 2$  мм до  $\lambda = 780$  нм;
3. видимий діапазон - від  $\lambda = 400$  нм до  $\lambda = 780$  нм;
4. ультрафіолетовий діапазон - від  $\lambda = 400$  нм до  $\lambda = 50$  нм;
5. рентгенівський діапазон - від  $\lambda = 0,01$  нм до  $\lambda = 10$  нм.

Електромагнітні хвилі різних діапазонів по-різному взаємодіють з речовиною.

## ***II. Опис приладів і методика вимірювання***

Для вимірювання довжини електромагнітної хвилі в діапазоні ультракоротких хвиль застосовують установку, схема якої зображена на рис.1. Вона складається з генератора високочастотних коливань Г, системи двох паралельних провідників (двопровідникова лінія) індуктивно зв'язаних з генератором; контрольної лампочки К з ковзним контактом; масштабної шкали Ш. Уздовж такої двопровідникової лінії, яка служить направляючою для поширення електромагнітного поля, поширюється електромагнітна хвиля. Доходячи до кінця лінії, електромагнітна хвиля відбивається (якщо лінія не замкнута). Біжуча та відбита хвилі когерентні. Накладаючись одна на одну, тобто інтерферуючи, вони утворюють стоячу електромагнітну



хвилю з довжиною хвилі  $\lambda_{ст}$ . Якщо дві системи електромагнітних коливань однакового періоду поширюються по провіднику в протилежних напрямках, то довжина стоячої електромагнітної хвилі  $\lambda_{ст}$  удвічі менша від довжини біжучої хвилі:

$$\lambda_{ст} = \lambda/2.$$

Точки, в яких величина змінного струму максимальна називаються *пучностями*, а точки, в яких величина струму мінімальна, – *вузлами струму*. Фази напруги і струму в стоячій хвилі відрізняються на  $\pi/2$ , тому вузлам напруги відповідають пучності струму і навпаки. Через це електрична лампочка К (див. рис.1) яскраво світиться в місці, де стояча хвиля має пучність струму (вузол напруги), і не світиться у вузлах струму (пучностях напруги).

### III. Порядок виконання роботи

1. Увімкнути генератор у мережу з напругою 220 В.
2. Пересуваючи електричну лампочку вздовж двопровідникової лінії, знайти положення  $l_k$  і кількість максимумів  $k$ , які містяться на ній (максимуми будуть у місцях найяскравішого свічення лампочки).
3. Визначити довжину стоячої хвилі за формулою  $\lambda = \frac{l_k - l_1}{k - 1}$ .
4. Обчислити середнє значення  $\lambda_0$ , середню абсолютну  $\Delta\lambda_0$  і середню відносну  $\delta\lambda_0$  похибки.
5. Результати вимірювань та обчислень записати у звітну таблицю.

### IV. Контрольні питання

1. Що таке електромагнітна хвиля?
2. За якою формулою обчислюється швидкість поширення електромагнітної хвилі в діелектричній речовині?
3. Запишіть формулу швидкості поширення електромагнітної хвилі через показник заломлення речовини.
4. Що таке інтенсивність хвилі?

5. За якою формулою обчислюється вектор Умова-Пойнтінга?
6. У яких явищах проявляється хвильова природа світла?
7. У яких явищах проявляється корпускулярна природа світла?
8. Як утворюється стояча хвиля?
9. Що таке пучності стоячої хвилі?
10. Що таке вузли стоячої хвилі?

Звітна таблиця.

№ з.п.	$k$ , -	$l_l$ , м	$l_k$ , м	$\lambda$ , м	$\Delta\lambda$ , м	$\delta\lambda$ , -
1		X				X
2						
3						
4						
5						
сер.	X		X			

**Тема: Визначення збільшення мікроскопа та розмірів клітини**

**Мета роботи:** вивчити будову мікроскопа, навчитись визначати збільшення мікроскопа та вимірювати розміри мікроскопічних об'єктів.

**Матеріали та обладнання:** мікроскоп, окуляр-мікрометр, об'єктивний мікрометр, досліджувана шкала.

**I. Опис приладів і методика вимірювання**

Мікроскоп являє собою оптичну систему (рис.1), що складається із двох збірних лінз, перша з яких розташована біля досліджуваного об'єкта і називається об'єктивом. Об'єктив Об створює дійсне обернене зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$ . У свою чергу зображення  $A_1B_1$  є предметом для другої лінзи – окуляра  $Ok$ . Окуляр діє як лупа, тобто дає уявне та збільшене зображення  $A_2B_2$  предмета  $A_1B_1$ .  $A_2B_2$  міститься на відстані найкращого зору  $S = 25$  см від окуляра  $Ok$ .

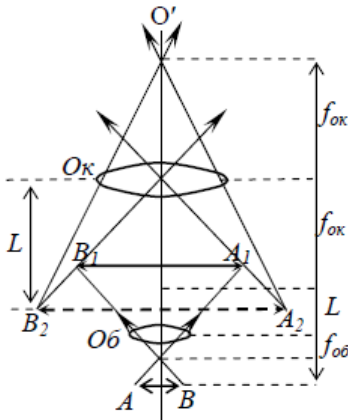


Рис. 1

У сучасних мікроскопах використовуються об'єктиви і окуляри, що складаються з декількох лінз. Біологічний мікроскоп (рис.2) складається з таких основних частин як: 1 – основа; 2 – дзеркало; 3 – діафрагма; 4 – конденсор; 5 – предметний столик; 6 – об'єктив; 7 – револьвер для розташування об'єктивів; 8 – гніздо для похилої монокулярної насадки; 9 – окуляр; 10 – тубусотримач; 11 – ручка грубого фокусування; 12 – мікрометричний механізм точного фокусування.

Об'єктив замінюють за допомогою револьвера. Сучасний біологічний мікроскоп має три комплекти об'єтивів і окулярів. Збільшення окуляра і об'єктива та його числова апертура вказані на оправках окулярів і об'єтивів мікроскопів.

Освітлювальний пристрій мікроскопа складається з дзеркала, конденсора і діафрагми. Дзеркало направляє промені від джерела світла вздовж осі мікроскопа  $OO'$  (рис.1). Воно має плоску та вгнуту поверхню. Вгнута поверхня призначена для кон-

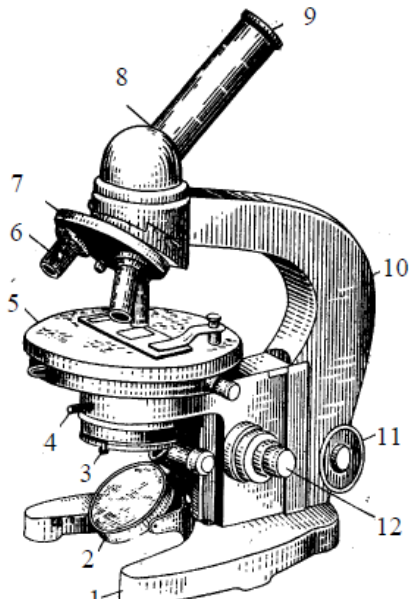


Рис. 2

центрації світла на розглядуваний об'єкт. Застосовують її тоді, коли не використовують конденсор. Конденсор концентрує світло, відбите від плоского дзеркала, в збіжний пучок, напрямлений на розглядуваний предмет.

Якщо розміри досліджуваного об'єкта співмірні з довжиною світлової хвилі  $\lambda$ , то стає помітним явище дифракції світлових хвиль, яке обмежує роздільну здатність мікроскопа  $Z$ . Роздільна здатність мікроскопа  $Z$  – це мінімальна відстань між двома ще розділюваними точками досліджуваного об'єкта:

$$Z = \frac{0,61\lambda}{n \cdot \sin u/2}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  - довжина світлової хвилі, яка падає на предмет;  $n$  – показник заломлення середовища, в якому міститься предмет;  $u$  – апертурний кут (кут між двома крайніми променями конічного світлового пучка, що входить в об'єктив мікроскопа).

Величина  $A = n \cdot \sin u/2$  називається числовою апертурою об'єктива. Якщо об'єкт міститься в повітрі ( $n = 1$ ) і його розміри мікроскопічні, то роздільна здатність дорівнює  $Z = \lambda/2$ .

У випадку візуальних спостережень  $\lambda$  є порядку 500 нм (видима частина спектра). Тому мікроскоп дає можливість розрізнати об'єкти, розміщені один від одного на відстані близько 300 нм. Підвищити роздільну здатність мікроскопа можна, використавши ультрафіолетові промені і збільшуючи його числову апертуру (простір між об'єктом та предметом заповнюють спеціальною імерсійною рідиною, що дає змогу збільшити роздільну здатність в 1,5 рази).

Фокусування мікроскопа, тобто одержання чіткого зображення, здійснюється зміною відстані між об'єктивом та досліджуваним об'єктом. Відношення лінійного розміру зображення предмета  $A_2B_2$  до лінійного розміру предмета  $AB$  називається збільшенням мікроскопа:

$$\gamma = \frac{A_2B_2}{AB}. \quad (2)$$

Якщо лінійні розміри предмета  $AB$  та  $A_2B_2$  виразити через відповідні характеристики оптичної системи мікроскопа, то отримаємо формулу для збільшення мікроскопа:

$$\gamma = \frac{L \cdot S}{f_{ok} f_{ob}}; \quad (3)$$

де  $L$  – оптична довжина тубуса мікроскопа ( $L = 160$  мм);  $S$  – відстань найкращого зору ( $S = 250$  мм);  $f_{ob}$  і  $f_{ok}$  – фокусна відстань об'єктива і окуляра відповідно.

Окуляр-мікромір – це мініатюрна шкала, яка міститься в площині дійсного зображення предмета  $A_2B_2$ . Досліджуваний предмет можна розглядати разом із цією шкалою.

Для градування окуляра-мікретра використовують об'єктивний мікромір. Об'єктивний мікромір – це мініатюрна шкала з відомою ціною поділки  $a_0$ . Нехай після суміщення шкал об'єктивного мікретра та окуляра-мікретра з ціною поділки  $a_1$ , на  $N_0$  поділок об'єктивного мікретра припадає  $N_1$  поділок окуляра-мікретра. Тобто

$$N_0 a_0 = N_1 a_1, \quad (4)$$

звідки

$$a_1 = \frac{N_0}{N_1} a_0. \quad (5)$$

Знаючи ціну поділки окуляра-мікретра  $a_1$  та визначивши число поділок  $N_x$  окуляра-мікретра, які

вкладаються у відповідний розмір препарату, можна обчислити його розмір  $d$ :

$$d = a_1 \cdot N_x. \quad (6)$$

## ***II. Порядок виконання роботи***

1. Встановити освітлення мікроскопа так, щоб поле зору окуляра було рівномірно освітленим.
2. Покласти на предметний столик мікроскопа об'єктивний мікрометрак, щоб поділки його шкали були паралельні до поділок шкали окуляра-мікрометра.
3. Сфокусувати мікроскоп на об'єктивний мікрометр і визначити число поділок  $N_0$  об'єктивного мікрометра, що відповідає числу поділок  $N_1$  окуляра-мікрометра.
4. Задаючись різними значеннями  $N_0$ , знайти відповідні значення  $N_1$ . Обчислити ціну поділки  $a_1$  окуляра-мікрометра за формулою (5).
5. Зняти з предметного столика мікроскопа об'єктивний мікрометр і поставити на його місце досліджуваний об'єкт.
6. Сумістити чітке зображення досліджуваного об'єкта з шкалою окуляра-мікрометра і визначити число поділок  $N_x$ . Обчислити розмір  $d$  досліджуваного об'єкту за формулою (6).
7. Дивлячись в окуляр мікроскопа, і на лінійку з міліметровими поділками, яка розташована на відстані найкращого зору  $S = 250$  мм, визначити кількість поділок  $N_\gamma$  окуляра-мікрометра, які поміщаються між двома (п'ятьма, десятьма) сусідніми поділками лінійки. Обчислити збільшення  $\gamma$  мікроскопа за формулою
$$\gamma = a_1/b_0, \quad \text{де } b_0 = N_\gamma a_1.$$
8. Записати кінцевий результат.
9. Результати обчислень записати у звітну таблицю.

## ***III. Контрольні питання***

1. Яка будова мікроскопа?
2. Як зобразити хід променів у мікроскопі?
3. Що таке роздільна здатність мікроскопа?
4. Як підвищити роздільну здатність мікроскопа?



5. Що таке апертурний кут?
6. За якою формулою обчислюється числова апертура?
7. Що таке об'єктивний мікрометр?
8. Що називається окуляр-мікрометром?
9. Як знайти ціну поділки окуляра-мікрометра?
10. Що називається збільшенням мікроскопа?

Звітна таблиця.

№ з.п.	$N_0$ , под.	$N_1$ , под.	$N_x$ , под.	$N_\gamma$ , под.	$a_0$ , мм	$a_1$ , мм	$\Delta a_1$ , мм	$b_0$ , мм	$\gamma$ , -	$d$ , мм	$\Delta d$ , мм
1					X						
2											
3											
сер.	X	X	X	X							

## Лабораторна робота №15

### Тема: Визначення показника заломлення прозорих твердих тіл за допомогою мікроскопа

**Мета роботи:** оволодіти методикою визначення показника заломлення прозорих твердих тіл.

**Матеріали та обладнання:** мікроскоп, мікромметр, прозора плоскопаралельна пластинка.

#### 1. Теоретичні відомості

У прозорих речовинах світло поширюється з різною швидкістю залежно від їх діелектричних властивостей. На межі поділу таких прозорих середовищ напрям поширення світла змінюється, тобто світловий промінь заломлюється. *Кут падіння*  $\alpha$  – це кут між перпендикуляром, опущеним у точці падіння

променя до межі розділу середовищ і падаючим променем (рис.1). *Кут заломлення*  $\beta$  – це кут між перпендикуляром, опущеним у точці падіння променя до межі розділу середовищ, і заломленим променем (рис.1).

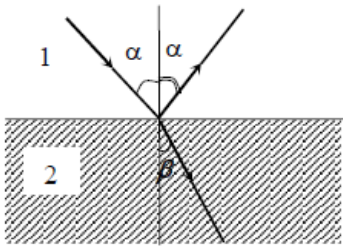


Рис. 1

*Абсолютний показник заломлення* чисельно дорівнює відношенню швидкості  $c$  поширення світла у вакуумі до швид-

кості  $v$  поширення світла у середовищі.

$$n = c/v. \quad (1)$$

*Відносний показник заломлення*  $n_{21}$  другого середовища відносно першого чисельно дорівнює відношенню абсолютних показників заломлення другого та першого середовищ, або відношенню швидкості поширення світла в першому середовищі  $v_1$  до швидкості поширення світла в другому середовищі  $v_2$ :

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (2)$$

Закон заломлення світла формулюється так:

- 1) падаючий, заломлений промені та перпендикуляр до межі поділу середовищ, опущений в точку падіння, містяться в одній площині;
- 2) відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення двох прозорих середовищ є величиною сталою:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21}. \quad (3)$$

Часто вважають, що абсолютний показник заломлення повітря дорівнює 1 (для нашого випадку середовище 1), оскільки швидкість світла у вакуумі близька до швидкості світла в повітрі.

Через те що показник заломлення залежить від довжини хвилі падаючого світла ( $n = f(\lambda)$ ), його прийнято нормувати до лінії натрію Д ( $\lambda = 589,3$  нм) і записувати  $n_D$ . Але часто індекс Д опускають, пам'ятаючи про згадану умову. У таблиці наведено показники заломлення деяких речовин:

Речовина	$n$	Речовина	$n$
повітря	1,000274	бензол	1,501
вода	1,333	флюорит	1,4339
гліцерин	1,470	лід (273 К)	1,310

### II. Опис приладів і методика вимірювання

Знайти  $n$  безпосередньо за кутом падіння  $\alpha$  та кутом заломлення  $\beta$  складно, оскільки кути важко виміряти. Тому в цій

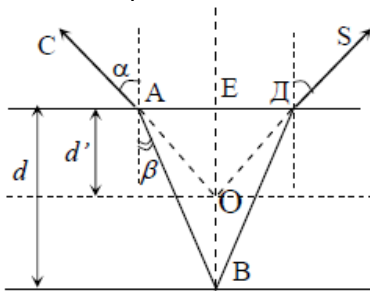


Рис. 2

лабораторній роботі показник заломлення твердої прозорої плоскопаралельної пластинки, крізь яку проходить біле світло, визначається за допомогою мікроскопа та мікрометра. Будова мікроскопа описана у лабораторній роботі № 15.

Розглянемо хід променів у плоскопаралельній пластинці товщиною  $d$ , вертикальний розріз якої подано на рис.2. Нанесемо одну подряпину у вигляді прямої лінії на нижню

поверхню (т. В), а другу – перпендикулярну до неї на верхню поверхню (т. Е). Усі точки цієї подряпини будуть джерелами розсіяних променів, частина з яких потрапляє до об'єктива мікроскопа, розташованого над пластинкою. Нехай два крайні промені АС та ДS, кут розходження яких обмежений розмірами об'єктива, вийшли з т. В, і, заломившись на межі розділу середовищ, потрапляють в об'єктив. Для спостерігача, який дивиться вертикально вниз уздовж нормалі ВЕ, промені АС та ДS перетнуться в т. О – уявному зображенні т. В. Сукупність таких точок дасть уявне зображення подряпини. Отже, уявна товщина пластинки  $d'$ , яку бачимо в мікроскопі, менша за дійсну товщину  $d$ .

Вимірявши за допомогою мікроскопа уявну товщину пластинки  $d'$  та за допомогою мікрометра дійсну товщину  $d$ , можна обчислити відносний показник заломлення пластинки. А саме: з  $\triangle ВДЕ$ :  $ДЕ = ВЕ \cdot tg\beta = d \cdot tg\beta$ ; з  $\triangle ОДЕ$ :  $ДЕ = ОЕ \cdot tg\alpha = d' \cdot tg\alpha$ . Врахувавши, що при малих кутах  $\alpha$  та  $\beta$   $\sin\beta \approx tg\beta$ ,  $\sin\alpha \approx tg\alpha$ , одержимо

$$\frac{d}{d'} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21}. \quad (4)$$

Отже, абсолютний показник заломлення даної прозорої пластинки можна обчислити за формулою

$$n_{21} = \frac{d}{d'}, \quad (5)$$

де  $d$  – дійсна товщина;  $d'$  - уявна товщина пластинки.

### **III. Порядок виконання роботи**

1. Розмістити прозору пластинку на предметному столику мікроскопа так, щоб точка уявного перетину подряпин нижнього та верхнього шарів пластинки перебували в полі зору.
2. За допомогою гвинта грубого фокусування опустити тубус мікроскопа максимально вниз до верхнього шару пластинки. При цьому мікрометричний гвинт повернути за годинниковою стрілкою до упору, а після цього на один оберт назад. Об'єктив мікроскопа не повинен торкатися поверхні пластинки. Спостереження вести

- дивлячись не в окуляр, а збоку, контролюючи відстань між об'єктивом і пластинкою на око.
3. Гвинтом грубого фокусування повільно переміщувати тубус угору доти, доки в окулярі не з'явиться чітке зображення подряпини на нижній поверхні пластинки (т. В). Остаточно чіткість зображення відрегулювати мікрометричним гвинтом і зафіксувати по шкалі барабана відлік.
  4. Мікрометричним гвинтом, повертаючи його проти годинникової стрілки, добитися чіткого зображення подряпини на верхній поверхні пластинки (т. Е). При цьому відрахувати кількість повних обертів барабана  $k$  і поділок  $m$  шкали барабана, які відповідають його неповному оберту. Визначити уявну товщину пластинки за формулою  $d' = (50k + m)0,002$  мм.
  5. Дійсну товщину  $d$  пластинки виміряти мікрометром.
  6. Вимірювання  $d$  та  $d'$  повторити тричі.
  7. Використовуючи середні значення  $d_0$  та  $d'_0$  за формулою (5) обчислити абсолютний показник заломлення пластинки.
  8. Обчислити абсолютні похибки показника заломлення.
  9. Обчислити середню відносну похибку:
 
$$\delta n_{21_0} = \left( \frac{\Delta d_0}{d_0} + \frac{\Delta d'_0}{d'_0} \right) \cdot 100 \% \quad (6)$$
  10. Результати вимірювань та обчислень записати в звітну таблицю.

#### ***IV. Контрольні питання***

1. Що таке кут падіння?
2. Що таке кут заломлення?
3. Як формулюється закон заломлення світла?
4. Що таке абсолютний показники заломлення світла?
5. Що таке відносний показники заломлення світла?
6. Який зв'язок показника заломлення світла зі швидкістю поширення світла в середовищі?
7. За якою робочою формулою визначається показник заломлення світла?
8. Зобразити хід променів у плоскопаралельній пластинці.

9. Яка робоча формула для обчислення відносної похибки показника заломлення світла?

Звітна таблиця.

№ з.п.	$d'$ , <i>мм</i>	$\Delta d'$ , <i>мм</i>	$d$ , <i>мм</i>	$\Delta d$ , <i>мм</i>	$n_{21}$ , -	$\Delta n_{21}$ , -	$\delta n_{21}$ , %
1							X
2							
3							
сер.							

Тема: Перевірка закону Малюса

**Мета роботи:** експериментально перевірити закон Малюса.

**Матеріали та обладнання:** поляроїди, фотоопір, мікроамперметр, освітлювач.

**I. Теоретичні відомості**

*Світлова хвиля* – це поперечна електромагнітна хвиля, яка є сукупністю взаємно перпендикулярних хвиль – електричної та магнітної.

Напрямок поширення світла називається променем. Світло, електричний вектор якого коливається в одній площині, називається поляризованим. Площина, в якій коливається електричний вектор, називається площиною коливань. Площина, в якій коливається магнітний вектор, називається площиною поляризації.

Світло, що випромінюється ізольованим атомом упродовж періоду випромінювання, є поляризованим. Будь-яке реальне джерело світла складається з величезної кількості атомів, що випромінюють світлові хвилі з найрізноманітнішими орієнтаціями площин коливань. Таке світло, в якому будь-який напрямок коливань електричного вектора є рівноймовірним, називається природним.

Відомо, що фізіологічна, фотохімічна, фотоелектрична та інші дії світла зумовлені коливаннями електричного вектора. Тому прийнято говорити про світловий вектор, маючи на увазі вектор напруженості електричного поля.

Із природного світла можна отримати поляризоване, якщо пропустити його через оптично анізотропний

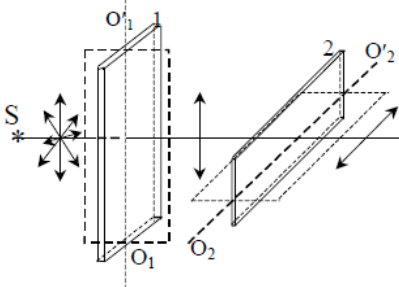


Рис. 1

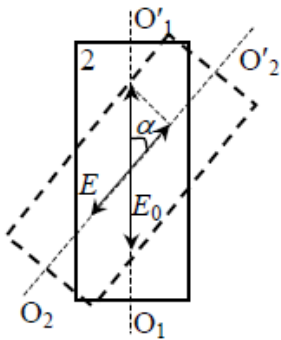


Рис. 2

кристал з оптичною віссю (наприклад, турмалін, герпатит). Анізотропними називаються речовини, властивості яких різні в різних напрямках. Оптичною віссю в кристалі називається уявна пряма, відносно якої атоми в кристалічній ґратці розташовані симетрично. Природне світло (рис.1), пройшовши через пластинку герпатиту 1, що вирізана паралельно оптичній осі  $O_1O'_1$  кристала, повністю поляризується, тому має електричні коливання тільки в головній площині  $Q_1$ , тобто площині, яка містить

оптичну вісь та промінь. Помістимо на шляху ходу променя за пластинкою герпатиту 1 таку ж саму пластинку 2. Орієнтуємо пластинку 2 так, щоб її оптична вісь  $O_2O'_2$  була перпендикулярна оптичній осі  $O_1O'_1$  пластинки 1. Тоді через пластинку 2 промінь не пройде, бо його електричні коливання перпендикулярні головній оптичній площині  $Q_2$  пластинки 2.

Пластинка 1, яка поляризує світло, називається поляризатором. Пластинка 2, яка виявляє ступінь поляризації світла, називається аналізатором. Якщо ж оптичні осі пластинок 1 і 2 будуть утворювати кут  $\alpha$ , відмінний від  $90^\circ$ , то промінь буде проходити через пластинку 2 з частковою втратою амплітуди електричних коливань. Для амплітуди  $E_0$  електричних коливань падаючого на пластинку 2 поляризованого світла та амплітуди  $E$  електричних коливань, що пройшли через пластинку 2 (рис.2), отримуємо

$$E = E_0 \cos \alpha. \quad (1)$$

Враховавши, що  $I \sim E^2$ , з (1) отримуємо закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

де  $I_0$  – інтенсивність поляризованого світла, що падає на пластинку 2,  $I$  – інтенсивність поляризованого світла, яке пройшло через пластинку 2. Таким чином, повертання поляризатора навколо поляризованого променя приводить до зміни інтенсивності світла, що проходить через цей поляризатор.



За законом Малюса, максимум інтенсивності буде при  $\alpha = 0^\circ$  (оптичні осі поляризаторів паралельні), мінімум – при  $\alpha = 90^\circ$  (оптичні осі поляризаторів перпендикулярні).

На практиці для поляризації світла широко використовують поляроїди. Поляроїд – це прозора полімерна плівка, на яку нанесено багато дрібних штучних кристаликів-поляризаторів (наприклад кристаликів герпатиту). Оптичні осі всіх кристаликів герпатиту однаково напрямлені. Тому такий поляроїд дає поляризоване світло з коливаннями  $E$  в одній певній площині.

Поляризоване світло широко застосовується при дослідженнях оптично анізотропних елементів різних структур, зокрема тканин організму. Наприклад, колагенні волокна повністю анізотропні, оптичні осі їх розташовані вздовж осі волокна. Міцели в м'якотній оболонці нейрофібрил також анізотропні, але їх оптичні осі розташовані в радіальних напрямках. Тому в багатьох випадках можна з'ясувати будову і розташування елементів структури за допомогою поляризаційного мікроскопа.

## II. Опис приладів та методика вимірювання

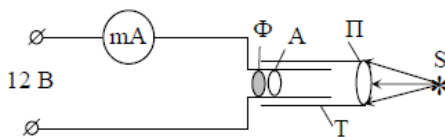


Рис. 3

В установці (рис.3) використовується поляризоване світло (джерело – розсіяне сонячне світло з вікна або світло електролампочки).

Природне світло, пройшовши поляризатор П, поляризується. Поляризатор може повертатись навколо свого центра, а разом з тим відносно нерухомого аналізатора зі шкалою, проградуєваною в градусах. Це дає змогу встановити значення кутів між оптичними осями поляроїдів. Аналізатор А наклеєний на фотоопір Φ. Непрозора циліндрична втулка Т забезпечує потрапляння на фотоопір лише того світла, яке пройшло через обидва поляроїди. Провідність фотоопору змінюється прямо пропорційно до інтенсивності падаючого на нього світла і є максимальною при куті між оптичними осями поляризатора та аналізатора  $\alpha = 0^\circ$ . За законом Ома для ділянки кола при сталій напрузі величина сили струму  $I$

в колі обернено пропорційна опору кола, а тому прямо пропорційна інтенсивності падаючого на нього світла.

### ***III. Порядок виконання роботи***

1. Підключити установку до джерела сталої напруги 12 В.
2. Спрямувати на поляризатор освітлювач.
3. Повертаючи поляризатор на кути, кратні  $30^\circ$  ( $0^\circ, 30^\circ \dots 360^\circ$ ), зареєструвати відповідні їм значення сили стуму і записати дані у звітну таблицю.
4. Побудувати у полярних координатах графіки залежностей  $I = f(\alpha)$  та  $I = I_0 \cos^2 \alpha$  (кут  $\alpha$  відраховують проти годинникової стрілки; довжин у радіуса-вектора ставлять у пряму відповідність значенням сили струму  $I$ ).
5. Результати вимірювань та обчислень записати в звітну таблицю.

### ***IV. Контрольні питання***

1. Що називається променем?
2. Що являє собою світлова хвиля?
3. Яка природа світлової хвилі?
4. Яке світло називається поляризованим?
5. Що таке площина коливань?
6. Що таке площина поляризації?
7. Яке світло називається природним?
8. Що таке поляризатор? аналізатор?
9. Як змінюється амплітуда коливань електричного вектора поляризованого світла після проходження аналізатора?
10. Як записується закон Малюса.
11. Де застосовується поляризоване світло?
12. Які речовини називаються анізотропними?

Звітна таблиця.

№	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
$\cos^2 \alpha$	1	0,75	0,25	0	0,25	0,75	1
$I, \text{мкА}$							
$I \cdot \cos^2 \alpha,$ мкА							

№	8	9	10	11	12	13
$\alpha, ^\circ$	210	240	270	300	330	360
$\cos^2 \alpha$	0,75	0,25	0	0,25	0,75	1
$I, \text{мкА}$						
$I \cdot \cos^2 \alpha,$ мкА						

## Лабораторна робота №17

### Тема: Визначення процентного вмісту цукру в розчині глюкози поляриметричним методом

**Мета роботи:** оволодіти методикою вимірювання процентного вмісту цукру за допомогою поляриметра або цукрометра.

**Матеріали та обладнання:** поляриметр круговий СМ-3 або цукрометр універсальний СУ-3, трубки з розчинами глюкози відомої та невідомої концентрації.

#### 1. Теоретичні відомості

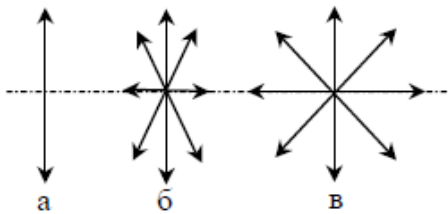


Рис. 1

Щоб швидко визначити концентрацію оптично активних речовин використовують поляризаційні прилади (поляриметри, цукрометри). Ними користуються для кількісного визначення вмісту цукру в молоці, в клінічній практиці тощо.

Робота цих приладів ґрунтується на явищі повертання площини поляризації оптично активними прозорими розчинами і рідинами.

Світло являє собою поперечну електромагнітну хвилю, в якій вектор напруженості електричного поля  $\vec{E}$ , магнітного поля  $\vec{H}$  та напрям швидкості поширення хвилі взаємно перпендикулярні. Світло називається поляризованим, якщо вектор напруженості  $\vec{E}$  електричного поля коливається в одній площині. Площина коливань вектора напруженості  $\vec{E}$  електричного поля називається площиною коливань поляризованого світла. Площина коливань вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  називається площиною поляризації.

Будь-яке природне джерело світла випромінює світлові хвилі з різними напрямками коливань вектора  $\vec{E}$ . Тому світло, яке не має виділеної площини коливань електричного вектора  $\vec{E}$ ,

називається природним (рис.1, в). Світло, електричний вектор  $\vec{E}$  якого коливається в одній площині, називається поляризованим (рис. 1, а). Світло, коливання електричного вектора  $\vec{E}$  якого мають виділений напрям коливань, але він не є виключним, називається частково поляризованим (рис. 1, б). Природне світло можна поляризувати, тобто перетворити на поляризоване. Поляризоване світло одержується при його відбиванні від діелектричної поверхні; при заломленні; при проходженні світла через кристали, для яких характерне явище подвійного променезаломлення світла.

Явище подвійного променезаломлення світла – це роздвоєння світлового променя на два повністю поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах промені в анізотропному кристалі. Предмети, які розглядаються через такий кристал, виглядають роздвоєними. Напрямок, уздовж якого відсутнє явище подвійного променезаломлення світла, називається головною оптичною віссю кристала. Оптична вісь є одночасно віссю симетрії кристала. Кристали, в яких є одна така вісь, називаються одновісними, дві осі – двовісними.

Промінь, який повністю підлягає законам заломлення світла, називається звичайним «з», який не підлягає цим законам, – незвичайним «н» (рис. 2, а). Коливання електричного вектора у звичайному та незвичайному променях взаємно перпендикулярні.

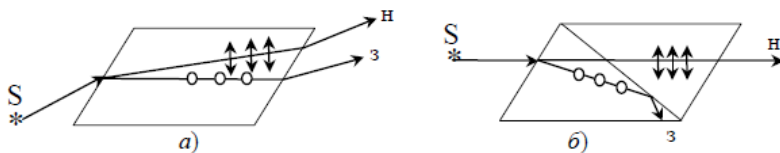


Рис. 2

Стрілки на рис.2 символізують коливання електричного вектора у площині малюнка, кружечки – у напрямі, перпендикулярному до площини малюнка.

Для одержання поляризованого променя користуються призмою Ніколя. Це кристал ісландського шпату, розрізаний по діагоналі та склеєний канадським бальзамом (рис.2, б). При падінні природного променя на грань призми Ніколя внаслідок

подвійного променезаломлення, в кристалі поширюються два промені – звичайний та незвичайний. Показник заломлення канадського бальзаму менший від показника заломлення  $n_z$  для звичайного променя ісландського шпату і більший, ніж показник заломлення для незвичайного променя ісландського шпату  $n_n$ . Тому для звичайного променя канадський бальзам є середовищем оптично менш густим, а для незвичайного – більш густим, ніж ісландський шпат. Через це звичайний промінь, який падає на шар бальзаму під кутом, більшим за граничний, зазнає повного внутрішнього відбивання, а незвичайний промінь за будь-яких кутів падіння проходить через цей шар (рис.2, б).

Звичайний промінь, зазнавши повного внутрішнього відбивання, падає на бічну грань, покриту чорною фарбою, де повністю поглинається.

В результаті з призми Ніколя виходить один поляризований промінь. Призма Ніколя, яка застосовується для одержання поляризованих променів, називається поляризатором. Призму Ніколя, яку застосовують для виявлення ступеня

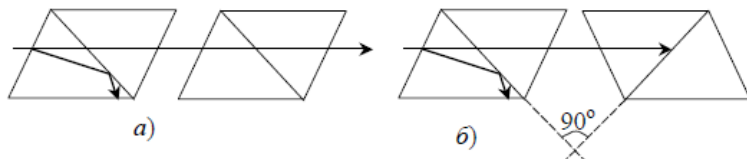


Рис. 3

поляризації променів, називають аналізатором. При цьому використовується та властивість, що дві призми, розташовані одна за одною, повністю пропускають світло, якщо їхні оптичні осі паралельні (рис.3, а) і не пропускають світла, якщо їхні оптичні осі взаємно перпендикулярні (рис. 3, б).

У природі є багато речовин, здатних повертати площину поляризації світлового променя, що проходить через них (рис.4). Ці речовини називаються оптично активними (наприклад, кварц, винна кислота, цукор). Явище повертання площини коливань поляризованого світла використовується для визначення концентрації будь-якої оптично активної речовини в розчині (наприклад, водних розчинів цукру в молоці, цукру в сечі при діабеті).

Кут  $\varphi$  повороту площини коливань (рис.4) у розчині  $P$  прямо пропорційний концентрації  $C$  розчину і товщині його шару  $d$ :

$$\varphi = Ckd, \quad (1)$$

де  $k$  – питомий кут повертання площини коливань світлового променя.

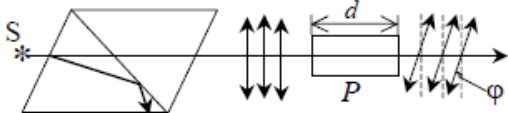


Рис. 4

Чисельно  $k$  дорівнює куту, на який повертається площина коливань поляризованого світла при проходженні його через шар розчину

одиночної товщини та одиночної концентрації (концентрація  $C$  розчину виражає кількість оптично активного компонента в певній кількості суміші).

Таким чином, як бачимо з (1), якщо відомі  $k$  і  $d$ , то для визначення концентрації розчину досить виміряти кут  $\varphi$  повороту площини коливань електричного вектора.

Прилади, що визначають кут  $\varphi$  повороту площини коливань електричного вектора поляризованого світла, називаються поляриметрами. Поляриметри, що дають змогу безпосередньо визначити концентрацію цукру в розчині, називаються цукрометрами.

## II. Опис приладів і методика вимірювання

Напівтіньовий круговий поляриметр СМ-3 (цукрометр СУ-3) складається з двох основних частин: поляризатора та аналізатора (рис.5).

Поляризатор складається з двох поляризаційних призм Ніколя: великої П та розташованої за нею малої  $n$ . Головні перетини цих призм утворюють між собою невеликий кут. Світло, яке йде від джерела  $S$ , пройшовши через монохроматор  $M$  (монохроматор пропускає світло тільки однієї довжини хвилі), проходить через призму Ніколя П. Половина світлового пучка, поляризованого в певній площині, пройде через трубку, заповнену оптично активним розчином  $P$ , а потім через аналізатор  $A$ . Половина, перш ніж потрапити в оптично активний

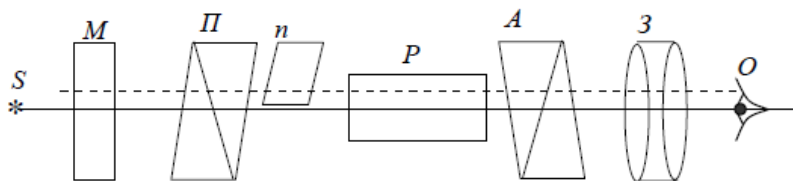


Рис. 5

розчин, проходить через малий поляризатор  $n$ , внаслідок чого площина коливань світлового променя дещо змінюється.

Таким чином, якщо аналізатор поставлений на повне затемнення однієї половини світлового пучка, то інша половина буде частково затемнена. Внаслідок цього поле зору в окулярі розділиться на дві половини і лінією поділу буде ребро малої призми  $n$ .

У роботі визначають невідому концентрацію глюкози. Як бачимо з (1), існує прямо пропорційна залежність між концентрацією розчинів глюкози  $C$  та кутом повороту площини поляризації світла, яке проходить через кювети однакової товщини  $d$ . Якщо  $C_B$  – відома концентрація розчину глюкози;  $\varphi_B$  – кут повороту площини поляризації світла у речовині з відомою концентрацією глюкози;  $\varphi_H$  – кут повороту площини поляризації світла у речовині з невідомою концентрацією глюкози, то з (1) отримаємо

$$C_H = C_B \frac{\varphi_H}{\varphi_B}. \quad (2)$$

### III. Порядок виконання роботи

1. Увімкнути поляриметр у мережу з напругою 220 В.
2. Сфокусувати окуляр зорової труби 3 (рис.5). З цією метою, обертаючи оправу окуляра, добитись чіткого зображення півкругів різного затемнення поля зору. При цьому у камері поляриметра не повинно бути трубок з розчинами.
3. Встановити прилад у нульове положення за допомогою гвинта, розташованого на приладі. При цьому нульові поділки шкали і ноніуса повинні збігатися, а обидва півкруги окуляра зорової труби будуть однакового червоно-фіолетового кольору.



4. Покласти в камеру поляриметра трубку з розчином відомої концентрації. При цьому площина поляризації повернеться на деякий кут, і, тим самим, зміниться однорідність освітлення поля зору півкругів окуляра зорової труби. Повертаючи гвинт, розташований на приладі, знову налаштувати прилад на однакову освітленість півкругів, як це було в нульовому положенні. Поле зору буде темнішим, оскільки частина енергії світлового пучка поглинеться розчином глюкози.
5. За шкалою та ноніусом поляриметра визначити покази  $\varphi_B$  з точністю до  $0,01^\circ$ . Ноніусом користуються так само, як при вимірюваннях штангенциркулем.
6. Виміри згідно з пунктами 4-5 повторити ще двічі.
7. Вийняти трубку з розчином відомої концентрації і встановити на її місце трубку з досліджуванним розчином, та, виконуючи всі дії, зазначені в п.4-5, визначити кути  $\varphi_H$ .
8. За значеннями  $\varphi_H$  та  $\varphi_B$  знайти значення концентрації глюкози  $C_H$  в досліджуваному розчині за формулою (2).
9. Абсолютну та відносну похибки обчислити за формулами:

$$\delta C_{H_0} = \left( \frac{\Delta C_{B_0}}{C_{B_0}} + \frac{\Delta \varphi_{B_0}}{\varphi_{B_0}} + \frac{\Delta \varphi_{H_0}}{\varphi_{H_0}} \right) \cdot 100 \%;$$

$$\Delta C_{H_0} = \frac{C_{H_0} \cdot \delta C_{H_0}}{100 \%}. \quad (3)$$

10. Результати вимірювань та обчислень записати у звітну таблицю.

#### ***IV. Контрольні питання***

1. Яке світло називається поляризованим?
2. Яке світло називається природнім?
3. Яке світло називається частково поляризованим?
4. Які є методи отримання поляризованого світла?
5. Що таке головна оптична вісь кристала?
6. Які кристали називаються одновісними?
7. Які промені називаються звичайними?
8. Які промені називаються незвичайними?

9. Яка будова призми Ніколя?
10. Як зобразити хід променів у призмі Ніколя?
11. За якою формулою визначається кут повороту площини коливань поляризованого світла?
12. Яка робоча формула для визначення невідомої концентрації поляриметричним методом?
13. Для чого у ветеринарії використовують поляриметри?
14. Які речовини називаються оптично активними?
15. Чому дорівнює питомий кут повороту площини коливань?

Звітна таблиця.

№ з.п.	$\varphi_B$ , град.	$\Delta\varphi_B$ , град.	$\varphi_H$ , град.	$\Delta\varphi_H$ , град.	$C_B$ , %	$C_H$ , %	$\Delta C_H$ , %	$\delta C_H$ , %
1							X	X
2								
3								
сер.	X	X	X	X				

**Тема: Визначення довжини хвилі і енергії кванта випромінювання лазера**

**Мета роботи:** навчитися визначати довжину хвилі та обчислювати енергію кванта лазера.

**Матеріали та обладнання:** лазер, дифракційна ґратка, оптична лава, екран з лінійкою, масштабна лінійка.

**1. Теоретичні відомості**

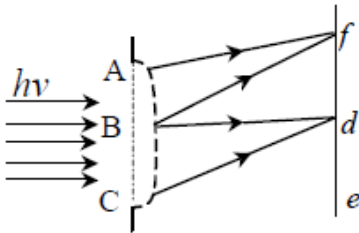


Рис. 1

Дифракцією світла називається огинання світловими хвилями перешкод, тобто відхилення їх від прямолінійного поширення. Дифракція спостерігається при проходженні світла крізь отвори, щілини, при розсіянні світла на мікронеоднорідностях середовища.

Явище дифракції виявляється тим чіткіше, чим ближчі розміри перешкод (отворів, щілин, неоднорідностей) до довжини падаючої на них хвилі.

Дифракція, як і інтерференція світла, зумовлена його хвильовою природою і тому пояснюється хвильовою теорією на основі принципу Гюйгенса-Френеля. Нехай плоска світлова хвиля ABC падає на отвір (рис.1). Принцип Гюйгенса: кожна точка хвильової поверхні (ABC), яку хвиля досягла в даний момент часу  $t_1$ , є центром елементарних вторинних хвиль і їх зовнішня огинаюча буде хвильовою поверхнею в наступний момент часу  $t_2$ . Принцип Френеля: вторинні хвилі когерентні і при накладанні інтерферують. На рис.1 штрих-пунктирною лінією ABC позначено положення хвильової поверхні в момент часу  $t_1$ , а штриховою кривою лінією – положення хвильової поверхні в момент часу  $t_2$  (тобто фронт хвилі в момент часу  $t_2$ ).

Із рис.1 видно, що хвильова поверхня світлової хвилі, яка пройшла через щілину, плоска тільки в центральній частині. На її

краях (т.  $A$  і  $C$ ) відбувається відхилення променів від прямолінійного поширення – спостерігається явище дифракції.

Згідно з принципом Френеля, промені, які виходять із вторинних когерентних джерел (т.  $A, B, C$ ) когерентні і будуть при накладанні інтерферувати. Залежно від різниці ходу, на екрані  $e$  в т.  $d$  і  $f$  будуть спостерігатися максимуми або мінімуми. Таким чином, на екрані отримаємо дифракційну картину – систему світлих і темних смуг.

Дифракційну картину можна отримати за допомогою *дифракційної ґратки*, яка являє собою сукупність великого числа паралельних рівновіддалених одна від одної щілин. У найпростішому варіанті такою ґраткою є скляна пластина, на якій за допомогою ділильного пристрою через рівні проміжки нанесено паралельні лінії – подряпини. На довжині в один міліметр їх можна нанести понад 1000. Ці подряпини розсіюють світло, не пропускаючи його, а проміжки між ними є щілинами, що пропускають світло.

На рис. 2 схематично зображено дифракційну ґратку  $g$ :  $a$  – ширина щілини;  $b$  – ширина непрозорої частини між щілинами;  $d = a + b$  – період (стала) дифракційної ґратки.

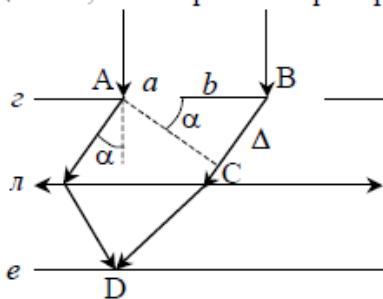


Рис. 2

Нехай на дифракційну ґратку з двома щілинами падає монохроматичний пучок паралельних світлових променів. Ці щілини є когерентними джерелами світла. Якщо за дифракційною ґраткою  $g$  розташувати збірну лінзу  $л$ , то на екрані  $e$ , що міститься у фокальній площині лінзи,

одержимо дифракційну картину. Дифракційна картина є результатом двох процесів: 1) дифракції світла від кожної щілини окрема; 2) інтерференції від обох щілин.

Розглянемо інтерференцію від обох щілин, взявши для простоти два промені, що падають на ліві краї щілини і дифрагують під кутом  $\alpha$ . З рис.2 бачимо, що різниця ходу  $\Delta = BC = AB \cdot \sin \alpha$ , тобто

$$\Delta = d \cdot \sin \alpha. \quad (1)$$

Якщо  $\Delta$  дорівнює непарному числу півхвиль  $(2k + 1)\lambda/2$ , то в розглядуваній точці  $D$  екрана отримаємо мінімум:

$$d \cdot \sin\alpha = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (2)$$

Якщо різниця ходу  $\Delta$  дорівнює парному числу півхвиль  $2k\frac{\lambda}{2}$ , то в розглядуваній точці  $D$  екрана отримаємо максимум:

$$d \cdot \sin\alpha = k\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3)$$

Рівняння (3) залишається справедливим у випадку багатьох щілин і називається формулою дифракційної ґратки.

Якщо освітити щілину білим світлом, то для кожної з його складових (монохроматичних хвиль) при даному  $k$  одержимо свій максимум. Для максимуму нульового порядку ( $k = 0$ ) різниця ходу  $\Delta$  для хвиль будь-якої довжини дорівнює нулю. Тому на екрані навпроти середини дифракційної ґратки буде спостерігатись смуга білого кольору (центральний максимум). По обидва боки від центрального максимуму, чергуючись із темними смугами (мінімумами), симетрично розташуються спектрально забарвлені смуги (максимумами) 1-го, 2-го, 3-го та інших порядків. Ближче до нульового максимуму будуть знаходитись зони фіолетового кольору (з найменшою  $\lambda$ ), з протилежного боку – зони червоного кольору (з найбільшою  $\lambda$ ). Між фіолетовим та червоним краями кожного максимуму розмістяться всі інші спектральні кольори. У зв'язку з цим дифракційні максимуми називаються дифракційними спектрами.

## ***II. Опис приладів і методика вимірювання***

Установка, схематично зображена на рис.3, складається з оптичної лави, на якій встановлені джерело монохроматичного світла  $S$  (лазер), дифракційна ґратка  $g$  та екран  $e$ . Метод вимірювання полягає в тому, що дифракційний максимум розглядається на екрані  $e$  за відсутності лінзи.

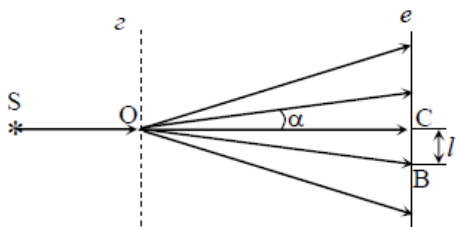


Рис. 3

Роль лінзи тут виконує кристалик ока спостерігача, що фіксує на сітківці ока паралельні промені, які одержані після проходження через дифракційну ґратку.

3 формули дифракційної ґратки (3)

визначимо довжину світлової хвилі, яку випромінює лазер:

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin \alpha}{k}. \quad (4)$$

Але з  $\triangle OBC$ :  $\operatorname{tg} \alpha = l/L$ , де  $L$  – відстань між дифракційною ґраткою і екраном;  $l$  – відстань між нульовим та  $k$ -м дифракційним максимумом. При малих кутах  $\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$ , тому

$$\lambda = \frac{dl}{kL}. \quad (5)$$

Маючи довжину хвилі  $\lambda$ , легко обчислити енергію кванта випромінювання лазера:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}, \quad (6)$$

де  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі.

### III. Порядок виконання роботи

1. Встановити дифракційну ґратку на відстані 10-15 см від віконця лазера.
2. На іншому кінці оптичної лави встановити екран.
3. Увімкнути лазер.
4. Лазерний промінь спрямувати на середину дифракційної ґратки так, щоб центральний максимум ( $k = 0$ ) був посередині екрана. По обидва боки від центрального максимуму повинні фіксуватися максимуми 1-го та 2-го порядків.
5. Виміряти відстань  $L$  від дифракційної ґратки до екрана.
6. Виміряти відстані  $l_1$  від центрального максимуму до максимуму першого порядку ліворуч і праворуч.

7. Виміряти відстані  $l_2$  від центрального максимуму до максимуму 2-го порядку ліворуч і праворуч.
8. За формулою (5) обчислити довжину світлової хвилі  $\lambda$  при  $k = 1, 2$ .
9. Обчислити середнє значення довжини світлової хвилі  $\lambda_0$ , середню абсолютну  $\Delta\lambda_0$  та відносну  $\delta\lambda_0$  похибки за формулами:

$$\lambda_0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \lambda_i = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4}{4}; \quad \Delta\lambda_i = |\lambda_0 - \lambda_i|;$$

$$\Delta\lambda_0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \Delta\lambda_i = \frac{\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 + \Delta\lambda_3 + \Delta\lambda_4}{4};$$

$$\delta\lambda_0 = \frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} 100 \%$$

10. За формулою (6), використавши  $\lambda_0$ , обчислити енергію кванта лазера  $\varepsilon$ .
11. Результати вимірювань та обчислень записати у звітну таблицю.

#### ***IV. Контрольні питання***

1. Що таке дифракція?
2. Як формулюється принцип Гюйгенса-Френеля?
3. Як пояснюється явище дифракції при проходженні світла через щілину на основі принципу Гюйгенса?
4. Що таке період дифракційної ґратки?
5. Вивести формулу дифракційної ґратки.
6. Що таке інтерференція світлових хвиль?
7. Записати умови для максимумів та мінімумів при інтерференції світла на дифракційній ґратці.
8. Яке світло називається монохроматичним?
9. Які хвилі називаються когерентними?
10. Вивести робочу формулу для визначення  $\lambda$ .

Звітна таблиця

№ з.п.	$k$ , --	$d$ , м	$l$ , м	$L$ , м	$\lambda$ , м	$\Delta\lambda$ , м	$\delta\lambda$ , %	$\varepsilon$ , Дж
1	1	X		X			X	X
2	1							
3	2							
4	3							
сер.	X		X					



## Лабораторна робота №19

### Тема: Вивчення взаємодії радіоактивного $\beta$ – випромінювання з речовиною

**Матеріали та обладнання:** радіометр Б-4, джерело  $\beta$ -випромінювання, пластинка з кістки тварини, штангенциркуль, секундомір.

**Мета роботи:** ознайомитися з будовою радіометра Б-4, підготувати його до роботи та провести вимірювання.

#### 1. Теоретичні відомості

*Радіоактивністю* називають спонтанне (самовільне) перетворення ядер нестійких ізотопів одних елементів на ядра ізотопів інших елементів, яке зумовлене внутрішніми причинами та супроводжується випромінюванням  $\alpha$ -,  $\beta$ -частинок та  $\gamma$ -фотонів.

Радіоактивність поділяють на природну та штучну залежно від того, як був створений нестійкий ізотоп – штучно чи існував у природі.

*Радіоактивне  $\alpha$ -випромінювання* являє собою потік ядер гелію з високою кінетичною енергією (2-9 МеВ), швидкістю від 14 до 20 тисяч км/с, великою іонізуючою здатністю (у повітрі 30 тис. пар іонів на 1 см пробігу) і відповідно малою проникною здатністю – повністю поглинаються шаром біологічної тканини товщиною 0,12 мм (у повітрі 3-9 см).

*Радіоактивне  $\beta$ -випромінювання* – це потік швидких електронів або позитронів, які називаються  $\beta$ -частинками. Швидкість  $\beta$ -частинок порядку 160 тис. км/с, маса в 7350 разів менша за масу  $\alpha$ -частинок, іонізуюча здатність в 100 разів менша, а проникна здатність у стільки ж разів більша, ніж у  $\alpha$ -частинок (пробіг у біологічній тканині електрона становить 6 см, у повітрі – до 40 м).

*Радіоактивне  $\gamma$ -випромінювання* є потоком фотонів (квантів) із дуже короткою довжиною хвилі (меншою за 0,05 нм). Швидкість  $\gamma$ -квантів дорівнює швидкості світла. Іонізуюча здатність  $\gamma$ -квантів у повітрі незначна – 1-2 пари іонів на 1 см пробігу, проникна здатність велика: тіло людини пронизують

наскрізь, повітря – на декілька сотень метрів, шар свинцю – до 5 см.

Важливими параметрами, які характеризують процес взаємодії іонізуючих випромінювань з різними речовинами є коефіцієнт лінійного вбирання  $\mu$  та шар половинного вбирання  $d$ .

*Коефіцієнт лінійного вбирання  $\mu$  чисельно дорівнює відносному зменшенню інтенсивності випромінювання на одиницю довжини  $l$  проникнення:*

$$\mu = \frac{2,303}{l} \cdot \lg \frac{N_0 - N_\phi}{N - N_\phi}, \quad (1)$$

де  $N_0$  – кількість частинок радіоактивного випромінювання, що падають на тіло;  $N$  – кількість частинок радіоактивного випромінювання, що пройшли через тіло;  $N_\phi$  – фонове випромінювання (фон). Одиниця вимірювання  $\text{см}^{-1}$ .

*Шар половинного вбирання – це така товщина шару даної речовини, яка зменшує інтенсивність радіоактивного випромінювання вдвічі (інтенсивність радіоактивного випромінювання пропорційна числу  $\beta$ -частинок). Визначивши коефіцієнт лінійного вбирання  $\mu$  речовини, товщину шару половинного вбирання обчислюють за формулою*

$$d = \frac{0,693}{\mu}. \quad (2)$$

Відношення  $\mu/\rho$  (де  $\rho$  – густина речовини) називається *масовим коефіцієнтом вбирання* (вимірюється в  $\text{см}^2/\text{г}$ ). Досліди показують, що відношення  $\mu/\rho$  майже не залежить від речовини, яка опромінюється.

Радіоактивне випромінювання застосовують для діагностики захворювань внутрішніх органів; вивчення процесів, що відбуваються в організмі; лікування злякисних пухлин.

У великих дозах радіоактивне випромінювання шкідливо діє на організм і викликає променеву хворобу.

## ***II. Опис приладів і методика вимірювання***

Чутливим приладом для виявлення і вимірювання низки характеристик радіоактивного випромінювання є установка типу Б-4. Блок-схема радіометра Б-4 складається із блока газових лічильників БГЗ-4, перерахункового приладу (ПП-16) з вихідним пристроєм та блоком живлення. Блок газових лічильників БГЗ-4

є виносним і під'єднується до приладу ПП-16 за допомогою двох високовольтних кабелів (напруга 390 В).

$\beta$ -випромінювання реєструється газовим лічильником Гейгера-Мюллера, який встановлений у тримачі виносного блока БГЗ-4. Принцип роботи лічильника Гейгера-Мюллера ґрунтується на іонізації газу елементарними частинками (рис.1). Він являє собою циліндричний конденсатор, однією обкладкою якого є металевий циліндр (катод К), а іншою – натягнута вздовж

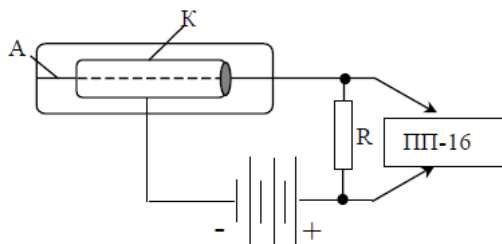


Рис. 1

осі циліндра металева нитка (анод А). В циліндрі під тиском перебуває суміш газів. До циліндра і нитки прикладена висока напруга сталої струму. Позитивна клемма джерела високої напруги через великий опір підключається до вимірювального пристрою та аноду лічильника. Електрон, потрапивши в лічильник, іонізує газ. Сильне електричне поле між обкладками конденсатора прискорює іони, і вони, у свою чергу, іонізують інші молекули газу, тобто виникає газовий розряд і коло між циліндром та ниткою (катодом та анодом) замикається. Розряд миттю гаситься через спад напруги на великому опорі R, і лічильник знову готовий до реєстрації наступного електрона. Імпульси струму, які виникли при розрядах у лічильнику, підсилюються і подаються на ПП-16.

Таким чином, при потрапленні в газовий лічильник  $\beta$ -частинок виникають короточасні електричні імпульси, які подаються на вхід лічильного пристрою ПП-16. Основними елементами цього приладу є лічильні декади, зібрані на 6 газорозрядних лампах тліючого розряду (декатронах), які служать для підрахунку вхідних імпульсів і розташовані на передній панелі приладу. Декатрони підраховують імпульси в десятковій системі числення від 0 до 10.

### ***III. Порядок виконання роботи***

1. Увімкнути прилад у мережу змінного струму 220 В.
2. Натиснути і зафіксувати кнопку «Сеть» («Живлення»). При цьому повинні засвітитися всі декатрони.
3. Натиснути і відпустити кнопку «Сброс» («Встановлення на 0») – покази всіх декатронів встановляться на «0».
4. Перевірити роботу установки. Для цього натиснути і зафіксувати кнопки: а) «~»; б) «Работа 50 Гц» («Робота 50 Гц»); в) «Пуск» і одночасно увімкнути секундомір. При цьому на вхід приладу подається змінна напруга з частотою 50 Гц і декатрони повинні рахувати 50 імпульсів за 1с. У кінці першої хвилини натиснути і зафіксувати кнопку «Стоп». При цьому декатрони повинні зафіксувати приблизно 3000 імпульсів. Покази приладу записати в звітну таблицю у графу «Контроль». Відпустити кнопки «~» та «Работа 50 Гц» («Робота 50 Гц»)
5. Вимірювання радіоактивного фону. Натиском кнопки «Сброс» («Встановлення на 0») встановити покази всіх декатронів на «0». Натиснути і зафіксувати кнопку «Пуск» і одночасно увімкнути секундомір. У кінці першої хвилини натиском кнопки «Стоп» зупинити роботу декатронів, зняти відлік  $N_{\phi}$  і результат записати у графі «Фон». Після цього натиснути кнопку «Сброс» («Встановлення на 0»).
6. Виміряти інтенсивність (кількість частинок за 1 хвилину) випромінювання радіоактивного джерела. Для цього перед віконцем тримача поставити радіоактивний препарат. Натиснути і зафіксувати кнопку «Пуск» і одночасно увімкнути секундомір. У кінці першої хвилини натисканням кнопки «Стоп» зупинити роботу декатронів, та виміряти інтенсивність  $N_0$  джерела. Від  $N_0$  відняти  $N_{\phi}$ .
7. Між радіоактивним джерелом та віконцем лічильника поставити пластинку, вирізану з кістки тварини. Натиснути та зафіксувати кнопку «Пуск» і одночасно увімкнути секундомір. У кінці першої хвилини натисканням кнопки «Стоп» зупинити роботу

декатронів та виміряти інтенсивність  $N$  потоку  $\beta$ -частинок, які пройшли через кісткову тканину. Від  $N$  відняти  $N_{\phi}$ .

8. Натиснути кнопку «Сеть» («Живлення») і від'єднати прилад від електромережі.
9. Виміряти за допомогою штангенциркуля товщину  $l$  досліджуваної пластинки.
10. Значення густини кістки дає викладач. За (1) та (2) обчислити коефіцієнт лінійного вбирання  $\mu$  та шар половинного вбирання  $d$ , за формулою  $\mu/\rho$  – масовий коефіцієнт вбирання.
11. Результати вимірювань та обчислень записати у звітну таблицю.

#### **IV. Контрольні питання**

1. Що таке радіоактивність?
2. Що таке  $\alpha$ -випромінювання?
3. Що таке  $\beta$ -випромінювання?
4. Що таке  $\gamma$ -випромінювання?
5. Яка швидкість  $\alpha$ -,  $\beta$ -частинок та  $\gamma$ -квантів?
6. Яка іонізуюча здатність  $\alpha$ -,  $\beta$ -частинок та  $\gamma$ -квантів?
7. Яка проникна здатність  $\alpha$ -,  $\beta$ -частинок та  $\gamma$ -квантів?
8. Що таке коефіцієнт лінійного вбирання?
9. Що таке шар половинного вбирання?
10. Що таке масовий коефіцієнт вбирання?

Звітна таблиця.

Речовина	Контроль, імпл./хв.	$N_{\phi}$ , імпл./хв.	$N_0 - N_{\phi}$ , імпл./хв.	$N - N_{\phi}$ , імпл./хв.	$l$ , см	$\mu$ , см <sup>-1</sup>	$d$ , см	$\mu/\rho$ , см <sup>2</sup> /г

# ДОДАТКИ

Таблиця 1

Основні фізичні константи

Фізична стала	Позначення	Числове значення
Прискорення вільного падіння	$g$	9,81 м/с <sup>2</sup>
Число Авогадро	$N_A$	6,02 · 10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup>
Універсальна газова стала	$R$	8,31 Дж/(моль · К)
Молярний об'єм ідеального газу за нормальних умов	$V_0$	22,4 · 10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> /моль
Стала Больцмана	$k$	1,38 · 10 <sup>-23</sup> Дж/К
Елементарний заряд	$e$	1,60 · 10 <sup>-19</sup> Кл
Маса електрона	$m_e$	9,11 · 10 <sup>-31</sup> кг
Стала Фарадея	$F$	9,65 · 10 <sup>4</sup> Кл/моль
Швидкість світла у вакуумі	$c$	3 · 10 <sup>8</sup> м/с
Стала Планка	$h$	6,63 · 10 <sup>-34</sup> Дж · с
Стала Рідберга	$R$	1,10 · 10 <sup>7</sup> м <sup>-1</sup>
Атомна одиниця маси	а.о.м.	1,66 · 10 <sup>-27</sup> кг
Електрична стала	$\epsilon_0$	8,85 · 10 <sup>-12</sup> Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0$	4π · 10 <sup>-7</sup> Гн/м

Таблиця 2

Множники і префікси  
для творення кратних і часткових величин

Множ- ник	Префікс		Приклад
	Наймену- вання	Позна- чення	
$10^{12}$	тера	Т	тераом (ТОм)
$10^9$	гіга	Г	гігагерц (ГГц)
$10^6$	мега	М	мегаджоуль (МДж)
$10^3$	кіло	к	кілограм (кг)
$10^2$	гекто	г	гектар (га)
$10^1$	дека	дк	декалітр (дкл)
$10^0$	-	-	
$10^{-1}$	деци	д	дециметр (дм)
$10^{-2}$	санти	с	сантиметр (см)
$10^{-3}$	мілі	м	міліграм (мг)
$10^{-6}$	мікро	мк	мікроампер (мкА)
$10^{-9}$	нано	н	наносекунда (нс)
$10^{-12}$	піко	п	пікофарада (пФ)
$10^{-15}$	фемто	ф	фемтограм (фг)
$10^{-18}$	атто	а	аттокулон (аКл)

## Грецький алфавіт

Α α	альфа
Β β	бета
Γ γ	гамма
Δ δ	дельта
Ε ε	епсилон
Ζ ζ	дзета
Η η	ета
Θ θ	тета
Ι ι	йота
Κ κ	капа
Λ λ	лямбда
Μ μ	мю
Ν ν	ню
Ξ ξ	ксі
Ο ο	омікрон
Π π	пі
Ρ ρ	ро
Σ σ	сигма
Τ τ	тау
Υ υ	іпсилон
Φ φ	фі
Χ χ	хі
Ψ ψ	псі
Ω ω	омега



## Латинський алфавіт

<i>A a</i>	а
<i>B b</i>	бе
<i>C c</i>	це
<i>D d</i>	де
<i>E e</i>	е
<i>F f</i>	еф
<i>G g</i>	же (ге)
<i>H h</i>	аш
<i>I i</i>	і
<i>J j</i>	йот (жі)
<i>K k</i>	ка
<i>L l</i>	ель
<i>M m</i>	ем
<i>N n</i>	ен
<i>O o</i>	о
<i>P p</i>	пе
<i>Q q</i>	ку
<i>R r</i>	ер
<i>S s</i>	ес
<i>T t</i>	те
<i>U u</i>	у
<i>V v</i>	ве
<i>W w</i>	дубль ве
<i>X x</i>	ікс
<i>Y y</i>	ігрек
<i>Z z</i>	зет

Таблиця 5

## Густина деяких речовин

Речовина	Густина, кг/м <sup>3</sup>
<i>Тверді речовини</i>	
алюміній	2700
бетон	2200
граніт	2600
дуб сухий	800
залізо	7850
золото	19300
константан	8900
корок	240
латунь	8350
лід	910
мідь	8700
нікель	8800
олово	7300
платина	21400
свинець	11300
сосна (суха)	400
срібло	10500
скло	2500
сталь	7800
цегла	1600
цинк	7100
чавун	7000

Речовина	Густина, кг/м <sup>3</sup>
<i>Рідини</i>	
ацетон	790
бензин	710
вода прісна	1000
вода морська	1030
гас	800
гліцерин	1260
нафта	800
ртуть	13596
спирт	791
<i>Гази (за нормальних умов)</i>	
азот	1,25
водень	0,09
вуглекислий газ	1,98
гелій	0,18
кисень	1,43
повітря	1,29
природний газ	0,8

**Таблиця 6**

Залежність в'язкості води від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^{-3}, \text{Па}\cdot\text{с}$
0	1.797
5	1.518
10	1.307
15	1.140
16	1.110
17	1.082
18	1.055
19	1.029
20	1.004
21	0.980
22	0.957
23	0.936
24	0.915
25	0.895
30	0.803
35	0.720
40	0.655
50	0.551
60	0.470
70	0.407
80	0.357
90	0.317
100	0.284

Таблиця 7

Залежність максимальної вологості і пружності водяної пари від температури

$t, ^\circ C$	$f_m \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	$p_m \cdot 10^2, \text{Па}$
5	6,5	8,72
6	7,0	9,35
7	7,5	10,02
8	8,0	10,72
9	8,6	11,48
10	9,2	12,28
11	9,8	13,13
12	10,5	14,03
13	11,2	14,98
14	12,0	15,99
15	12,8	17,04
16	13,6	18,17
17	14,5	19,37
18	15,5	20,63
19	16,5	21,96
20	17,5	23,37
21	18,7	24,86
22	19,8	26,43
23	21,1	28,08
24	22,4	29,83
25	23,8	31,67
26	25,2	33,61
27	26,7	35,65
28	28,3	37,79
29	30,0	40,05
30	31,8	42,43

Таблиця 8

Психрометрична таблиця  
відносної вологості повітря (у %).

		<i>Різниця показів сухого і мокрого термометрів, °С</i>										
		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Покази сухого термометра, °С	<b>0</b>	100	82	65	53	40	30	16				
	<b>1</b>	100	82	66	52	41	30	18	10			
	<b>2</b>	100	83	67	54	42	31	22	13	6		
	<b>3</b>	100	83	68	56	44	34	25	16	9	3	
	<b>4</b>	100	84	69	57	46	36	28	19	13	6	1
	<b>5</b>	100	85	70	59	48	39	30	22	16	10	4
	<b>6</b>	100	85	71	61	50	41	33	25	18	13	7
	<b>7</b>	100	86	72	62	52	43	35	28	21	15	10
	<b>8</b>	100	86	73	63	54	45	38	30	24	18	13
	<b>9</b>	100	86	74	65	55	47	39	32	26	20	16
	<b>10</b>	100	87	75	66	57	48	41	34	28	23	18
	<b>11</b>	100	88	76	67	58	50	43	36	30	25	20
	<b>12</b>	100	88	77	68	59	52	44	38	32	27	22
	<b>13</b>	100	89	78	69	61	53	46	40	34	29	26
	<b>14</b>	100	89	79	70	62	54	47	41	36	31	28
	<b>15</b>	100	89	80	71	63	55	49	43	37	33	30
	<b>16</b>	100	90	80	72	64	57	50	44	39	34	31
	<b>17</b>	100	90	81	72	65	58	52	46	40	36	32
	<b>18</b>	100	90	81	73	66	59	53	47	42	37	33
	<b>19</b>	100	91	82	74	66	60	54	47	43	39	33
	<b>20</b>	100	91	82	74	67	61	55	49	44	40	34
	<b>21</b>	100	91	83	75	68	62	56	49	45	41	34
	<b>22</b>	100	91	83	76	69	63	57	49	45	42	36
	<b>23</b>	100	91	83	76	69	63	58	49	46	42	36
	<b>24</b>	100	92	84	76	69	63	58	49	46	43	36
	<b>25</b>	100	92	84	77	70	64	59	50	47	43	38
	<b>26</b>	100	92	84	77	70	64	59	50	47	44	38
	<b>27</b>	100	92	85	77	70	64	59	51	48	44	38
	<b>28</b>	100	93	86	78	71	64	59	53	48	44	39
	<b>29</b>	100	93	87	79	71	65	60	54	50	45	39
<b>30</b>	100	93	87	79	71	65	61	55	50	45	39	

**Таблиця 9**

Залежність коефіцієнта поверхневого натягу води

від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-3}, \text{Н/м}$
0	75,49
5	74,75
10	74,01
12	73,70
14	73,41
16	73,11
18	72,82
20	72,52
21	72,37
22	72,22
23	72,08
24	71,93
25	71,78
26	71,63
28	71,33
30	71,03

$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-3}, \text{Н/м}$
32	70,74
34	70,44
36	70,14
38	69,85
40	69,54
45	68,60
50	67,80
55	66,90
60	66,00
65	65,10
70	64,20
75	63,30
80	62,30
90	60,75
100	58,85