

**Державний комітет зв'язку та інформатизації  
Київський коледж зв'язку**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ  
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ  
(Механіка, молекулярна фізика, електромагнетизм)**

|

**Київ - 2004**

**ББК В30 р  
М545**

**Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізики  
(Механіка, молекулярна фізика, електромагнетизм) /Укладач  
М.В.Головко.- К.: НТЛЛ ККЗ, 2004.- 60 с.**

**Укладач: Головко М.В., к.п.н.**

**Рецензент: Костюкевич Д.Я., к.п.н.**

**Рекомендовано до друку методичною радою Київського коледжу зв'язку.**

У посібнику подано методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізики (розділи “Механіка”, “Молекулярна фізика”, “Електрика та магнетизм”, розрахунку похибок вимірювань фізичних величин. Може бути використаний для підготовки до виконання лабораторних робіт студентами вищих навчальних закладів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр”.

© Науково-технічна лабораторія Київського коледжу зв'язку, 2004

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Оцінка точності вимірювань фізичних величин та розрахунок похибок.....	
2. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт.....	
2.1. Лабораторна робота № 1. <i>Визначення густини тіл правильної геометричної форми та обчислення похибок непрямих вимірювань.....</i>	
2.2. Лабораторна робота № 2. <i>Вивчення розподілу випадкових величин та визначення прискорення вільного падіння за допомогою маятника.....</i>	
2.3. Лабораторна робота № 3. <i>Вивчення обертального руху твердого тіла.....</i>	
2.4. Лабораторна робота № 4. <i>Визначення моменту інерції махового колеса динамічним методом.....</i>	
2.5. Лабораторна робота № 5. <i>Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідин методом Стокса.....</i>	
2.6. Лабораторна робота № 6. <i>Визначення відношення питомих теплоємностей повітря <math>C_p/C_v</math>.....</i>	
2.7. Лабораторна робота № 7. <i>Перевірка правил Кірхгофа.....</i>	
2.8. Лабораторна робота № 8. <i>Дослідження законів електролізу та визначення заряду одновалентного іона .....</i>	
2.9. Лабораторна робота № 9. <i>Визначення опору провідника методом вольтметра і амперметра.....</i>	
2.10. Лабораторна робота № 10. <i>Дослідження роботи трансформатора.....</i>	
Додатки.....	

## ВСТУП

Фізика як наука про явища та процеси навколишнього світу є наукою експериментальною. Тому саме експеримент відіграє важливу роль у здобуванні нового знання, дає можливість виявляти та вивчати фізичні закономірності, перевіряти справедливість фізичних теорій та гіпотез. Не менш важливою є роль експерименту у навчанні фізики, оскільки лише з використанням експериментального методу можна досягти глибокого оволодіння відповідними знаннями та вміннями. З огляду на це, фізичному експерименту відводиться важливе місце в навчальному процесі з фізики. Зокрема, навчальними програмами передбачено виконання учнями загальноосвітніх шкіл та студентами технічних вищих навчальних закладів I-II рівнів акредитації лабораторних робіт з фізики.

Основною метою лабораторних робіт з фізики є закріплення набутих під час теоретичних занять знань та формування навичок практичної діяльності, зокрема:

- планувати та реалізовувати фізичний експеримент;
- збирати експериментальні установки;
- виконувати вимірювання фізичних величин;
- користуватися вимірювальними інструментами та приладами;
- обробляти отримані результати;
- будувати графічні залежності між виміряними величинами;
- оцінювати точність вимірювань та розраховувати похибки вимірювань;
- робити висновки за отриманими результатами.

Обов'язковою умовою допуску студента до виконання лабораторних робіт з фізики в лабораторії є *проходження* ним *інструктажу з правил техніки безпеки* з фіксуванням в спеціальному журналі, що зберігається в лабораторії.

**Виконання лабораторної роботи** здійснюється в декілька етапів:

1. Отримання завдання до лабораторної роботи (завдання видається викладачем заздалегідь).
2. Опрацювання опису (інструкції до виконання) лабораторної роботи та теоретичного матеріалу конспекту, підручників або посібників з метою з'ясування фізичного змісту процесів, що будуть досліджуватися на лабораторній роботі, а також ознайомлення зі схемою експерименту, особливостями його організації, обробки та інтерпретації результатів вимірювань, відповідь на контрольні питання.
3. Підготовка попереднього звіту за опрацьованими матеріалами, який містить номер лабораторної роботи, дату виконання, тему та мету роботи, перелік необхідних приладів та матеріалів, порядок виконання лабораторної роботи, заготовки таблиць для фіксування результатів вимірювань, перелік контрольних питань.

4. Допуск до лабораторної роботи (перевірка викладачем готовність студентів до виконання роботи: мети, основних завдань та змісту лабораторної роботи, порядку та особливостей її виконання).
5. Короткий інструктаж безпосередньо перед початком виконання лабораторної роботи.
6. Підготовка робочого місця та виконання вимірювань:
  - а) вивчення робочого місця та перевірка наявності приладів та устаткування, необхідного для виконання лабораторної роботи;
  - б) ознайомлення з вимірювальними приладами, що використовуються в лабораторній роботі (з'ясування призначення, особливостей використання, визначення ціни поділки вимірювальних приладів);
  - в) складання установки лабораторної роботи відповідно до схеми експерименту, вказаної викладачем (наведеної в описі);
  - г) повідомлення викладача про готовність до зняття показів вимірювальних приладів та отримання дозволу на дослідження;
  - д) проведення необхідних вимірювань та занесення виміряних значень фізичних величин до таблиць;
  - е) повідомлення викладача про виконання вимірювань та отримані результати;
  - є) приведення в порядок робочого місця та здача його викладачеві.
7. Обробка отриманих результатів:
  - а) знаходження в довідковій літературі значень фізичних величин, потрібних для розрахунків;
  - б) розрахунок потрібних (за планом лабораторної роботи) величин за експериментальними та довідковими даними;
  - в) побудова (за потребою) графічних залежностей між виміряними та обчисленими фізичними величинами;
  - г) розрахунок абсолютних та відносних похибок вимірювань фізичних величин та оцінка точності проведених вимірювань;
  - д) висновки за отриманими результатами.
8. Оформлення звіту про виконану лабораторну роботу (подати відповідні розрахунки, схеми, графіки, результати, отримані в процесі обробки отриманих даних, сформулювати висновки та вказати пропозиції щодо виконання лабораторної роботи).
9. Захист лабораторної роботи:
  - а) надання викладачеві оформленого звіту про виконану лабораторну роботу;
  - б) відповідь на контрольні та додаткові питання, які стосуються особливостей виконання лабораторної роботи та фізичного змісту явищ і процесів, що досліджуються.

Під час роботи в фізичній лабораторії потрібно дотримуватися правил техніки безпеки та правил поведінки в лабораторії, **чітко виконувати вказівки та інструкції викладача (лаборанта)**, акуратно поводитися з обладнанням та устаткуванням.

Запропонований посібник містить методичні вказівки до виконання та оцінювання лабораторних робіт з курсу загальної фізики, що виконуються студентами освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” згідно навчального плану технічних вищих навчальних закладів і охоплює розділи “Механіка”, “Молекулярна фізика”, “Електрика та магнетизм”.

**Навчальна література**, рекомендована для підготовки до виконання лабораторних робіт:

1. Головка М.В. Електрика та магнетизм. Посібник для самостійної роботи з фізики. - К.: НТЛ ККЗ, 2002.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навч. посібник /За ред. І.Т.Горбачука. - К.: Вища школа., 1992.- С. 238-245.
3. Загальний курс фізики: У 3 т.: Навч. пос. /За ред. І.М.Кучерука. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика. - К.: Техніка, 1999.
4. Загальний курс фізики: У 3 т.: Навч. пос. /За ред. І.М.Кучерука. Т. 2: Електрика і магнетизм. - К.: Техніка, 2001.

# 1. ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ФІЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ТА РОЗРАХУНОК ПОХИБОК

Під час проведення експерименту виконуються вимірювання, в результаті яких отримують дані, що обробляються з використанням математичних методів. Особливо ретельно й точно вимірюються всі показники, що характеризують той чи інший процес, при постановці кількісного експерименту. Вимірювання фізичної величини – це знаходження значень фізичної величини досліdnим шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Відповідно під значенням фізичної величини розуміють оцінку фізичної величини за допомогою деякого числа прийнятих для неї одиниць.

Вимірюючи фізичні величини, використовують такі методи:

- **безпосередньої оцінки** (значення фізичної величини визначається безпосередньо за допомогою вимірювального приладу прямої дії (термометр, вольтметр, амперметр);

- **порівняння з мірою** (вимірювана величина порівнюється з величиною, відтворюваною мірою);

- **протиставлення** (порівняння з мірою, при якому вимірювана величина та величина, що відтворюється мірою, одночасно впливають на прилад, за допомогою якого здійснюється порівняння);

- **диференціальний** (метод порівняння з мірою, при якому на вимірювальний прилад впливає різниця вимірюваної та відомої величини, яка відтворюється мірою);

- **нульовий** (порівняння з мірою, в якій результуючий ефект впливу величин на прилад порівняння доводять до нуля);

- **заміщення** (порівняння з мірою, при якому вимірювану величину заміщають відомою величиною, яка відтворюється мірою);

- **збігів** (порівняння з мірою, при якому різницю між вимірюваною величиною і величиною, яка відтворюється мірою, вимірюють, використовуючи збіг позначок шкал або періодичних сигналів).

**Істинне значення фізичної величини** - це значення величини, яке ідеальним чином відобразило б в якісному та кількісному відношеннях відповідну властивість об'єкта.

**Дійсне значення фізичної величини** – це значення величини, яке знайдене експериментально й настільки наближається до істинного значення, що для даної цілі може бути використаним замість нього.

Фізична величина, якій за означенням надається числове значення, рівне 1, називається одиницею фізичної величини. До прийняття у 1960 році Міжнародної системи одиниць (“SI”) у різних країнах існували різні системи одиниць. Найбільш поширені з них: абсолютна система Гауса (за основу прийняті три одиниці – міліметр, міліграм, секунда); система СГС (сантиметр, грам, секунда); система МКГСС (метр, кілограм-сила, секунда); система МКСА (Метр, кілограм, секунда, ампер) та ін.

До Міжнародної системи входять сім основних одиниць:

**довжини** – метр (м),

**маси** – кілограм (кг),

**часу** – секунда (с),

**сили струму** – ампер (А),

**термодинамічної температури** – кельвін (К),

**сили світла** – кандела (кд),

**кількості речовини** – моль (моль), а також дві похідні величини – **радіан** (рад) та **стерадіан** (ср).

**Метр** (одиниця довжини) дорівнює 1 650 763, 73 довжини хвилі у вакуумі випромінювання, яке відповідає переходу між рівнями  $2p_{10}$  та  $5d_5$  атома криптону-86.

**Кілограм** (одиниця маси) дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма.

**Секунда** (одиниця часу) дорівнює 9 92 631 770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

**Ампер** (одиниця сили струму) дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та дуже малої площі поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинив би виникнення на ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

**Кельвін** (одиниця термодинамічної температури) дорівнює  $1/273,16$  частини термодинамічної температури потрібної точки води.

**Моль** (одиниця кількості речовини) дорівнює кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг.

**Кандела** (одиниця сили світла) дорівнює силі світла, що випромінюється з поверхні площею  $1/600000$  м<sup>2</sup> повного випромінювача в перпендикулярному напрямі при температурі випромінювача, яка дорівнює температурі тверднення платини при тиску 101 325 Па.

**Радіан** (одиниця плоского кута) дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

**Стерадіан** (одиниця тілесного кута) дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата із стороною, рівною радіусу сфери.

Результати вимірювань зручно подавати у вигляді кратних і частинних одиниць. Наприклад:

$10^2$  – гекто (г)     $10^{-2}$  – санти (с)

$10^3$  – кіло (к)     $10^{-3}$  – мілі (м)

$10^6$  – мега (М)     $10^{-6}$  – мікро (мк)

$10^9$  – гіга (Г)     $10^{-9}$  – нано (н)

$10^{12}$  – тера (Т)     $10^{-12}$  – піко (п).



Вимірювання фізичних величин проводять за допомогою засобів вимірювання – технічних пристроїв із нормованими властивостями:

- *міри* (дають змогу відтворювати фізичні величини заданого розміру. Наприклад, гиря – міра маси, лінійка – міра довжини);
- *вимірювальні прилади* (подають вимірювану інформацію у формі, доступній для безпосереднього сприймання спостерігачем);
- *вимірювальні установки* (поєднують міри, вимірювальні прилади, допоміжні пристрої).

Оскільки будь-яку фізичну величину абсолютно точно виміряти неможливо, то необхідно вказати граничні значення, між якими міститься вимірювана величина. Таким чином, вимірюючи фізичні величини, отримують їх значення з певними відхиленнями від істинного значення, які називають похибками вимірювань. Похибки вимірювань поділяють на три основні класи:

а) **систематичні** (зумовлені похибками засобів вимірювань, недосконалістю методів вимірювань);

б) **випадкові** (вплив навколишнього середовища, недосконалість органів чуттів);

в) **грубі похибки** (зумовлені неухважністю експериментатора, значно перевищують очікувані похибки і вимагають проведення повторного вимірювання).

За місцем виникнення розрізняють інструментальні та методичні похибки. Інструментальні похибки входять до похибки вимірювання і залежать від похибок засобів вимірювання. Методичні похибки теж входять до похибки вимірювання, а їх джерелом є недосконалість методів вимірювань та вимірювальних перетворень, обмеженість точності певних фізичних констант.

Для оцінки точності вимірювань використовують абсолютні та відносні похибки. Абсолютна похибка виражається в одиницях вимірюваної величини, має її розмірність і дорівнює різниці істинного значення вимірюваної величини  $X$  та одного з вимірних значень фізичної величини  $x_i$ :  $\Delta x_i = X - x_i$ .

Для оцінки якості вимірювань використовують відносну похибку – відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини:  $\delta = \frac{\Delta x_i}{X}$ . Відносна похибка вимірюється у відносних одиницях або відсотках (тоді даний вираз помножують на 100%).

Для вимірювання фізичних величин при вивченні електричних явищ використовують електровимірювальні прилади, такі, як амперметр, вольтметр, омметр, ватметр, гальванометр. Основними показниками якості таких приладів є чутливість, похибки вимірювань, залежність від умов зовнішнього середовища, стійкістю до перевантажень та ін. Відношення лінійного або кутового зміщення до зміни вимірюваної величини називають чутливістю електровимірювального приладу, а величину, обернену до чутливості – ціною поділки.

Абсолютною похибкою вимірювального приладу є різниця між його показом  $x_N$  та істинним значенням вимірюваної величини  $x$ :  $\Delta x_i = x_N - x$ . Відношення абсолютної похибки до нормуючого значення  $x_N$  (нормуюче

значення  $x_N$  – умовне значення, що для приладів з односторонньою шкалою може дорівнювати верхній межі вимірювань (номінальне значення приладу), а з двосторонньою – повному діапазону вимірювань), що виражається у відсотках, називається **зведеною похибкою**:

$$\gamma = \frac{X}{X_N} \cdot 100\% .$$

Зведена похибка  $\gamma$  характеризує точність електровимірювального приладу. За ступенем точності електровимірювальні прилади поділяються на 8 класів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Клас точності вказується на шкалі вимірювального приладу і дає можливість визначити абсолютну похибку:

$$\Delta X = \frac{\gamma \cdot X_N}{100\%} .$$

**Клас точності** приладу  $\gamma$  визначає найбільшу допустиму основну зведену похибку в робочій частині шкали, виражену абсолютним числом, значення якого дорівнює зведеній похибці у відсотках.

Електровимірювальні прилади, клас точності яких становить від 0,05 до 0,5, називають прецизійними і використовують їх для точних вимірювань, як правило, в лабораторних умовах. Прилади класу точності від 1,0 до 4,0 називають технічними і використовують для виробничих потреб.

За принципом дії електровимірювальні прилади відносять до однієї з таких систем: магнітоелектричної, електромагнітної, електростатичної, електродинамічної, індукційної, термоелектричної, детекторної, вібраційної. Принцип дії приладів магнітоелектричної системи ґрунтується на взаємодії магнітного поля постійного магніту, закріпленого стаціонарно, та котушки, що має форму рамки і по якій проходить вимірюваний струм, що створює слабе магнітне поле. Рамка, яка може обертатися навколо осердя в магнітному полі постійного магніту з'єднана зі стрілкою, кут повороту якої пропорційний силі струму. Магнітоелектричні прилади досить чутливі та високоточні, споживають небагато електроенергії, але мають порівняно складну будову і придатні для вимірювань лише постійних струмів.

Принцип дії вимірювальних приладів електромагнітної системи ґрунтується на взаємодії магнітного поля нерухомої котушки, по якій проходить струм, та рухомого феромагнітного осердя. Струм, що вимірюється, створює навколо котушки магнітне поле, в яке втягується осердя зі сталльної пластинки.

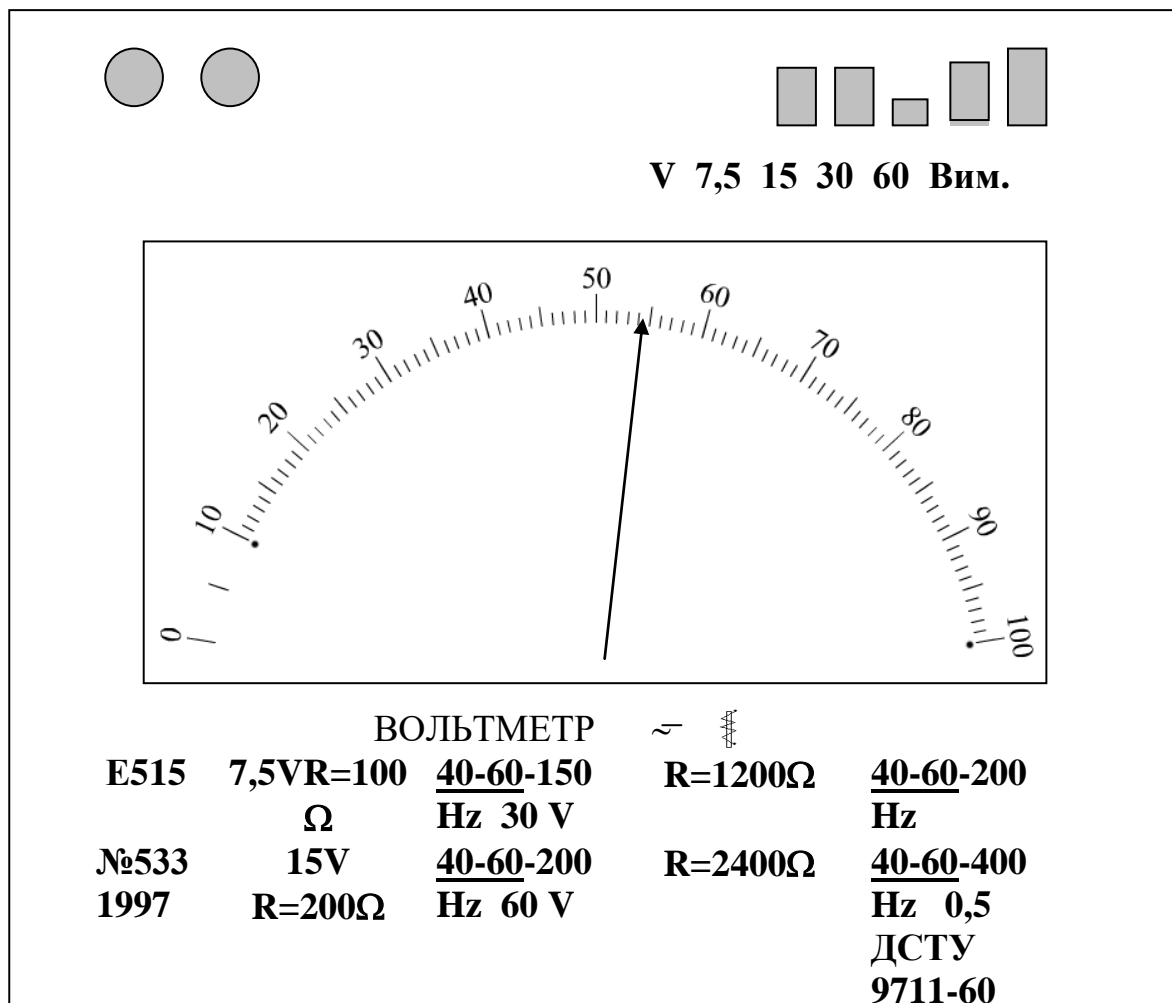
Прилади такої системи використовують для вимірювання постійного струму, а також діючого значення змінного струму та визначення напруги в електричному колі. Вони порівняно прості за конструкцією, стійкі до перевантажень, але мають нерівномірність шкали та меншу точність.

Сьогодні досить широко використовують цифрові прилади, в яких вимірювана величина визначається у дискретно-цифровій формі за допомогою цифрових індикаторів.

Розглянемо передню панель одного з вимірювальних приладів, наприклад, вольтметра (мал.1, для амперметра правила вимірювання аналогічні).

Цей прилад належить до приладів електромагнітної системи (на корпусі є зображення електромагнітної системи  $\text{⏏}$ ) і призначений для вимірювання як постійного, так і змінного струму (значок  $\sim$ ).

Вольтметр має чотири номінальних значення шкали вимірювання: 7,5; 15; 30 та 60 В. Перемикання здійснюється за допомогою перемикачів, розташованих на правій верхній частині корпусу приладу. Клас точності приладу, зазначений на корпусі справа внизу –  $\gamma = 0,5$ .



Мал. 1.

**Ціна поділки приладу (C)** визначається як відношення номінального значення шкали ( $U_N$ ) до кількості поділок шкали (N):

$$C = \frac{U_N}{N}.$$

**Чутливість приладу ( $S$ )** – це величина, обернена до ціни поділки:

$$S = \frac{1}{C} = \frac{N}{U_N}.$$

Вимірні значення визначаються як добуток ціни поділки ( $C$ ) та кількості поділок, на яку відхилилася стрілка приладу ( $n$ ):

$$U = C \cdot n.$$

**Абсолютна допустима похибка приладу ( $\Delta U$ )** визначається як:

$$\Delta U = \gamma \cdot \frac{U_N}{100\%}.$$

**Відносна похибка вимірювання ( $\delta$ )**, виконаного за допомогою приладу, визначається таким чином:

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

Нехай вольтметр, зображений на малюнку 1, увімкнули паралельно до навантаження в коло постійного струму за умови, що встановлено номінальне значення шкали 30 В. При цьому стрілка приладу відхилилася на 55 поділок.

Визначимо основні показники вольтметра. Спочатку знайдемо ціну поділки:

$$C = \frac{U_N}{N} = \frac{30}{100} = 0,3B.$$

Чутливість вольтметра:

$$S = \frac{1}{C} = \frac{1}{0,3} = 3,33 \text{ год} / B.$$

Вимірне значення напруги дорівнює:

$$U = C \cdot n = 0,3 \cdot 55 = 16,5B.$$

Абсолютна та відносна похибки вимірювання напруги:

$$\Delta U = \gamma \cdot \frac{U_N}{100\%} = 0,5 \cdot \frac{30}{100\%} = 0,15B;$$

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{0,15}{16,5} \cdot 100\% \approx 1\% .$$

Таким чином, значення напруги у колі дорівнює:

$$U = (16,5 \pm 0,15)V \text{ при } \delta = 1\% .$$

Отже, для досягнення необхідної точності електричних вимірювань, необхідно підбирати прилади відповідного класу точності, а також встановлювати найбільш прийнятне номінальне значення шкали вимірювання (чим меншим воно буде при заданому класі точності, тим менша похибка вимірювань).

## 2. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

### Лабораторна робота №1

#### Визначення густини тіл правильної геометричної форми та обчислення похибок непрямих вимірювань

**Мета роботи:** опанувати методи визначення густин тіл правильної геометричної форми та розрахунку похибок непрямих вимірювань.

**Прилади і матеріали:** тіла правильної геометричної форми, штангенциркуль, мікромметр, аналітичні терези, важки.

#### *Короткі теоретичні відомості*

Густиною однорідної речовини називають фізичну величину, яка визначається масою речовини в одиниці об'єму. Густина є сталою величиною і дорівнює відношенню маси речовини до об'єму, який вона займає:

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

Якщо тіло складається з неоднорідної речовини, то його густина визначається як границя відношення маси до об'єму за умови, що об'єм стягується в точку, в якій знаходиться густина. Густина речовини залежить від температури. В техніці використовують відносну густину – величину, що дорівнює відношенню густини досліджуваної речовини до густини умовної речовини при певних умовах. Умовною величиною для характеристики густини твердих та рідких тіл вибирають дистильовану воду. Для розрахунків використовують відношення густини речовини при температурі 20° С до густини дистильованої води при температурі 4° С, яка становить 1000 кг/м<sup>3</sup>. Тому відносна густина речовини в СІ дорівнює густині при 20° С.

Визначити густину тіла можна виконавши вимірювання відповідних фізичних величин.

Вимірювання фізичної величини – це знаходження значень фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Відповідно під значенням фізичної величини розуміють оцінку фізичної величини за допомогою деякого числа прийнятих для неї одиниць.

Вимірюючи фізичні величини, використовують такі методи:

- *безпосередньої оцінки* (значення фізичної величини визначається безпосередньо за допомогою вимірювального приладу прямої дії (термометр, вольтметр, амперметр);

- *порівняння з мірою* (вимірювана величина порівнюється з величиною, відтворюваною мірою);

- *протиставлення* (порівняння з мірою, при якому вимірювана величина та величина, що відтворюється мірою, одночасно впливають на прилад, за допомогою якого здійснюється порівняння);

- *диференціальний* (метод порівняння з мірою, при якому на вимірювальний прилад впливає різниця вимірюваної та відомої величини, яка відтворюється мірою);

- *нульовий* (порівняння з мірою, в якій результуючий ефект впливу величин на прилад порівняння доводять до нуля);

- *заміщення* (порівняння з мірою, при якому вимірювану величину заміщають відомою величиною, яка відтворюється мірою);

- *збігів* (порівняння з мірою, при якому різницю між вимірюваною величиною і величиною, яка відтворюється мірою, вимірюють, використовуючи збіг позначок шкал або періодичних сигналів).

*Істинне значення фізичної величини* - це значення величини, яке ідеальним чином відобразило б в якісному та кількісному відношеннях відповідну властивість об'єкта.

*Дійсне значення фізичної величини* – це значення величини, яке знайдене експериментально й настільки наближається до істинного значення, що для даної цілі може бути використане замість нього.

Вимірювання фізичних величин проводять за допомогою засобів вимірювання – технічних пристроїв із нормованими властивостями:

- *міри* (дають змогу відтворювати фізичні величини заданого розміру.

Наприклад, різноваги – міри маси, лінійка – міра довжини);

- *вимірювальні прилади* (подають вимірювану інформацію у формі, доступній для безпосереднього сприймання спостерігачем);

- *вимірювальні установки* (поєднують міри, вимірювальні прилади, допоміжні пристрої).

Оскільки будь-яку фізичну величину абсолютно точно виміряти неможливо, то необхідно вказати граничні значення, між якими міститься вимірювана величина. Таким чином, вимірюючи фізичні величини, отримують їх значення з певними відхиленнями від істинного значення, які називають похибками вимірювань. Похибки вимірювань поділяють на три основні класи:

а) *систематичні* (зумовлені похибками засобів вимірювань, недосконалістю методів вимірювань);

б) *випадкові* (вплив навколишнього середовища, недосконалість органів чуттів);

в) *грубі похибки* (зумовлені неухважністю експериментатора, значно перевищують очікувані похибки і вимагають проведення повторного вимірювання).

За місцем виникнення розрізняють інструментальні та методичні похибки. Інструментальні похибки входять до похибки вимірювання і залежать від похибок засобів вимірювання. Методичні похибки теж входять до похибки вимірювання, а їх джерелом є недосконалість методів вимірювань та вимірювальних перетворень, обмеженість точності певних фізичних констант.

Вимірювання бувають прямими та непрямими. Прямими називають вимірювання, при яких шукане значення фізичної величини знаходять безпосередньо в процесі досліду. Для оцінки точності прямих вимірювань використовують абсолютні та відносні похибки. Абсолютна похибка

виражається в одиницях вимірюваної величини, має її розмірність і дорівнює різниці істинного значення вимірюваної величини  $X$  (істинне значення

вимірюваної величини приблизно дорівнює середньому значенню:  $X \approx \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ ,

де  $n$  – кількість вимірювань) та одного з вимірних значень фізичної величини  $x_i$ :  $\Delta x_i = \bar{X} - x_i$ .

Для оцінки якості вимірювань використовують відносну похибку – відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини:  $\delta = \frac{\Delta x_i}{X}$ . Відносна похибка вимірюється у відносних одиницях або відсотках (тоді даний вираз помножують на 100%).

Систематична похибка не перевищує похибку інструмента вимірювання, якщо зменшити вплив інших чинників, що викликають її. Тому за систематичну похибку, як правило, приймають інструментальну. Інструментальною похибкою  $\Delta x_{инстр}$  називається складова похибки вимірювання, що залежить від похибок засобів вимірювання. Ця похибка залежить від конструктивних особливостей вимірювального приладу і визначається точністю виготовлення його складових частин. Інструментальна похибка вказується на вимірювальному приладі, або приймається як ціна найменшої поділки шкали вимірювального приладу (наприклад, за інструментальну похибку учнівської лінійки можна прийняти 1 мм – ціну найменшої поділки), а також може бути знайдена як різниця двох найближчих значень вимірюваної величини.

Для більш точної оцінки прямих вимірювань використовують середньоквадратичне відхилення  $\bar{S}$  (показує відхилення середнього значення

вимірюваної величини), яке визначається за формулою:  $\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}$ , де  $\Delta x_i$  –

абсолютна похибка вимірювань. Випадкова похибка – це складова похибки вимірювань, що змінюється випадково при повторних вимірюваннях. Для її розрахунку використовують формулу:  $\Delta x_{вип} = \bar{S}t$ , де  $t$  – коефіцієнт Стьюдента, який встановлює залежність між кількістю вимірювань та їх точністю. Коефіцієнт Стьюдента залежить від кількості вимірювань та надійної імовірності або коефіцієнта надійності  $\alpha$ , який може приймати значення 0,90; 0,95; 0,98; 0,99. Для вимірювань, що виконуються в лабораторних роботах можна обрати надійну імовірність, що дорівнює 0,95. Надійну ймовірність 0,99 задають для високоточних та однократних вимірювань, які складно повторити. Для  $n = 5$  вимірювань та  $\alpha = 0,95$  коефіцієнт Стьюдента  $t = 2,78$ .

Повна похибка прямого вимірювання визначається через інструментальну та випадкову похибку за формулою:  $\Delta x = \sqrt{\Delta x_{инстр}^2 + \Delta x_{вип}^2}$ .

Непрямими називають вимірювання, при яких шукане значення знаходять на основі відомої залежності між цією величиною і величинами, що піддаються прямим вимірюванням. Так, наприклад, густину тіла правильної геометричної форми не можна безпосередньо виміряти. Потрібно скористатися



формулою:  $\rho = \frac{m}{V}$ . Масу можна визначити прямим вимірюванням за допомогою аналітичних терезів з важками, а об'єм подати у вигляді математичної залежності лінійних розмірів тіла, які теж визначаються безпосередньо за допомогою мікрометра або штангенциркуля. Таким чином, для обчислення похибки непрямих вимірювань потрібно шукану величину представити у вигляді математичної залежності, що містить величини, які вимірюються безпосередньо вимірювальними приладами.

Для прикладу розглянемо прямокутний паралелепіпед. Густина речовини, з якої він виготовлений, визначається за формулою:

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot c},$$

де  $m$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – відповідно, маса та лінійні розміри паралелепіпеда (мал. 2.).

Результат вимірювання густини записується у вигляді:  $\rho = \bar{\rho} \pm \Delta\rho$  при  $\delta_\rho = \dots\%$ , де  $\delta_\rho$  - відносна похибка непрямого вимірювання густини.

Середнє значення густини обчислюється за формулою:

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{\bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}},$$

де  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  - середні значення лінійних розмірів.

Відносну похибку непрямих вимірювань визначають з використанням методів теорії ймовірності та статистичного розподілу випадкових величин. Так, відносна похибка непрямого вимірювання за деякою математичною залежністю  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  розраховується за формулою:

$$\delta_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \ln f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n\right)^2},$$

де  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  - повні похибки прямих вимірювань величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , що входять до математичної залежності,  $\frac{\partial \ln f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n}$  - частина похідної функції  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  по змінній  $x_n$ .

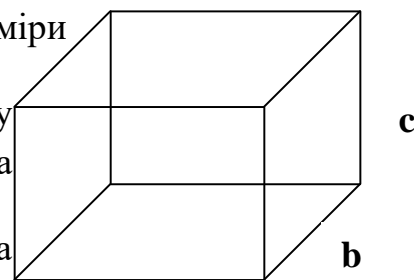
Для даного випадку  $x_1 = a, x_2 = b, x_3 = c$ . Тоді відносна похибка визначатиметься за формулою:

$$\delta_\rho = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2},$$

де  $\Delta m, \Delta a, \Delta b, \Delta c$  - повні похибки прямих вимірювань маси, довжини та ширини основи, висоти паралелепіпеда,  $\bar{m}, \bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  - відповідно, середні значення маси та лінійних розмірів паралелепіпеда.

Абсолютну похибку  $\Delta\rho$  визначають із співвідношення:  $\Delta\rho = \delta_\rho \cdot \bar{\rho}$ .

Тоді:



а Мал. 2.



### *Контрольні питання*

1. Яку фізичну величину називають густиною речовини?
2. З якою метою використовують відносну густину речовини та як вона пов'язана з густиною?
3. Які методи вимірювань фізичних величин використовувалися у процесі виконання лабораторної роботи?
4. Які основні класи похибок можливі при виконанні прямих вимірювань фізичних величин?
5. Які можливі методи підвищення точності вимірювань фізичних величин?
6. В чому полягають особливості розрахунку похибок непрямих вимірювань?
7. Які чинники впливали на точність вимірювань, що проводилися в даній лабораторній роботі?

## Лабораторна робота №2

### Вивчення розподілу випадкових величин та визначення прискорення вільного падіння за допомогою маятника

**Мета роботи:** ознайомитися з основними положеннями теорії розподілу випадкових величин; визначити прискорення вільного падіння з використанням маятника; розрахувати похибки вимірювань прискорення вільного падіння.

**Прилади і матеріали:** маятник, секундомір, вимірювальна стрічка.

#### Короткі теоретичні відомості

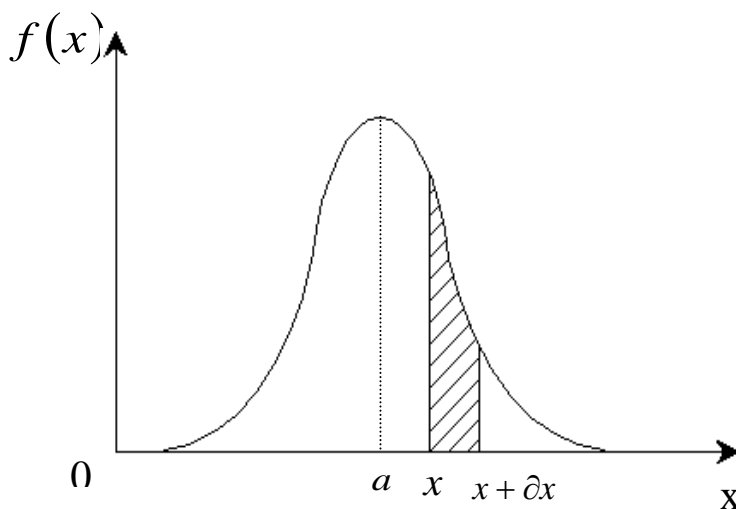
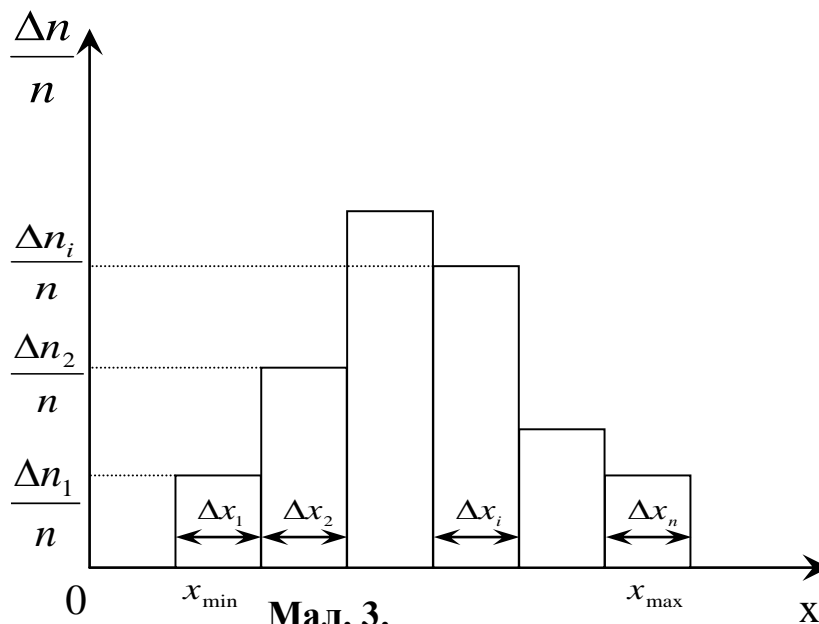
Якщо виконується велика кількість вимірювань ( $n$ -скінчене число вимірювань) фізичної величини  $x$ , то можна вважати, що істинне значення фізичної величини дорівнює середньому арифметичному, а систематичні похибки відсутні. При цьому впливають на точність вимірювання випадкові похибки. Поява кожного виміряного значення фізичної величини буде випадковою подією, прояв якої визначається імовірністю  $P$ , тобто, числом, навколо якого групуються відносні частоти випадкової події в різних серіях випробувань. Відносною частотою події  $A$  називають відношення числа появи певної події (виміряного значення) до числа всіх випробувань ( $n$ -вимірювань), або  $P_A = \frac{n_A}{n}$ . Для більш повного опису появи випадкових подій використовують функцію розподілу. Функцією розподілу випадкової величини  $X$  називають функцію  $F(X)$ , яка дорівнює імовірності того, що випадкова величина  $X$  приймає значення, менше деякого числа  $x$ . Геометричний зміст функції розподілу полягає в тому, що для кожного значення  $x$  функція  $F(x)$  дорівнює імовірності того, що випадкова величина  $X$  набуває на числовій прямій значень, які розміщуються ліворуч від точки  $x$ .

Розглянемо послідовність  $n$  вимірювань деякої фізичної величини  $X$ :  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ . Визначимо частоту появи кожного з виміряних значень. Для цього серед виміряних значень виділимо найменше  $x_{\min}$  та найбільше  $x_{\max}$ . Якщо розбити діапазон виміряних значень на  $N$  рівних інтервалів  $\Delta x$  і визначити кількість виміряних значень фізичної величини, що містяться в кожному з інтервалів  $(\Delta n_1, \Delta n_2, \dots, \Delta n_i, \dots, \Delta n_N)$ , то частота появи виміряних значень у кожному з інтервалів визначатиметься як  $\frac{\Delta n_1}{n}, \frac{\Delta n_2}{n}, \dots, \frac{\Delta n_i}{n}, \dots, \frac{\Delta n_N}{n}$ .

За отриманими величинами можна побудувати гістограму виміряних величин (мал. 3.), де по осі абсцис відкладаються числові значення величин інтервалів  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_i, \dots, \Delta x_N$ , а по осі ординат - частоту появ виміряних значень.

Гістограма дає можливість оцінити, які з виміряних значень фізичної величини з'являються частіше, ніж інші.

Вершини прямокутників гістограми утворюють неперервну лінію (мал.4), яку називають кривою розподілу вимірюваних величин, а відповідну їй функцію – функцією розподілу.



Розподіл випадкових величин може описуватися різними законами, серед яких досить часто використовують нормальний закон розподілу Гауса, якому відповідає крива на малюнку 4. Особливістю нормального розподілу є симетричність появи випадкових величин, рівних за розміром та протилежних за знаком. Закон Гауса описується формулою:

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

- де  $x$  – випадкове значення вимірюваної величини;
- $\sigma$  – параметр, який називається дисперсією;
- $a$  – істинне значення вимірюваної величини.

Зміст функції розподілу полягає в тому, що добуток  $f(x) \cdot \Delta x$  (або заштрихована площа, мал. 4) дорівнює ймовірності, з якою виміряне значення фізичної величини  $X$  потрапляє в інтервал  $[x, x + \Delta x]$ .

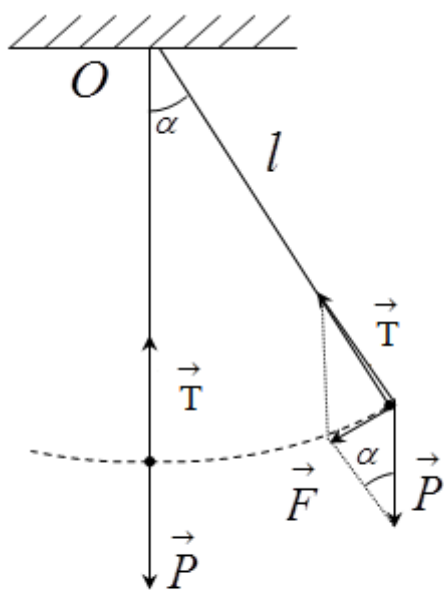
Найбільша частота появи відповідає околу точки  $a$  – максимуму функції розподілу, і, відповідно, істинному значенню вимірюваної величини. При нескінченній кількості вимірювань це значення дорівнює середньому арифметичному:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

а  $\sigma$  (дисперсія) - середньоквадратичному відхиленню:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}}.$$

Для визначення прискорення вільного падіння та вивчення нормального розподілу випадкових величин, якою є прискорення при багатократних вимірюваннях, можна використати метод математичного маятника.



Мал. 5.

Математичним маятником є модель – матеріальна точка, в якій сконцентрована маса, підвішена на невагомій нерозтяжній нитці. Для конкретних вимірювань можна використати маятник, який складається з масивної кулі, що знаходиться на нитці, довжина якої значно більша ніж діаметр кулі (мал. 5).

Якщо маятник відхилити від положення рівноваги і відпустити, то він буде здійснювати гармонічні коливання за рахунок вертаючої сили  $\vec{F}$ , які описуються рівнянням  $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ , де  $A$  – амплітуда коливань,  $\omega_0 t + \varphi$  – фаза коливань.

Період коливань маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

де  $l$  - довжина нитки, а  $g$  - прискорення вільного падіння.

Період коливань можна також визначити як час одного повного коливання, або відношення часу кількох повних коливань до їх кількості:

$$T = \frac{t}{N}.$$

Тоді прискорення вільного падіння можна визначити за формулою:

$$g = \frac{4\pi^2 l N^2}{t^2}.$$

Вимірювання прискорення вільного падіння є непрямим вимірюванням, тому похибки можна визначити за правилами розрахунку похибок непрямих вимірювань:

$$\varepsilon_g = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{t}\right)^2}, \text{ а } \Delta g = \varepsilon_g \cdot \bar{g} = \bar{g} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{t}\right)^2},$$

де  $\Delta l, \Delta t$  - повні похибки прямих вимірювань довжини нитки та часу.

Виконавши велику кількість вимірювань часу  $N$  повних коливань можна побудувати гістограму вимірених значень та перевірити, чи відповідає отриманий розподіл закону нормального розподілу Гауса.

Для цього потрібно виписати результати вимірювань часу у порядку зростання  $t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$  від мінімального  $t_1$  до максимального  $t_n$ .

Для вимірених значень  $t_i$  з номером  $i > \frac{n}{2}$  знаходять значення величини  $\frac{i}{n+1}$ .

За таблицею знаходять значення  $Y_i$ , що відповідають закону нормального розподілу. Потім у прямокутній системі координат по осі абсцис відкладають значення часу  $t_i$ , а по осі ординат відповідні їм значення  $Y_i$ .

Розподіл вимірених значень часу  $N$  повних коливань маятника можна вважати нормальним, якщо отримані точки розташовуються приблизно вздовж прямої лінії.

### ***Порядок виконання роботи***

1. За допомогою вимірювальної стрічки виміряти довжину нитки маятника  $l$ .
2. Вивести маятник з положення рівноваги, відхиливши його на невеликий кут 3-5°.
3. Використовуючи секундомір, виміряти з точністю до сотих секунди час 5 повних коливань маятника. Вимірювання повторити 50-60 разів, а їх результати занести до таблиці 1.
4. Впорядкувати вимірених значення у порядку зростання від мінімального (табл. 1).
5. Розбити діапазон вимірених значень на 5-7 однакових інтервалів, починаючи з  $t_{\min}$ :  $t_{\min} + \Delta t$  ( $\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n}$ ). Виділити значення  $t_i$ , що відповідають кожному інтервалу.

6. Визначити кількість вимірювань  $\Delta n_i$ , що потрапили в кожен з інтервалів.
7. Розрахувати частоту появи вимірних значень  $\frac{\Delta n_i}{n}$  у кожному з інтервалів.  
Результати розрахунків занести до таблиці 1.
8. Побудувати гістограму вимірних величин та зробити висновок про вигляд кривої розподілу випадкових величин.
9. Занести до таблиці 2 значення  $t_i$  з номером  $i \geq \frac{n}{2}$  (вимірні значення, починаючи з 25), розташовані у порядку зростання.
10. Розрахувати значення  $\frac{i}{n+1}$  і занести їх у табл. 2.
11. За табл. 3. для розрахованих значень  $\frac{i}{n+1}$  знайти значення  $Y_i$ .
12. У прямокутній системі координат побудувати точки з координатами  $(Y_i, t_i)$  та апроксимувати їх прямою лінією, розташовуючи точки на однаковій відстані з обох боків прямої.
13. При відсутності систематичного відхилення точок щодо цієї прямої можна зробити висновок про відповідність вимірних значень  $t_i$  закону нормального розподілу.
14. Розрахувати середнє арифметичне вимірних значень часу  $t_i$  (для інтервалу з найбільшою частотою появи вимірюваних величин).
15. Розрахувати середнє значення прискорення вільного падіння, використавши середнє значення часу, та абсолютну і відносну похибку його вимірювання. Результат записати у вигляді:  $g = \bar{g}_{\text{роз}} \pm \Delta g$  при  $\epsilon_g = \dots\%$ .
16. Зробити висновок про характер розподілу вимірних значень та точність вимірювання прискорення вільного падіння.

**Таблиця 1**

Вимірні значення $t_i, \text{с}$	Інтервал $\Delta t, \text{с}$	Впорядковані значення $t_i, \text{с}$ (у порядку зростання)	Кількість вимірювань в інтервалі $\Delta n$	Частота появи вимірюваних величин $\frac{\Delta n}{n}$
	1-й інтервал			
	2-й інтервал			
	3-й інтервал			
	4-й інтервал			
	5-й інтервал			



Таблиця 2

Значення $t_i$ для $i > \frac{n}{2}$								...								
Значення $\frac{i}{n+1}$								...								
$Y_i$ з таблиці 3								...								

Таблиця 3

$\frac{i}{n+1}$	$y_i$	$\frac{i}{n+1}$	$y_i$	$\frac{i}{n+1}$	$y_i$	$\frac{i}{n+1}$	$y_i$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
0,50	0,000000	0,70	0,524401	0,90	1,281552	0,983	2,120072
0,51	0,250690	0,71	0,553385	0,91	1,340755	0,984	2,144411
0,52	0,050154	0,72	0,582842	0,92	1,405072	0,985	2,170090
0,53	0,075270	0,73	0,612813	0,93	1,475791	0,986	2,197286
0,54	0,100434	0,74	0,643345	0,94	1,554774	0,987	2,226212
0,55	0,125661	0,75	0,674490	0,95	1,644854	0,988	2,257129

### Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8
0,56	0,160969	0,76	0,706303	0,96	1,750686	0,989	2,290368
0,57	0,176374	0,77	0,738847	0,97	1,880794	0,99	2,326348
0,58	0,201898	0,78	0,772193	0,971	1,895698	0,991	2,365618
0,59	0,227545	0,79	0,806021	0,972	1,911036	0,992	2,408916
0,60	0,253347	0,80	0,841621	0,973	1,926837	0,993	2,458263
0,61	0,279819	0,81	0,877896	0,974	1,943134	0,994	2,512114
0,62	0,305481	0,82	0,915365	0,975	1,959964	0,995	2,573829
0,63	0,331853	0,83	0,954165	0,976	1,977368	0,996	2,652070
0,64	0,358459	0,84	0,994458	0,977	1,995393	0,997	2,747781
0,65	0,385320	0,85	1,036433	0,978	2,014091	0,998	2,878162
0,66	0,412463	0,86	1,080319	0,979	2,033520	0,999	3,090232
0,67	0,439913	0,87	1,126391	0,980	2,053749	–	–
0,68	0,467699	0,88	1,174987	0,981	2,074855	–	–
0,69	0,495850	0,89	1,226528	0,982	2,096927	–	–

### *Контрольні питання*

1. Опишіть рух математичного маятника. Виведіть формулу періоду його коливань.
2. Виведіть формулу для розрахунку відносної похибки непрямих вимірювань прискорення вільного падіння за допомогою маятника.
3. У чому полягає особливість нормального розподілу випадкових величин?
4. Чи зміниться характер розподілу та розрахунків, якщо кількість вимірювань зменшити в 10 разів?
5. Як зміняться результати лабораторної роботи, якщо зменшити або збільшити довжину нитки маятника?

## Лабораторна робота № 3

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

**Мета роботи:** перевірити основний закон динаміки обертального руху; визначити момент інерції маятника Обербека та його залежність від розташування важків на стержнях.

**Прилади і матеріали:** маятник Обербека, чотири важки, секундомір, лінійка з міліметровими поділками, штангенциркуль, терези.

#### Короткі теоретичні відомості

Одним із найбільш поширених рухів у природі та техніці є обертальний рух. Розглядають обертальний рух матеріальної точки та системи матеріальних точок. Тіло, в якому відстань між будь-якими двома точками зберігається сталою під час руху, називається абсолютно твердим тілом. З деяким наближенням абсолютно твердими тілами можна вважати реальні тіла довільної форми, які в процесі руху не зазнають значних деформацій. Обертальним рухом твердого тіла називається його рух відносно осі, що проходить через дві фіксовані точки, при якому всі матеріальні точки твердого тіла рухаються по колах з центрами на осі обертання. При цьому всі точки мають однакові кутові (кутове переміщення  $\varphi$ , кутову швидкість  $\omega$  та кутове прискорення  $\varepsilon$ ), але різні лінійні характеристики.

Між лінійними та кутовими характеристиками руху матеріальних точок існує зв'язок:

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \vec{r}] \text{ та } \vec{a} = [\vec{\varepsilon} \vec{r}],$$

де  $\vec{r}$  - радіус-вектор, відстань матеріальної точки до осі обертання.

Динамічними характеристиками обертального руху є момент сил  $\vec{M}$ , ( $\vec{M} = [\vec{r} \vec{F}]$ ), момент інерції  $J$  (скалярна величина, яка є аналогом маси для обертального руху) та момент імпульсу  $\vec{L}$  ( $\vec{L} = [\vec{r} \vec{P}]$ ).

Момент інерції враховує вплив характеру розподілу маси тіла, що обертається, відносно осі обертання. Момент інерції точки відносно осі обертання дорівнює добутку маси точки  $\Delta m$  на квадрат її відстані від осі обертання:  $J = \Delta m r^2$ .

Момент інерції твердого тіла відносно осі обертання дорівнює сумі моментів інерції всіх його елементарних мас:

$$J = \sum_i \Delta m_i r_i^2. \text{ Якщо маса розподілена неперервно, то: } J = \int r^2 dm.$$

Момент інерції однорідних тіл правильної геометричної форми відносно осі, що проходить через центр мас, дорівнює:

1. Момент інерції диска (циліндра) масою  $m$  та радіусом  $R$ :

$$J = \frac{m \cdot R^2}{2}.$$

2. Момент інерції круглого однорідного стержня довжини  $l$  (відносно осі, що проходить через центр мас стержня перпендикулярно його довжині):

$$J = \frac{1}{12} m \cdot l^2.$$

3. Момент інерції кулі радіуса  $R$ :

$$J = \frac{2m \cdot R^2}{5}.$$

Для визначення моменту інерції однорідних тіл відносно довільної осі, використовують теорему Штейнера: момент інерції однорідного тіла відносно довільної осі дорівнює сумі моменту інерції відносно осі, що паралельна даній і проходить через центр мас та добутку маси тіла на квадрат відстані між осями -  $J = J_0 + m \cdot d^2$ .

Основний закон динаміки обертального руху твердого тіла можна подати у вигляді:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$$

(швидкість зміни моменту імпульсу твердого тіла, що обертається навколо нерухомої осі, дорівнює повному моменту зовнішніх сил, що діють на тіло вздовж цієї ж осі). Враховуючи, що  $\vec{L} = J\vec{\omega}$ , рівняння обертального руху твердого тіла можна подати у вигляді:

$$\vec{M} = J\vec{\varepsilon}.$$

Якщо до твердого тіла, момент інерції якого є сталою величиною, прикладаються різні обертальні моменти, то відношення обертальних моментів до відповідних кутових прискорень є величиною сталою:

$$\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = \frac{M_3}{\varepsilon_3} = const$$

Залежність кутового прискорення від обертового моменту та моменту інерції можна перевірити за допомогою маятника Обербека (мал.6).

Маятник Обербека складається з втулки 1, до якої кріпляться чотири однорідних стержні 2. На стержнях закріплюються рухомі важки 3 однакової маси, які фіксуються за допомогою гвинтів. Шків 4 та 5 різних діаметрів закріплені на втулці. Втулка маятника надіта на вісь, яка прикріплена до дошки та до стіни так, щоб маятник обертався у площині, паралельній стіні. Дошка 7 містить міліметрову шкалу. На один з двох шківів намотується нитка, до якої прикріплюються тягарці.

Нехай маса тягарців на нитці  $m$ . Під дією їх ваги нитка почне розмотуватися, тягарці рухатимуться з прискоренням, а маятник обертатиметься.

Прискорення тягарців можна визначити за формулою:

$$a = \frac{2 \cdot h}{t^2},$$

де  $h$  - відстань, яку проходять тягарці за час  $t$ .

З таким самим прискоренням будуть рухатися всі точки поверхні шківів, з якого змотується нитка.

Рівняння руху тягарців:  $\vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}$ , звідки сила натягу нитки:  $T = mg - ma = m(g - a)$ . Оскільки сила, яка створює обертальний момент, дорівнює силі натягу нитки, то  $M = T \cdot R$ , де  $R$  - радіус шківів, на який намотана нитка. Тоді  $M = m \cdot (g - a) \cdot R = m \cdot R \cdot (g - \frac{2 \cdot h}{t^2})$ . Кутове прискорення маятника визначається

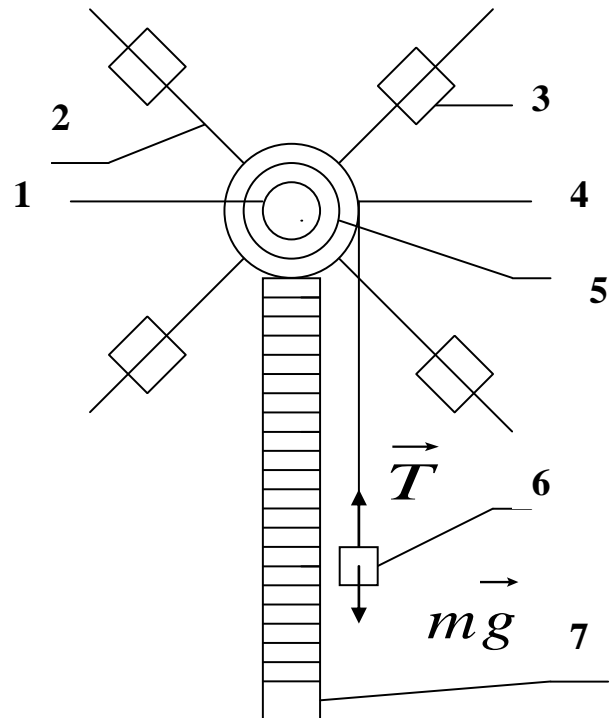
через лінійне прискорення точок поверхні:  $\varepsilon = \frac{a}{R} = \frac{2 \cdot h}{R \cdot t^2}$ .

З основного рівняння динаміки обертового руху твердого тіла, момент інерції маятника:

$$J = \frac{M}{\varepsilon} = m \cdot R^2 \cdot \frac{(gt^2 - 2 \cdot h)}{2 \cdot h} \quad (1).$$

Момент інерції маятника складається з моменту інерції хрестовини  $J_0$  та моменту інерції важків маси  $m_1$ , що розміщені на відстані  $d$  від осі обертання:

$$J_1 = J_0 + 4 \cdot m_1 \cdot d^2 \quad (2).$$



Мал. 6.

Момент інерції хрестовини можна визначити як суму моментів інерції стержнів відносно осі, що проходить через їх кінці. Оскільки стержні однакові, то:

$$J_0 = 4 \cdot \left( \frac{1}{12} m_2 \cdot l^2 + \frac{1}{4} m_2 \cdot l^2 \right) = \frac{4}{3} \cdot m_2 \cdot l^2 \quad (3).$$

### **Порядок виконання роботи**

1. За допомогою терезів виміряти масу  $m$  тягарців (з точністю  $\Delta m = 0,1g$ ), що будуть підвішуватися на нитці до маятника; масу  $m_1$  одного з чотирьох однакових важків, що розміщуються на стержнях, та масу  $m_2$  одного з чотирьох однакових стержнів, попередньо вигвинтивши його зі втулки. Виміряти довжину  $l$  одного зі стержнів.
2. Розмістити важки на стержнях на однаковій відстані від осі обертання та виміряти цю відстань  $d$ .
3. За формулами (2), (3) розрахувати момент інерції  $J_1$  маятника.
4. За допомогою штангенциркуля виміряти радіус  $R$  шківів з точністю  $\Delta R$ , вказаною на штангенциркулі.
5. Підвісити тягарці масою  $m$  на нитку і намотати її на один зі шківів. Відпустивши тягарці одночасно увімкнути секундомір. Коли нитка повністю розмотається, вимкнути секундомір і визначити час  $t$  (значення часу виміряти з точністю до 0,01 с) та виміряти висоту  $h$  опускання тягарців. Вимірювання повторити 5 разів. Результати занести до таблиці 1.
6. За формулою (1) розрахувати момент інерції маятника. За правилами розрахунку похибки непрямих вимірювань розрахувати абсолютну та відносну похибки вимірювання моменту інерції маятника. Результат записати у вигляді:  $J = \bar{J} \pm \Delta J$  при  $\varepsilon = \dots \%$ . Порівняти момент інерції  $J$ , визначений за даними досліду, з розрахованим теоретично  $J_1$ .
7. Змінити масу тягарців на нитці. Повторити вимірювання та розрахунки за пунктами 5,6. Визначити момент інерції маятника  $J_2$ .
8. Порівняти моменти інерції маятника  $J$  та  $J_2$ . Зробити висновок про виконання рівності  $\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = const$  - основного закону динаміки обертального руху твердого тіла.
9. Перемістити важки на стержнях на однакову відстань від осі обертання  $d_{10} = d + \Delta d$ . Повторити вимірювання за пунктами 5,6. Визначити момент інерції маятника  $J_3$ .
10. Вибравши шків іншого діаметра, повторити вимірювання за пунктами 4, 5, 6. Визначити момент інерції маятника  $J_4$ .
11. Порівняти моменти інерції маятника  $J$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $J_4$ . Зробити висновок про особливості зміни моменту інерції маятника.

Таблиця 1.

№ досліду	Час опускання тягарців, $t$ , с (для розрахунку відповідного $J$ )				Висота опускання тягарців, $h$ , м (для розрахунку відповідного $J$ )			
	$J$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J$	$J_2$	$J_3$	$J_4$
1								
2								
3								
4								
5								

### *Контрольні питання*

1. Сформулювати основний закон динаміки обертального руху у загальному вигляді.
2. Охарактеризувати основні динамічні характеристики обертального руху твердого тіла.
3. У чому полягає аналогія між другим законом Ньютона для поступального руху та основним законом обертального руху твердого тіла?
4. Як розраховуються моменти інерції тіл правильної геометричної форми?
5. Вивести формулу для розрахунку абсолютної та відносної похибки визначення моменту інерції маятника Обербека.
6. Від чого залежить момент інерції та момент сили обертальної системи?
7. Які характеристики маятника Обербека змінюються при зміні маси тягарців на нитці? Діаметра шківів? Відстані від важків на стержнях до осі обертання?

## Лабораторна робота № 4

### Визначення моменту інерції махового колеса динамічним методом

**Мета роботи:** опанувати один з методів розрахунку моменту інерції; перевірити закон збереження механічної енергії при обертальному русі.

**Прилади і матеріали:** махове колесо, секундомір, тягарець, масштабна лінійка з міліметровими поділками, терези.

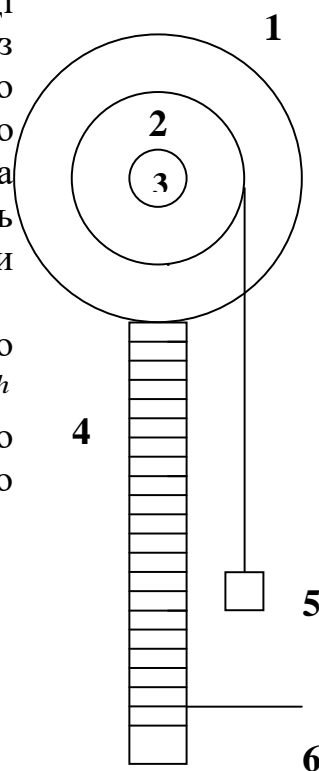
#### Короткі теоретичні відомості

Момент інерції махового колеса можна визначити за допомогою установки (мал. 7), що складається з махового колеса 1 зі шківом 2, вала 3, закріпленого за допомогою двох підшипників, масштабної лінійки з міліметровими поділками 4, тягарця 5, який на нитці прикріплюється до шківа, площадки 6. Якщо нитку з тягарцем намотати на шків і відпустити, махове колесо почне рівноприскорено обертатися. На обертання махового колеса впливають моменти інерції колеса, шківа та вала, а також сила тертя в підшипниках. Оскільки шків і вал мають невелику масу, то вплив їх моментів інерції на рух системи можна не враховувати.

Під час руху тягарця з початкового верхнього положення  $h$  його потенціальна енергія  $E_n = mgh$  перетворюється в кінетичну енергію його поступального руху, в кінетичну енергію обертального руху махового колеса та роботу проти сил тертя в підшипниках:

$$E_n = E_k + E_k^{оберт} + A_m \text{ або}$$

$$mgh = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + A \cdot n_1,$$



Мал. 7.

де  $\frac{mV^2}{2}$  - кінетична енергія поступального руху

тягарця,  $\frac{J\omega^2}{2}$  - кінетична енергія обертального руху махового колеса,  $A$  - робота подолання сил тертя, виконана за один оберт махового колеса,  $n_1$  - кількість обертів махового колеса.

Коли тягарець опуститься на мінімальну висоту, нитка, якщо вона не закріплена, спаде зі шківа, а махове колесо зробить  $n_2$  обертів до повної зупинки. При цьому робота на подолання сил тертя розраховується за



формулою  $A \cdot n_2$  і чисельно дорівнює енергії обертального руху махового колеса в момент спадання нитки:

$$A \cdot n_2 = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Тоді робота сил тертя за один оберт махового колеса:

$$A = \frac{J\omega^2}{2 \cdot n_2}.$$

Момент інерції махового колеса буде визначатися за формулою:

$$J = \frac{mgh - \frac{mv^2}{2}}{\frac{\omega^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{n_2}{n_1}\right)}.$$

З урахуванням, що  $\omega = \frac{2 \cdot h}{R \cdot t}$ , а  $V = \frac{2 \cdot h}{t}$ , де  $h, t, R$  відповідно, висота, час падіння тягарця та радіус шківів махового колеса:

$$J = \frac{mR^2 \cdot (gt^2 - 2 \cdot h)}{2 \cdot h \cdot \left(1 + \frac{n_2}{n_1}\right)} \quad (1).$$

Якщо нитку одним кінцем закріпити на шківі махового колеса так, щоб вона не спадала, коли тягарець повністю опуститься, то роботу подолання сил тертя можна розрахувати як  $A = F \cdot h$ , де  $F$  - сила тертя. Силу тертя можна визначити, вимірявши висоту  $h_1$ , на яку махове колесо підніме тягарець, рухаючись за інерцією після розмотування нитки. Різниця потенціальних енергій тягарця на рівнях  $h$  та  $h_1$  дорівнюватиме роботі подолання сил тертя. Тобто:  $E_n - E_g = mgh - mgh_1 = F \cdot (h_1 + h)$ . Звідси можна визначити силу тертя:

$F = \frac{mg \cdot (h - h_1)}{h + h_1}$ . За законом збереження енергії, момент інерції махового колеса дорівнює:

$$J = mR^2 \cdot \left(gt^2 \cdot \frac{h_1}{h \cdot (h + h_1)} - 1\right) \quad (2).$$

### Порядок виконання роботи

1. Виміряти масу  $m$  тягарця та радіус  $R$  шків махового колеса.
2. Намотати нитку з тягарцем на шків махового колеса, не закріплюючи її жорстко. Виміряти висоту  $h$  від основи тягарця до площадки, закріпленої на лійці.
3. Відпустити тягарець і виміряти час, протягом якого він пройде відстань  $h$ . Визначити кількість обертів  $n$ , які зробить махове колесо до повної зупинки.
4. Визначити кількість обертів махового колеса під дією тягарця  $n_1 = \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot R}$ . Кількість обертів махового колеса після спадання тягарця:  $n_2 = n - n_1$ . Вимірювання повторити 5 разів. Результати вимірювань занести до таблиці 1.
5. За формулою (1) визначити момент інерції махового колеса. Розрахувати похибку вимірювання моменту інерції.
6. Намотати нитку довжиною  $h$  (з попереднього досліду) з тягарцем на шків, жорстко закріпивши її на ньому.
7. Виміряти висоту нижньої частини тягарця над площадкою.
8. Відпустити тягарець та виміряти час  $t$ , протягом якого тягарець опускається до площадки. Виміряти висоту  $h_1$  піднімання тягарця над площадкою при обертанні махового колеса за інерцією. Вимірювання повторити 5 разів. Результати вимірювань занести до таблиці 2.
9. Розрахувати значення моменту інерції махового колеса за формулою (2). Розрахувати похибку визначення моменту інерції махового колеса.
10. Порівняти значення моментів інерції махового колеса, розраховані за формулами (1) та (2). Зробити висновок про закон збереження енергії.

Таблиця 1.

№ досліду	Радіус шківів, $R$ , м	Маса тягарця, $m$ , кг	Висота тягарця над площадкою, $h$ , м	Загальна кількість обертів махового колеса до повної зупинки, $n$
1				
2				
3				
4				
5				

Таблиця 2.

№ досліду	Радіус шківа, R, м	Маса тягарця, m, кг	Висота тягарця над площадкою, h, м	Висота тягарця над площадкою після піднімання за інерцією махового колеса, $h_1$ , м
1				
2				
3				
4				
5				

**Контрольні питання**

1. Сформулюйте закон збереження механічної енергії.
2. Чому дорівнює кінетична енергія обертального руху твердого тіла?
3. Як відрізняються моменти інерції махового колеса під час руху під дією тягарця та при вільному обертанні?
4. Від чого залежить момент сил тертя махового колеса?
5. Вивести розрахункові формули для обчислення похибок непрямих вимірювань моменту інерції махового колеса.

## Лабораторна робота № 5

### Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідин методом Стокса

**Мета роботи:** опанувати метод визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідин та застосувати його на практиці.

**Прилади і матеріали:** скляний циліндр, висотою 70-80 см та діаметром 6-10 см з масштабною лінійкою, досліджувана рідина, металеві кульки малого діаметра (біля 1 мм), мікрометр, секундомір, термометр, штангенциркуль, пікнометр.

### Короткі теоретичні відомості

Важливість досліджень властивостей рідин зумовлена, в першу чергу, тим, що вони займають проміжне положення за своїми властивостями між газами і твердими тілами. При зростанні температури рідина наближається за своїми властивостями до газів; при зменшенні температури рідини до температури кристалізації, рідина стає подібною за властивостями до твердих тіл; у критичному стані речовини не існує відмінностей між газом і рідиною.

Специфічний характер властивостей рідини пов'язаний з особливостями теплового руху її молекул. У газах молекули рухаються переважно поступально, змінюючи хаотично при зіткненні одна з іншою напрямки і модулі швидкостей. При цьому молекули газу розміщуються хаотично.

У твердих кристалічних тілах молекули розташовані в правильному періодичному порядку й утворюють кристалічні решітки. Тепловий рух молекул зводиться до їхніх коливань біля положень рівноваги (вузлів решітки).

У рідинах середня відстань між молекулами такого ж порядку, як розміри самих молекул ( $10^{-10}$  м), тому "вільного" пробігу в них немає. Молекули рідини коливаються біля тимчасових положень рівноваги, стрибкоподібно змінюючи їх у середньому через час  $\tau$  (час релаксації).

Під час таких стрибків молекули рідини, подібно до молекул газу, при взаємних зіткненнях змінюють величину та напрям швидкостей. Молекулярні зіткнення є причиною явищ переносу: дифузії, внутрішнього тертя, теплопровідності.

Дифузією називається явище переносу маси речовини з однієї частини системи в іншу за умови різної концентрації частинок речовини. Якщо одні області системи відрізняються від інших своєю температурою, то відбувається процес переносу кінетичної енергії молекул, що супроводжується вирівнюванням температури. Такий процес називається теплопровідністю.

Якщо під зовнішнім впливом з'явився шар газу або рідини, що рухається відносно іншого шару з деякою швидкістю, то хаотичний обмін молекулами між шарами зумовлює перенесення імпульсів спрямованого руху та

вирівнювання швидкостей шарів. Цей процес супроводжується перетворенням кінетичної енергії впорядкованого руху молекул в енергію хаотичного теплового руху і називається внутрішнім тертям або в'язкістю.

Отже під в'язкістю можна розуміти властивість рідини або газу чинити опір при відносному переміщенні їх шарів. У потоках реальних рідин поблизу змочуваних твердих тіл різні шари рідини мають неоднакову швидкість. Зокрема, швидкість шару, який безпосередньо торкається твердого тіла, дорівнює нулю. З віддаленням від поверхні твердого тіла швидкість шарів рідини зростає. Тобто, в таких потоках спостерігається рух одних шарів відносно інших. Коефіцієнт в'язкості рідини  $\eta$  вимірюється в Н·с/м<sup>2</sup> або Па·с.

Якщо має місце ламінарна (безвихрова) течія рідини, то коефіцієнт динамічної в'язкості рідини можна визначити за законом Ньютона:

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

Гradient швидкості  $\frac{d\bar{v}}{dz}$  характеризує швидкість зміни швидкості спрямованого руху на одиницю довжини в напрямку, перпендикулярному до потоку. Величину, обернену до коефіцієнта в'язкості, називають плинністю рідини:  $\varphi = \frac{1}{\eta}$ . Якщо прийняти  $\frac{dv}{dz} = 1$  та  $\Delta S = 1$ , то  $|\bar{F}| = \eta$ , тобто, коефіцієнт динамічної в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя між двома шарами рідини одиничної площі при gradientі швидкості шарів, що дорівнює 1.

Коефіцієнт динамічної в'язкості залежить від природи рідини і температури. Рідина буде мати тим меншу в'язкість, чим частіше молекули змінюють свої положення рівноваги.

Для визначення в'язкості досліджують витікання рідини через вузькі трубки. Прилади, що використовуються для вимірювання в'язкості, називаються віскозиметрами.

Одним з найбільш поширених методів визначення коефіцієнта динамічної в'язкості є метод Стокса. Цей метод ґрунтується на вимірюванні швидкості руху тіла сферичної форми в рідині, в'язкість якої визначається. Для дослідження за цим методом використовується скляний циліндр з нанесеною на нього масштабною лінійкою (мал. 8.), в який заливається рідина, і в якому вільно падає маленька металева кулька.

Якщо кулька вільно падає в рідині, на неї діють сили: земного тяжіння

$$P = mg = \rho \cdot g \cdot V = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot g \quad (\rho - \text{густина матеріалу кульки, } R - \text{її радіус);}$$

$$\text{архімедова сила } F_A = \rho_p \cdot g \cdot V = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \cdot \rho_p \cdot g \quad (\rho_p - \text{густина рідини в циліндрі) та сила}$$

в'язкості  $F = 6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$  (2). Сила тяжіння врівноважується архімедовою силою та силою в'язкості:

$$P = F_A + F, \text{ або}$$

$$\frac{4}{3}\pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot g = \frac{4}{3}\pi \cdot R^3 \cdot \rho_p \cdot g + 6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v, \text{ звідки}$$

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - \rho_p}{v} \cdot g \cdot R^2 \quad (3).$$

Швидкість кульки  $v$  можна визначити, зафіксувавши висоту  $h$  руху кульки в рідині, та час  $t$ , протягом якого кулька проходить цю відстань:  $v = \frac{h}{t}$ .

Відповідно, формула для розрахунку коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - \rho_p}{h} \cdot t \quad (4).$$

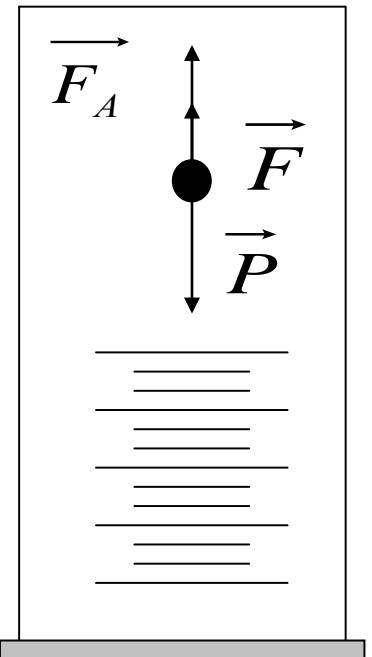
Оскільки кулька рухається в скляному циліндрі, а не в необмеженому середовищі, потрібно врахувати вплив стінок на коефіцієнт в'язкості. Тобто:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - \rho_p}{h \cdot (1 + 2,4 \cdot \frac{2 \cdot R}{d})} \cdot t \quad (5),$$

де  $R$  - радіус кульки, а  $d$  - діаметр скляного циліндра.

### **Порядок виконання роботи**

1. Зафіксувати на шкалі циліндра дві позначки та виміряти висоту  $h$  між ними. Виміряти штангенциркулем діаметр  $d$  скляного циліндра. Виміряти температуру рідини в циліндрі
2. За допомогою мікрометра виміряти діаметр 3-5 металевих кульок.
3. Опустити кульку в рідину по центру скляного циліндра та виміряти час  $t$ , протягом якого кулька пройде відстань  $h$ . Для зменшення похибок вимірювання лінію зору розмістити на рівні нижньої з зафіксованих на циліндрі позначок. Виміряні значення занести до таблиці 1. Дослід повторити 5 разів.
4. Пікнометром виміряти густину рідини в циліндрі. За таблицею знайти значення густини матеріалу металевих кульок. За формулою (5) обчислити значення коефіцієнта в'язкості  $\eta$  рідини, що знаходиться в циліндрі.
5. Розрахувати абсолютну та відносну похибки вимірювань.
6. Зробити висновки щодо отриманого значення коефіцієнта в'язкості, співвідносячи його фіксованою температурою рідини, та точності вимірювання за методом Стокса.



**Мал. 8.**

Таблиця 1

№ п/п	R, м	t, с	$\eta_i$ , Н·с/м <sup>2</sup>	$\bar{\eta}$ , Н·с/м <sup>2</sup>	$\Delta\eta_i = \eta_i - \bar{\eta}$ , Н·с/м <sup>2</sup>	d, м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>
1								
2								
3								
4								
5								

### Контрольні питання

1. Який механізм виникнення в'язкості рідини?
2. Фізичний зміст коефіцієнта в'язкості рідини.
3. Чому потрібно враховувати вплив стінок, які обмежують рідину, на її динамічну в'язкість?
4. Чи впливає температура рідини на її в'язкість?
5. Вивести формулу для розрахунку абсолютної та відносної похибки вимірювання коефіцієнта в'язкості.

## Лабораторна робота № 6

### Визначення відношення питомих теплоємностей повітря $C_p/C_v$

**Мета роботи:** визначити відношення питомих теплоємностей повітря при сталому об'ємі та сталому тиску методом Клемана-Дезорма.

**Прилади і матеріали:** скляний балон з трубками та кранами, U-подібний манометр, насос.

### Короткі теоретичні відомості

Питома теплоємністю газу  $C$  називається величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку потрібно надати одиниці маси газу, щоб збільшити його температуру на  $1^\circ\text{C}$ .

Молярною теплоємністю  $C_m$  називається величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку потрібно надати одному молю газу, щоб збільшити його температуру на один  $1^\circ\text{C}$ :

$$C_m = \mu \cdot C,$$

де  $\mu$  - молярна маса газу.

Питома і молярна теплоємності газу залежать від умов, в яких протікає термодинамічний процес (сталий об'єм або сталий тиск). Тому розглядають питому і молярну теплоємності при сталому тиску та сталому об'ємі:  $C_p, C_v$  та  $C_{mp}, C_{mv}$ . Для газів  $C_p > C_v$ .

Відношення питомих теплоємностей  $\frac{C_p}{C_v} = \gamma$  ( $\gamma$  - показник адіабати) має важливе значення для дослідження та описання адіабатних процесів.

Розглянемо адіабатне розширення газу при сталому об'ємі. За першим началом термодинаміки:

$$dQ = dU + dA.$$

Оскільки об'єм є сталим ( $V = \text{const}$ ), то  $dV = 0$  і  $dA = PdV = 0$ . Тоді:  $dQ = dU$ , тобто кількість теплоти, що надається системі, йде на збільшення її внутрішньої енергії:

$$C_v = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT}.$$

При постійному тиску перше начало термодинаміки можна записати як  $dQ = dU + dA$ . Тоді питома теплоємність при сталому тиску:

$$C_p = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{dA}{dT} = \frac{dU}{dT} + P \frac{dV}{dT} \quad (dA = PdV, P = \text{const}).$$

Оскільки для одного молю газу рівняння стану ідеального газу має вид:  $PV = RT$ . Тоді для ізобарного процесу:

$$P \frac{dV}{dT} = R \quad \text{і} \quad C_p = \frac{dU}{dT} + R.$$



Відношення  $\frac{dU}{dT}$  дорівнює питомій теплоємності при сталому об'ємі, тоді:

$$C_p = C_v + R \text{ (рівняння Майєра).}$$

З цього рівняння випливає, що для газів  $C_p > C_v$ , а універсальна газова стала:  $R = C_p - C_v$  (чисельно дорівнює роботі ізобарного розширення одного моля ідеального газу при нагріванні його на  $1^\circ \text{C}$ ,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$ ).

Значення  $C_p$  та  $C_v$  залежать від числа ступенів свободи  $i$  молекули газу:

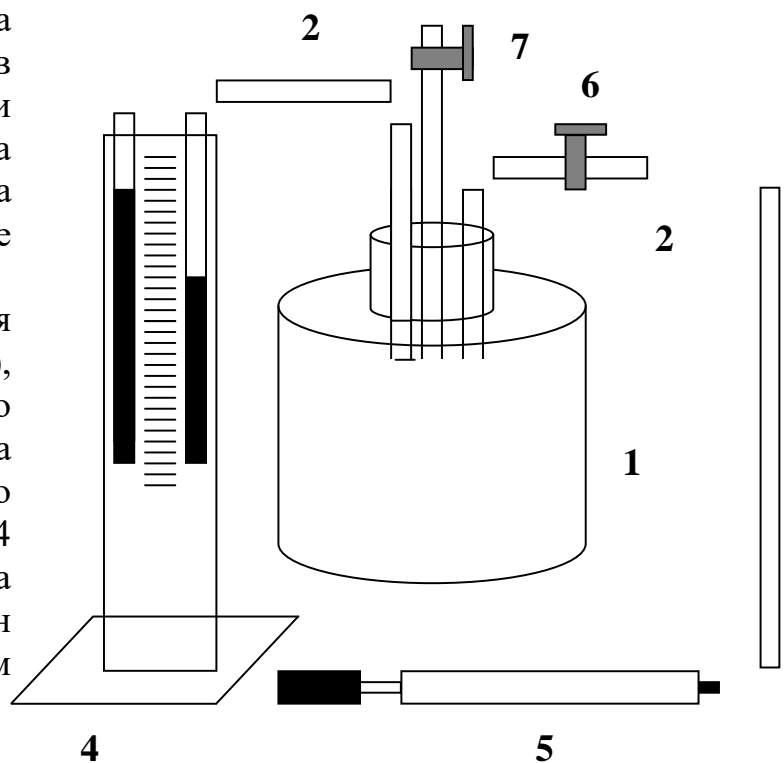
$$C_p = \frac{i+2}{2} \cdot R \text{ та } C_v = \frac{i}{2} \cdot R.$$

Число ступенів свободи молекули газу дорівнює числу незалежних координат, що необхідні для визначення положення молекули в просторі. При цьому молекулу можна розглядати як сукупність матеріальних точок, з'єднаних твердими чи пружними зв'язками. Молекула одноатомного газу має три ступені свободи ( $i = 3$ ), молекула двоатомного газу – п'ять ( $i = 5$ ), багатоатомного –  $i = 6$ .

Для ідеального газу показник адиабати дорівнює:  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$ .

$\gamma$  має важливе значення для термодинамічних та газодинамічних розрахунків адиабатних процесів. Визначити показник адиабати можна методом Клемана-Дезорма, за яким досліджується адиабатне розширення повітря.

Для дослідження використовується прилад (мал.9), який складається з скляного товстостінного балону 1, за допомогою трубок 2 сполученого з U-подібним манометром 4 та з насосом 5 через кран 6. За допомогою крана 7 балон з'єднується з середовищем кімнати.



Мал. 9.

**Схема досліду.** В балон, наповнений повітрям при атмосферному тиску (стовпчики манометра знаходяться на одному рівні), нагнітається повітря (при цьому кран 6 відкритий, а кран 7 – закритий) насосом 5. Повітря в балоні стискається і

нагрівається. При цьому стовпчики манометричної рідини змістяться один відносно іншого. Після накачування кран 7 закривається і варто зачекати кілька хвилин, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною та визначити різницю рівнів манометричної рідини  $h_1$  (перший стан). Після цього на короткий час відкрити кран 7, щоб зрівноважити тиск у балоні з атмосферним (рівні рідини в манометрі зрівняються). Повітря у балоні розшириться, а температура зменшиться (другий стан).

Після закривання крану 7 через деякий час температура в балоні зрівняється з кімнатною, а тиск збільшиться, у манометрі встановиться різниця рівнів манометричної рідини  $h_2$  (третій стан).

При переході з першого стану до другого розширення повітря проходить протягом короткого часу і теплообміну між стінками посудини і кімнатною майже не буде, тому цей процес можна вважати адіабатним, який описується законом Пуассона:  $PV^\gamma = const$ .

Якщо параметри першого стану – температура повітря в кімнаті  $T_1$ , а тиск в балоні після накачування  $P_1$  ( $P_1 = P_0 + \rho gh_1$ , де  $P_0$  - атмосферний тиск, а  $\rho gh_1$  - тиск, який показує манометр,  $\rho$  - густина рідини в манометрі); параметри другого стану -  $T_2$  та  $P_2$ , параметри третього стану -  $T_3$  та  $P_3 = P_0 + \rho gh_2$  (відповідно до схеми досліду  $P_2 = P_0$ , а  $T_3 = T_1$ ), то між параметрами повітря в трьох станах встановлюються такі співвідношення:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_1^\gamma$$

(адіабатний процес при переході з першого стану до другого);

$$P_1 V_1 = P_3 V_3$$

(температура в першому та третьому стані однакова).

Прологарифмувавши вирази та розв'язавши отримані рівняння відносно  $\gamma$ , отримаємо:

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_2}{\lg P_1 - \lg P_3}.$$

З урахуванням того, що  $\lg P_1 = \lg(P_0 + \rho gh_1) \approx \lg P_0 + \frac{\rho gh_1}{P_0}$ ,

$\lg P_3 = \lg(P_0 + \rho gh_2) \approx \lg P_0 + \frac{\rho gh_2}{P_0}$ , а  $P_2 = P_0$ :

$$\gamma = \frac{\rho gh_1}{\rho gh_1 - \rho gh_2} \quad \text{та} \quad \gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (1).$$

### **Порядок виконання роботи**

1. Відкрити кран 7 і зрівноважити рівні манометричної рідини. Закрити кран 7.
2. Відкрити кран 6 і накачати в балон повітря так, щоб різниця рівнів манометричної рідини становила 200-300 мм (2000-3000 Па). Закрити кран 6 і зафіксувати різницю рівнів  $h_1$ , яка встановиться в манометрі після зрівноваження температури нагрітого в балоні повітря з температурою повітря в кімнаті.
3. Відкрити протягом короткого часу кран 7. Закрити кран 7 і через 2-3 хвилини зафіксувати різницю рівнів манометричної рідини  $h_2$ .
4. Дослід повторити 5-10 разів. Результати вимірювань занести до таблиці 1.
5. Обчислити значення показника адіабати за формулою (1). Знайти середнє значення  $\gamma$  та похибки вимірювань. Значення показника адіабати варто обробляти як результати прямих вимірів, оскільки непрямі вимірювання проводять в умовах, які важко відтворити.
6. Записати результат у вигляді  $\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$  при  $\epsilon_\gamma = \dots \%$ . Порівняти отримане середнє значення  $\gamma$  з розрахованим теоретично (розглядаючи повітря як двоатомний газ).
7. Зробити висновок про ефективність використаного методу вимірювання  $\gamma$ .

**Таблиця 1.**

№ досліду	h <sub>1</sub> , мм	h <sub>2</sub> , мм	γ = $\frac{h_1}{h_1 - h_2}$	$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{n}$	Δγ <sub>i</sub> = γ <sub>i</sub> - $\bar{\gamma}$	Δγ = t $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta\gamma_i^2}{n(n-1)}}$

### **Контрольні питання**

1. Опишіть термодинамічні процеси, що відбуваються під час виконання досліду.
2. Проаналізуйте співвідношення питомих теплоємностей повітря при сталому тискові та сталому об'ємі.
3. На чому ґрунтується метод визначення показника адіабати, реалізований в лабораторній роботі?
4. Від чого залежить точність вимірювання  $\gamma$  в роботі?
5. Як зміниться результат досліду, якщо замість скляного балона використати металевий, пластиковий?

## Лабораторна робота № 7

### Перевірка правил Кірхгофа

**Мета роботи:** вивчення особливостей розрахунку розгалужених електричних кіл, перевірка правил Кірхгофа.

**Прилади і матеріали:** три джерела постійного струму з різними ЕРС, три амперметри, три опори відомого номіналу до 10 Ом, два вимикачі.

#### Короткі теоретичні відомості

Для розрахунку розгалужених електричних кіл, що містять джерела живлення з відомими електрорушійними силами зручно застосовувати правила Кірхгофа, які є узагальненням закону Ома для неоднорідних ділянок кола.

За першим правилом Кірхгофа, яке виражає закон збереження електричного заряду алгебраїчна сума всіх струмів, що сходяться у вузловій точці, дорівнює нулю :

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

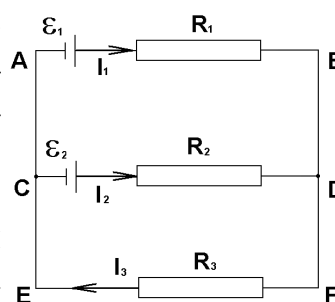
причому, струми, які входять до вузла, вважають додатними (їх записують до рівняння зі знаком “+”), а струми, що виходять з вузла, – від’ємними (їх записують зі знаком “-“).

За другим правилом Кірхгофа у будь-якому простому замкненому контурі розгалуженого електричного кола, що містить ЕРС, алгебраїчна сума спадів напруг (добутків опорів ділянок кола на струми, що течуть в них) дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що включені в цей контур:

$$\sum_{k=1}^n I_k \cdot R_k = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \quad (2).$$

Для використання першого правила Кірхгофа в розгалуженому електричному колі доволно вибирають і позначають струми у всіх його ділянках (мал.10). Обирають одну з вузлових точок і записують рівняння згідно I правила Кірхгофа. Для вузлової точки С схеми, зображеної на мал. 10 його можна записати таким чином:  $I_3 - I_2 - I_1 = 0$ .

Щоб записати рівняння за другим правилом, електричне коло розбивають на прості контури (для схеми, що на мал. 10, наприклад, контури АВFE та АВDC) і вибирають напрям обходу контуру (за, або проти годинникової стрілки), однаковий для всіх



Мал. 10.

контурів.

Якщо напрям струму у контурі збігається з напрямом обходу, то спад напруги записують до рівняння зі знаком “+”, якщо напрям струму протилежний напрямку обходу контуру, то добуток сили струму та опору записують зі знаком “-“. ЕРС записують у рівняння зі знаком “+”, якщо при обході контура рухаються у напрямку підвищення потенціалу (коли напрям обходу збігається з напрямом власного струму джерела). Якщо напрям обходу відповідає зниженню потенціалу, ЕРС беруть зі знаком “-“.

Рівняння, складені за другим правилом Кірхгофа, мають охопити всі ЕРС та опори контуру.

Якщо вибрати для електричного кола (мал. 10.) напрям обходу контурів за годинниковою стрілкою, то можна записати:

$$\text{контур } ABFEA: I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = - \varepsilon_1,$$

$$\text{контур } ABDCA: I_1 \cdot R_1 - I_3 \cdot R_3 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1.$$

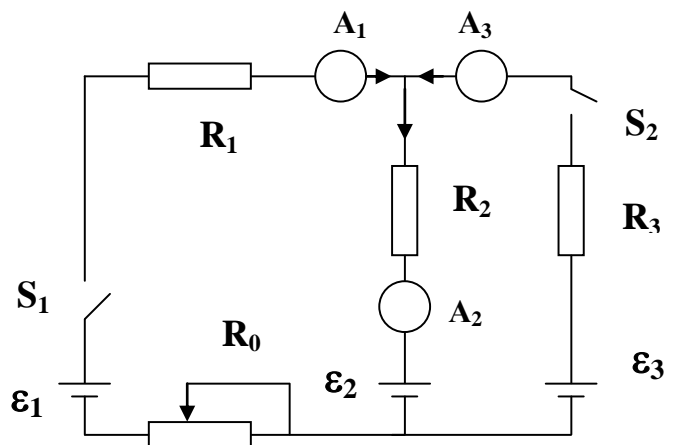
Отримаємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими ( $I_1, I_2, I_3$ ):

$$\begin{cases} I_3 - I_2 - I_1 = 0 \\ I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = - \varepsilon_1, \\ I_1 \cdot R_1 - I_3 \cdot R_3 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1. \end{cases}$$

Розв’язуючи систему незалежних рівнянь знаходять шукані струми. Якщо при розв’язуванні системи отримують від’ємне значення струму, то це означає, що дійсний напрям струму на даній ділянці кола протилежний вибраному на схемі.

### Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло (мал. 11).
2. Замкнути вимикачі  $S_1$  та  $S_2$ . За допомогою реостата  $R_0$  встановити робочу силу струму в колі 0,5 - 1,5 А.
3. Виміряти за допомогою амперметрів сили струмів у відповідних ділянках кола. Вимірянні дані занести до таблиці 1.
4. Використовуючи правила Кірхгофа розрахувати характеристики електричного кола.
5. Порівняти отримані експериментально сили струмів в електричному колі з розрахованими теоретично.



Мал. 11.

6. Зробити висновки про відповідність результатів у межах допустимих похибок.
7. Змінити полярність включення ЕРС та виконати вимірювання і розрахунки (п. 2-6).
8. Розрахувати похибки вимірювань з використанням класу точності приладів.

**Таблиця 1**

Вкл. ЕРС	Значення ЕРС			Значення опорів			Теоретично розраховані значення струмів			Виміряні значення струмів		
	$\mathcal{E}_1,$ В	$\mathcal{E}_2,$ В	$\mathcal{E}_3,$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А.	$I_3,$ А
<b>1</b>												
<b>2</b>												

### *Контрольні питання*

1. Які електричні кола називаються розгалуженими?
2. З якою метою використовують правила Кірхгофа?
3. Сформулювати перше та друге правило Кірхгофа.
4. Вказати особливості складання системи рівнянь для розрахунку складних електричних схем з використанням правил Кірхгофа.
5. Який висновок можна зробити, якщо при розрахунку розгалуженого електричного кола отримано від'ємне значення сили струму?

## Лабораторна робота № 8

### Дослідження законів електролізу та визначення заряду одновалентного йона

**Мета роботи:** перевірити закони електролізу М. Фарадея, визначити електрохімічний еквівалент міді, число Фарадея та заряд йона.

**Прилади і матеріали:** джерело постійного струму (випрямляч), реостат, електролітична ванна з 10 % розчином мідного купоросу, амперметр, секундомір, терези, вимикач.

#### *Короткі теоретичні відомості*

Оскільки рідини за своїми властивостями займають проміжне місце між твердими тілами та газами, то і природа та особливості протікання електричного струму в них теж специфічні. Так, рідини за хімічним складом поділяють на однокомпонентні (чисті) та багатокомпонентні рідкі суміші (розчини). За електропровідністю рідини поділяють на провідники, напівпровідники, діелектрики (за умови, що концентрація рухомих носіїв заряду в рідині мала). Чисті рідини (наприклад, дистильована вода), як правило, не проводять електричний струм і є діелектриками, оскільки складаються з нейтральних атомів або молекул. Рідкі суміші, яким властива електропровідність і які мають іонний механізм провідності, називають електролітами, або провідниками другого роду (для провідників II роду термічний коефіцієнт  $\alpha < 0$ ).

Найбільш поширеними електролітами є водні розчини неорганічних кислот, лугів та солей (наприклад, розчин кухонної солі).

Струм в електролітах є впорядкованим рухом іонів під дією електричного поля, яке створюється джерелом струму, що підключається до електродів (катода та анода) опущених в електроліт.

Носії заряду в електролітах утворюються в результаті розпаду молекул розчиненої речовини на іони різних знаків. Таке явище називають електролітичною дисоціацією. Коли в електроліт вводять металеві електроди, приєднані до джерела струму, то позитивні іони починають переміщуватися до катода, негативні іони до аноду.

При цьому відбувається виділення утворених іонів на електродах. Сукупність електрохімічних процесів, що відбуваються на електродах, занурених в електроліт, під дією електричного струму (зокрема, виділення речовини), називають електролізом. При електролізі на катоді відбувається реакція відновлення (приєднання електрону до позитивного йону), а на аноді – реакція окиснення (віддача електрону негативним іонами).

Вперше електроліз спостерігали в 1800 році У.Нікольсон, А.Карлейль та І.Рітер. У 1807 році Г.Деві отримав електролізом натрій та калій. Електроліз

відбувається в декілька етапів: 1) електролітична дисоціація – розпад молекул розчиненої речовини під впливом розчинника на іони; 2) сольватація (для води – гідратація) взаємодія іонів з дипольними молекулами розчинника; 3) переміщення катіонів та аніонів під впливом електричного поля до електродів, тобто, виникнення електричного струму; 4) нейтралізація іонів на електродах та виділення речовини.

Кількісні характеристики явища електролізу вивчав М.Фарадей, який у 1833 році встановив два закони електролізу.

Перший закон Фарадея. **Маса речовини, що виділяється на кожному з електродів, прямо пропорційна величині заряду, який пройшов через електроліт:**

$$m = k \cdot q = k \cdot I \cdot t \quad (1),$$

де  $k$  - електрохімічний еквівалент.

Другий закон Фарадея. **Електрохімічний еквівалент речовини прямо пропорційний її хімічному еквіваленту:**

$$k = C \cdot \frac{A}{z} \quad (2),$$

де  $C$  - коефіцієнт пропорційності, що має однакове значення для всіх речовин,  $A$  - атомна маса речовини,  $z$  - валентність речовини. Або:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{z} \quad (3),$$

де  $F$  - число Фарадея. Та:

$$k = \frac{A}{N_A \cdot z \cdot e} \quad (4),$$

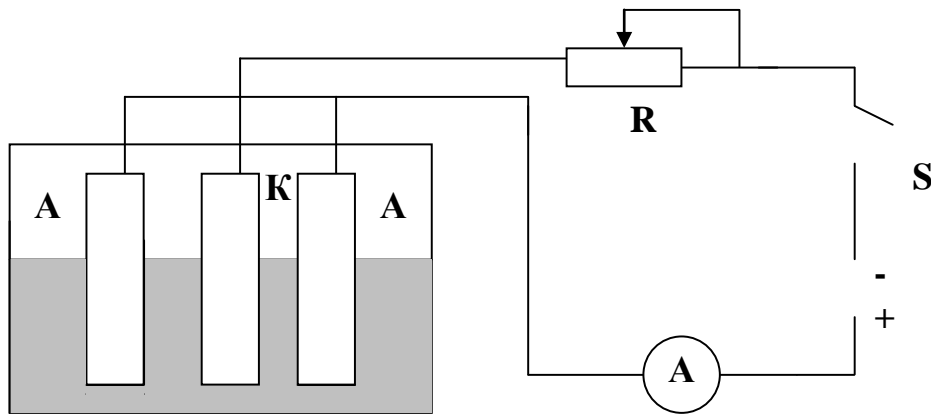
де  $N_A$  - число Авогадро,  $e$  - заряд електрона.

Враховуючи перший та другий закон Фарадея, можна записати:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{z} \cdot I \cdot q \quad (5).$$



Для визначення електрохімічного еквіваленту (наприклад, міді) використовують установку (мал. 12), яка складається з електролітичної ванни, заповненої 10 % розчином мідного купоросу ( $CuSO_4$ ), двох мідних електродів аноду А та катоду К, під'єднаних до джерела постійного струму (катод до негативного полюсу, а анод до позитивного).



Мал. 12.

### Порядок виконання роботи

1. Заповнити електролітичну ванну розчином мідного купоросу.
2. Скласти електричне коло (мал. 12). За допомогою реостата встановити робочу силу струму  $1 - 1,5$  А.
3. Розімкнути електричне коло. Очистити катод, просушити його та зважити з точністю до міліграма.
4. Розмістити електрод в електролітичну ванну, замкнути електричне коло та ввімкнути секундомір.
5. Через 30-40 хвилин розімкнути електричне коло та вимкнути секундомір.
6. Висушити та зважити катод. Знайти масу міді (як різницю мас електроду після та до досліду), що виділилася на катоді. Результати вимірювань занести до таблиці 1.
7. З формули (1) визначити електрохімічний еквівалент міді.
8. З формули (5) визначити число Фарадея.
9. З формули (4) визначити заряд електрону (валентність міді  $z = 2$ ).
10. Розрахувати абсолютні та відносні похибки вимірювань електрохімічного еквівалента, числа Фарадея, заряду електрону. Абсолютну похибку вимірювання сили струму розрахувати за формулою  $\Delta I = \frac{\gamma \cdot I_{ном}}{100\%}$ , де  $\gamma$  - клас точності амперметра,  $I_{ном}$  - номінальне значення шкали приладу.

Таблиця 1.

$I, A$	$\Delta I, A$	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$m = m_2 - m_1, \text{кг}$	$\Delta m, \text{кг}$	$t, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$

### *Контрольні питання*

1. В чому полягає явище електролізу ?
2. Описати основні етапи електролізу.
3. Розкрити фізичний зміст числа Фарадея.
4. Вивести формули для розрахунку абсолютних та відносних похибок непрямих вимірювань електрохімічного еквівалента, числа Фарадея та заряду електрона.
5. Застосування електролізу в техніці та на виробництві.

## Лабораторна робота № 9

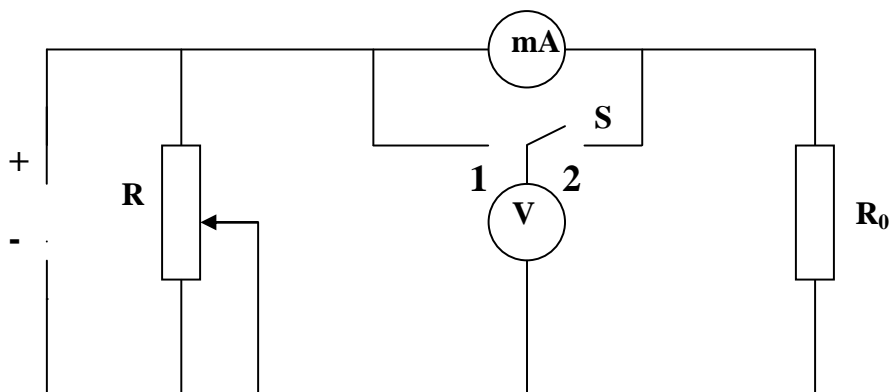
### Визначення опору провідника методом вольтметра і амперметра

**Мета роботи:** навчитися вимірювати опір провідника, використовуючи вольтметр і амперметр.

**Прилади і матеріали:** джерело постійного струму (випрямляч), реостат (до 1200 Ом), вольтметр (на 30 В), міліамперметр (до 15 мА), магазин опорів, перемикач.

### Короткі теоретичні відомості

Виміряти опір деякого провідника можна за допомогою вольтметра та амперметра, використовуючи співвідношення, що випливають із закону Ома для ділянки кола. Розглянемо електричне коло, яке складається з джерела постійного електричного струму, реостата, вольтметра, міліамперметра, перемикача та провідника, опір якого потрібно виміряти (мал. 13).



Мал. 13.

Опір  $R_0$  можна виміряти за допомогою вольтметра та амперметра із наступних міркувань. Якщо перемикач перевести в положення 1, то вольтметр буде показувати суму спадів напруг на шуканому опорі  $R_0$  та на міліамперметрі. З урахуванням закону Ома для ділянки кола, величина шуканого опору обчислюється за формулою:

$$R_0 = \frac{(U - U_A)}{I_A} = \frac{U}{I_A} - R_A \quad (1),$$

де  $U$  - напруга, яку показує вольтметр,  $U_A$  - падіння напруги на міліамперметрі,  $I_A$  - сила струму, яку показує міліамперметр (струм у колі),  $R_A$  - опір міліамперметра.

Якщо опір, що вимірюється, значно більший, ніж опір міліамперметра, то вимірювання опорів будуть більш точними. При цьому опором міліамперметра можна знехтувати, тобто, при  $R_0 \gg R_A$  :

$$R_0' \approx \frac{U}{I_A} \quad (2).$$

Розглянемо це ж електричне коло за умови, що перемикач переведений в положення 2. При цьому вольтметр показуватиме спад напруги на шуканому опорі, а міліамперметр – загальну силу струму в колі – через шуканий опір та вольтметр. Тоді шуканий опір можна обчислити за формулою:

$$R_0 = \frac{U}{I - I_A} = \frac{U}{I_A - \frac{U}{R_V}} \quad (3),$$

де  $I$  - сила струму, що проходить через вольтметр,  $R_V$  - опір вольтметра,  $I_A$  - сила струму, що показує міліамперметр,  $U$  - напруга, яку показує вольтметр.

Якщо опір вольтметра значно більший, ніж шуканий опір (більш, ніж у 100 разів), то вимірювання шуканого опорів буде досить точним. При  $R_V \gg R_0$ , опором вольтметра можна знехтувати:

$$R_0' \approx \frac{U}{I_A} \quad (4).$$

Значення опорів, обчисленні за формулами (2) та (4), будуть, відповідно, більшим та меншим, ніж дійсний опір провідника.

### ***Порядок виконання роботи***

1. Скласти електричне коло (мал. 13), включивши в нього опір з магазину опорів.
2. Зафіксувати значення внутрішніх опорів вольтметра та міліамперметра.
3. Порівняти значення опорів провідника із внутрішніми опорами приладів. Якщо опір включеного в коло провідника значно більший внутрішнього опорів міліамперметра, вибрати для дослідження схему з перемикачем в положенні 1. Якщо включений опір значно менший опорів вольтметра, вибрати схему з положенням вимикача 2.
4. Провести вимірювання сили струму та напруги в колі 5 разів, змінюючи параметри схеми за допомогою реостата. Вимірювання занести до таблиці 1.
5. Розрахувати значення шуканого опорів за формулами (1), (2) для першого включення, та за формулами (3), (4) для другого включення.

6. Обчислити середні значення  $R_0$  та  $R'_0$ .

7. Розрахувати похибку вимірювань за формулою:  $\varepsilon = \frac{\overline{R'_0} - \overline{R_0}}{\overline{R_0}}$ .

8. Порівняти отримані значення опору провідника  $R_0$  та  $R'_0$ .

9. Зробити висновки про точність вимірювання значення опору провідника методом вольтметра та амперметра.

**Таблиця 1.**

<i>№ п/п</i>	<i>I<sub>A</sub>, А</i>	<i>U, В</i>	<i>R<sub>0</sub>, Ом</i>	<i><math>\overline{R_0}</math>, Ом</i>	<i>R'<sub>0</sub>, Ом</i>	<i><math>\overline{R'_0}</math>, Ом</i>
<b>1</b>						
<b>2</b>						
<b>3</b>						
<b>4</b>						
<b>5</b>						

### *Контрольні питання*

1. Сформулювати закон Ома для ділянки кола.
2. В чому переваги методу вольтметра та амперметра вимірювання опору провідника?
3. За яких умов внутрішніми опорами вольтметра та амперметра можна знехтувати при обчисленні опору провідника?
4. Які особливості включення в схему вольтметра та амперметра?
5. Порівняйте внутрішні опори вольтметра та амперметра. Як і чому вони відрізняються?

## Лабораторна робота № 10

### Дослідження роботи трансформатора

**Мета роботи:** вивчення принципу дії, будови та застосування трансформатора.

**Прилади і матеріали:** трансформатор з кількома обмотками відомої кількості витків, 2 вольтметри, амперметр, ватметр, реостат, вимикач.

### *Короткі теоретичні відомості*

Електрична енергія є на сьогодні одним з найбільш поширених видів енергії, який використовується як на виробництві, так і в побуті. Зумовлено це, в першу чергу, тим, що електричну енергію досить зручно передавати на великі відстані. Транспортування здійснюється по лінях електропередач. При цьому відбуваються втрати електричної енергії, пов'язані з опором провідників, по яких тече електричний струм. Зменшити втрати на виділення теплоти можна за рахунок зменшення опору дротів ліній електропередач, зокрема, збільшення поперечного перерізу провідників. Такий напрямок вимагав би значного збільшення розмірів та маси провідників, великих витрат металу. Тому на практиці для зменшення втрат передачі електричної енергії від генератора до споживача здійснюють передачу змінних струмів високих напруг та сил струмів (сучасні генератори виробляють змінні струми при напругах від 2,2 до 20 кВ та силі струму понад 10 кА).

Для того, щоб перетворити струм з такими характеристиками у придатний для використання на виробництві чи в побуті (наприклад, напругою 380 В або 220 В), використовують трансформатори – електромагнітні пристрої, призначені для перетворення енергії змінного струму однієї напруги на енергію змінного струму іншої напруги при сталій частоті.

Технічний трансформатор складається з двох або кількох обмоток ізолюваного дроту, намотаних на спільне замкнуте феромагнітне осердя. Обмотка, яка підключається до джерела змінного струму, називається первинною. Обмотки, до яких підключаються приймачі електричної енергії – вторинними.

Трансформатори, в яких вторинні обмотки складаються з більшої кількості витків провідника, ніж первинні, називаються підвищувальними. Якщо кількість витків більша у первинній обмотці, то трансформатор називають знижувальним.

Принцип дії трансформатора базується на явищі електромагнітної індукції. Якщо на первинну обмотку з кількістю витків  $n_1$  подати вхідну змінну напругу  $U_1$ , а вторинну обмотку, що складається з  $n_2$  витків, залишити розімкненою (трансформатор знаходиться в режимі холостого ходу), то струм первинної обмотки викликає змінний магнітний потік, який є однаковим у

ферромагнітному осерді для обох обмоток. Цей магнітний потік зумовлює ЕРС самоіндукції у первинній обмотці:

$$\varepsilon_1 = -n_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n_1 \cdot \Phi_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t = n_1 \cdot \Phi_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

У вторинній обмотці змінний магнітний потік зумовлює ЕРС індукції:

$$\varepsilon_2 = -n_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n_2 \cdot \Phi_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t = n_2 \cdot \Phi_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Згідно закону Ома, напруга на вході та виході трансформатора:

$$U_1 = I_1 R_1 - \varepsilon_1 = I_1 R_1 + n_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \text{ та}$$

$$U_2 = I_2 R_2 - \varepsilon_2 = I_2 R_2 + n_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

де  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  - відповідно, сили струму, напруги в первинній та вторинній обмотках, опори обмоток.

Оскільки трансформатор ненавантажений, то струм у вторинній обмотці дорівнює нулю, а  $I_1 R_1 \ll \varepsilon_1$ . Тоді:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = k \quad (1),$$

де  $k$  - коефіцієнт трансформації.

За відношенням:

$$\frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2} = \varepsilon_0 \quad (2)$$

можна визначити  $\varepsilon_0$  - ЕРС, що припадає на один виток обмоток трансформатора.

Якщо  $k > 1$ , то трансформатор називають знижувальним, якщо  $k < 1$ , то трансформатор – підвищувальний. За допомогою вольтметра, підключеного до вторинної обмотки трансформатора в режимі холостого ходу можна визначити ЕРС у вторинній обмотці ( $U_2 \approx \varepsilon_2$ ).

Для навантаженого трансформатора (у вторинну обмотку включено споживач електричної енергії) можна вважати, що потужності в обох обмотках однакові ( $I_1 \cdot U_1 = I_2 \cdot \varepsilon_2$ ;  $\frac{\varepsilon_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_1}{n_2}$ ) і можна визначити коефіцієнт корисної дії трансформатора:

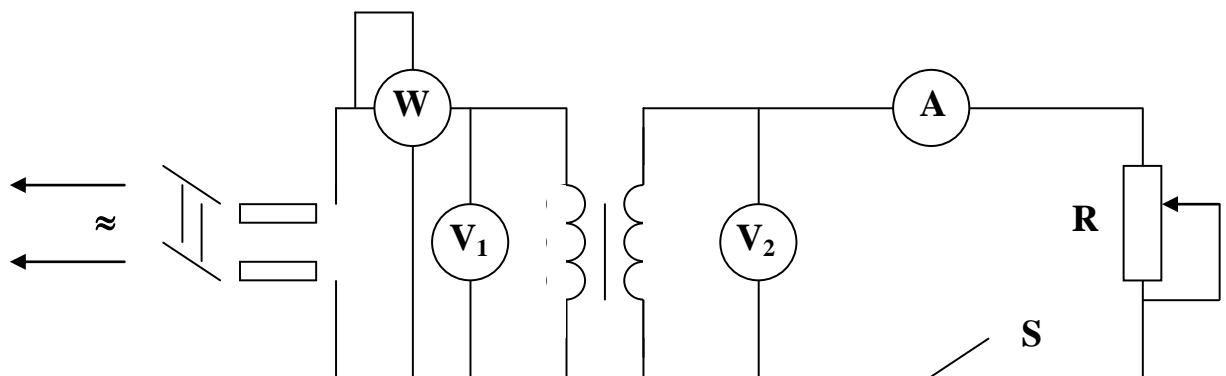
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3).$$

Під час роботи трансформатора відбувається втрата його потужності на нагрівання мідних провідників обмоток, втрата в осерді (гістерезис або перемагнічення та вихрові струми).

Сучасні силові трансформатори мають коефіцієнт корисної дії до 97-98%.

### **Порядок виконання роботи**

1. Скласти електричне коло за схемою (мал. 14).



**Мал. 14.**

2. В режимі холостого ходу (вимикач розімкнений), виміряти значення  $U_1$  та  $\varepsilon_2$ . Занести отримані значення та значення кількості витків первинної і вторинної обмоток трансформатора  $n_1$ ,  $n_2$  до таблиці 1.
3. За формулами (1), (2) розрахувати коефіцієнт трансформації та ЕРС в обмотці трансформатора.
4. Замкнути вимикач та змінюючи реостатом опір навантаження вторинної обмотки трансформатора (3 - 5 значень) виміряти напругу та струм  $I_2$  у вторинній обмотці і обчисливши потужності у первинній та вторинній обмотках, визначити за формулою (3) коефіцієнт корисної дії трансформатора.
5. Побудувати графік залежності  $\eta(I_2)$ . Зробити висновок, при якому значенні сили струму у вторинній обмотці коефіцієнт корисної дії трансформатора буде максимальним.



**Таблиця 1.**

<b>R</b>	<b>I<sub>2</sub>, A</b>	<b>U<sub>2</sub>, В</b>	<b>U<sub>1</sub>, В</b>	<b>ε<sub>2</sub>, В</b>	<b>n<sub>1</sub></b>	<b>n<sub>2</sub></b>
<b>R<sub>1</sub></b>						
<b>R<sub>2</sub></b>						
<b>R<sub>3</sub></b>						
<b>R<sub>4</sub></b>						
<b>R<sub>5</sub></b>						

***Контрольні питання***

1. На якому фізичному явищі ґрунтується принцип дії трансформатора?
2. З якою метою обмотки трансформатора розміщуються на феромагнітному осерді ?
3. Від чого залежить коефіцієнт трансформації трансформатора ?
4. Як можна перетворити знижувальний трансформатор у підвищувальний ?
5. Як можна збільшити ККД трансформатора ?

## ДОДАТКИ

### Густина та питомі опори речовин

Речовина	Густина ( $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> )	Питомий опір ( $\rho$ , нОм·м)
Корок	200	
Гас	800	
Лід	910	
Вода	1000	
Гліцерин	1260	
Алюміній	2690	29
Олово	7230	
Залізо	7860	97,1
Сталь	7700-8000	
Латунь	8300-8700	
Мідь	8880-8960	43
Нікель	8400-9200	68,4
Срібло	10420-10570	16
Свинець	11220-11440	
Ртуть	13596	

### Значення коефіцієнту Стьюдента для довірчої імовірності $\alpha = 0,95$ , $t_n$

Кількість вимірювань, $n$	Коефіцієнт Стьюдента, $t_n$	Кількість вимірювань, $n$	Коефіцієнт Стьюдента, $t_n$
2	12,70	20	2,09
3	4,30	25	2,06
4	3,18	30	2,05
5	2,78	35	2,04
6	2,57	40	2,02
7	2,45	45	2,02
8	2,36	50	2,01
9	2,31	60	2,00
10	2,26	70	1,99

## Діелектричні проникності речовин

Речовина	$\epsilon$
Повітря	1,00027
Газ	2
Масло трансформаторне	2,2
Ебоніт	2,6
Слюда	4,0-8,0
Скло	5,0-10,0
Гліцерин	39,1
Вода	81,0

## Електрохімічні еквіваленти

Аніони	Ел. екв. (мг/кл)	Катіони	Ел. екв. (мг/кл)
Cl <sup>-</sup>	0,367	Ag <sup>+</sup>	1,1180
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,643	Au <sup>3+</sup>	0,683
O <sup>2-</sup>	0,0829	Cu <sup>2+</sup>	0,329
OH <sup>-</sup>	0,177	Hg <sup>2+</sup>	2,079
SO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,499	Ni <sup>3+</sup>	0,203
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,311	Pb <sup>2+</sup>	1,074

**Навчально-методичне видання**

Відповідальний за випуск В.С.Шматко

Наклад 100 прим.