

# ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	3
Розділ 1. Вимірювання фізичних величин .....	6
Розділ 2. Дослідження руху тіла, кинутого під кутом до горизонту .....	32
Розділ 3. Вимірювання прискорення вільного падіння .....	46
Розділ 4. Вивчення коливань пружинного маятника .....	62
Розділ 5. Вимірювання маси тіла .....	74
Розділ 6. Вимірювання атмосферного тиску .....	83
Розділ 7. Вимірювання вологості повітря .....	94
Розділ 8. Вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини .....	107
Розділ 9. Вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя рідини .....	116
Розділ 10. Вимірювання електроємності конденсатора .....	129
Розділ 11. Вимірювання електричного опору провідника .....	144
Розділ 12. Вимірювання горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі .....	153
Розділ 13. Вимірювання елементарного електричного заряду .....	164
Розділ 14. Вимірювання абсолютного показника заломлення скла .....	176
Розділ 15. Вимірювання фокусної відстані збиральної та розсіювальної лінз .....	189
Розділ 16. Вимірювання довжини світлової хвилі .....	203
Розділ 17. Вимірювання роботи виходу електрона з металу .....	213
<b>РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА</b> .....	226

## ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 014 Середня освіта предметної спеціальності 014.08 Середня освіта (Фізика) класичних та педагогічних університетів, його зміст відповідає основним темам навчальної дисципліни «Практикум зі шкільного фізичного експерименту». *Метою* цієї дисципліни є набуття студентами – майбутніми вчителями фізики здатності організовувати і проводити всі види фізичного експерименту у процесі навчання фізики у закладах загальної середньої освіти. Завданнями дисципліни «Практикум зі шкільного фізичного експерименту» є такі:

- вивчення студентами наукових і психолого-педагогічних основ, структури і змісту шкільного фізичного експерименту;

- вивчення обладнання та функціональних можливостей кабінету фізики закладу загальної середньої освіти;

- формування знань і умінь з організації та проведення демонстраційного експерименту, лабораторних робіт і робіт фізичного практикуму;

- вироблення умінь розв'язувати експериментальні задачі з фізики;

- вироблення умінь планувати навчальну роботу з предмета, проводити науково-методичний аналіз навчального матеріалу, обирати методичні прийоми навчання, зважаючи на особливості матеріалу й профіль освітнього закладу.

Зміст посібника узгоджується із структурою та змістом дисципліни «Практикум зі шкільного фізичного експерименту», що передбачає проведення лабораторних робіт з таких розділів загальної фізики: «Механіка», «Молекулярна фізика», «Електрика та магнетизм», «Оптика та основи атомної фізики». Автори мали на меті реалізувати диференційований підхід до студентів у процесі їх навчання (зокрема, під час проведення лабораторних занять), створити умови для розвитку у них творчих здібностей і навичок самостійного наукового пізнання, самоосвіти і самореалізації особистості.

Виконання запропонованих у посібнику експериментальних завдань вимагає від студента вивчити (або повторити) теорію розглядуваного питання, скласти

експериментальну установку, безпосередньо провести дослід, зафіксувати експериментальні дані, провести їх обробку та оцінити достовірність отриманих результатів.

Наведені у посібнику навчальні блоки мають таку структуру:

1. *Теоретичні відомості.* У цій частині пояснюються основні поняття теорії, пов'язані з темою навчального блоку. Особлива увага приділяється саме тим питанням, що потрібні для проведення експериментального дослідження (вимірювання) відповідних фізичних величин.

2. *Експериментальна частина.* Детально розглядається конкретна навчальна проблема (пов'язана, наприклад, з вимірюванням певної фізичної величини), яка має бути розв'язана шляхом проведення фізичного експерименту: формулюється завдання; наводиться перелік засобів для проведення експерименту (вимірювальні прилади, пристрої, досліджувані об'єкти, довідкова література); висвітлюється сутність методу вимірювання, а також вказується на його значення та галузь застосування у фізиці й техніці.

Експериментальна частина також містить спеціальні підготовчі вправи. Вони розділені на два рівні. *Рівень А* складається з тестових завдань, які пов'язані з теоретичним матеріалом роботи (частина з них запозичена зі збірника різнорівневих завдань І. М. Гельфгата). Завдання *рівня Б* спрямовані на засвоєння окремих елементів методики проведення конкретного експерименту. Розв'язуючи їх, студенти самі приходять до необхідності виконання певної дії у процесі виконання роботи, перевідкривають (для себе) окремі елементи методики вимірювання. Крім того, за допомогою підготовчих вправ викладач може здійснювати діагностику рівня підготовленості студентів та надавати допуск до безпосереднього виконання ними експерименту.

3. *Додаткові творчі завдання.* Для студентів, які виявляють особливий інтерес до фізики, передбачено додаткові цікаві досліди та творчі завдання (переважно авторські), що структуровані за такими блоками:

– *Завдання для формування банку ідей.* У них потрібно лише запропонувати («винайти») спосіб виконання певної дії (вимірювання, конструювання тощо). Умови таких задач формулюються як запитання: «Як знайти...?», «Як

зробити...?», «Як виміряти...?» тощо (деякі з них взяті з відомого збірника цікавих задач В. М. Ланге). Вони націлені на формування у студентів системи можливих розв'язків подібних експериментальних задач.

– *Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.* Ці задачі можна успішно використовувати як завдання для домашньої роботи. Більшість з наведених експериментальних задач пропонувалися раніш на державних етапах Всеукраїнських олімпіад з фізики. Використання винахідницьких задач (деякі з них взяті зі збірників В. Г. Разумовського та А. А. Давиденка) сприяє навчанню студентів застосовувати знання на практиці для створення технічних рішень (нехай таких, що не виходять за рівень техніки, але для студента – нових!). Розв'язування цих задач може перетворитися у довгострокові науководослідницькі роботи, результатами яких можуть бути і справжні винаходи. Останнє є проявом найвищого рівня навчальних досягнень студентів.

– *Зробіть своїми руками!* Завдання, які подані у цьому пункті, спрямовані, здебільшого, на розвиток *моторних умінь і навичок*, адже від них залежить успішність виконання механічних дій за безпосереднього виконання експерименту. Крім того, у багатьох студентів викликає неспідробний інтерес саме створення технічних пристроїв (діючих моделей, макетів тощо).

Зазначимо, що методичні вдосконалення, наведені у даному посібнику, були предметом окремих наукових досліджень його авторів.

Окрім основного тексту, посібник містить додатковий (факультативний), в якому наведені більш докладні пояснення, інформаційні довідки, виведення деяких формул, додаткові вправи. Цей матеріал подано дрібнішим шрифтом. За бажанням його можна опустити (в основному тексті відсутні посилання на додатковий матеріал). Задачі підвищеної складності позначено зірочкою.

*Бажаємо творчих успіхів!*

# РОЗДІЛ 1.

## ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН



### 1.1. Теоретичні відомості.

*Виміряти* фізичну величину – означає знайти експериментальним шляхом значення фізичної величини за допомогою спеціальних технічних засобів (засобів вимірювань). При вимірюванні фізична величина порівнюється з однорідною величиною, яку прийнято за одиницю. Якщо, наприклад, зазначається, що маса тіла дорівнює 5 кг, то 5 кг – це значення маси тіла, яке дорівнює добутку числового значення фізичної величини (5) на одиницю маси (кг). Виміряти масу тіла – це і означає визначити, у скільки разів його маса відрізняється від маси еталона. Для забезпечення єдності фізичних вимірювань створені міжнародні еталони кожної з основних одиниць СІ.

Загальноприйнятою у наш час є Міжнародна система одиниць СІ (система інтернаціональна). Вона базується на *семи* основних одиницях: одиниця довжини – *метр* (м), маси – *кілограм* (кг), часу – *секунда* (с), кількості речовини – *моль* (моль), температури – *кельвін* (К), сили електричного струму – *ампер* (А), сили світла – *кандела* (кд).

*Істинне* значення вимірюваної фізичної величини визначити неможливо, оскільки не існує абсолютно точних приладів та інших засобів вимірювань (та й самі еталони одиниць фізичних величин відтворюються лише з кінцевою точністю). Навіть значення фундаментальних фізичних констант відомі з певними похибками. Так, стала Авогадро за останніми даними дорівнює  $N_A = (6,022045 \pm 0,000031) \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>. Цей запис означає, що істинне значення є невідомим, але з імовірністю близькою до 1 можна стверджувати, що воно знаходиться в інтервалі значень

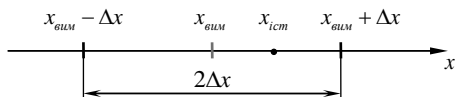
$$6,022014 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} < N_A < 6,022076 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Як приклад *точних* значень фізичних величин, з якими доводиться зустрічатися в експерименті, наведемо результат лічби порівняно невеликої кількості предметів (число витків дрютяного реостата; число крапель, які падають з бюретки; кількість акумуляторів у батареї тощо).

Процес вимірювання вважається завершеним лише тоді, коли вказано не тільки число  $x_{\text{вим}}$ , прийняте за результат вимірювання, але й число  $\Delta x$ , що дозволяє визначити інтервал

$$(x_{\text{вим}} - \Delta x; x_{\text{вим}} + \Delta x) \text{ або (інший запис) } x_{\text{вим}} \pm \Delta x,$$

який з досить великою імовірністю (близькою до 1) містить невідоме експериментатору істинне значення  $x_{\text{іст}}$  вимірюваної величини  $x$  (рис. 1.1). Величина  $\Delta x$  називається *межею абсолютної похибки*. Вона є додатною величиною.



**Рис. 1.1.** Графічне зображення результату вимірювання величини  $x$

Зазначимо, що під *абсолютною похибкою вимірювання*  $\delta x$  розуміють модуль різниці виміряного  $x_{\text{вим}}$  та істинного  $x_{\text{іст}}$  значень фізичної величини:

$$\delta x = |x_{\text{вим}} - x_{\text{іст}}|.$$

Проте, як уже зазначалося, точне значення є невідомим. Тому точність вимірювання оцінюють за допомогою *межі абсолютної похибки*  $\Delta x$ .

Межа абсолютної похибки не повністю характеризує вимірювання. Нехай, наприклад, в результаті вимірювань встановлено, що довжина стола дорівнює  $l = (100 \pm 1)$  см, а товщина його кришки  $d = (2 \pm 1)$  см. Межі абсолютної похибки вимірювань у цих двох випадках однакова. Проте, очевидно, що якість вимірювання у першому випадку вище.

Тому цілком логічно якість вимірювання характеризувати *межею відносної похибки*  $\varepsilon$ , яка дорівнює відношенню межі абсолютної похибки  $\Delta x$  до виміряного значення  $x_{\text{вим}}$  (при цьому часто  $\varepsilon$  виражають у відсотках):

$$\varepsilon \equiv \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}}.$$

Поняття абсолютної похибки (та її межі) є зовсім непридатним для порівняння точності значень величин з різними розмірностями. Це пояснюється тим, що абсолютна похибка

є іменованою величиною, її розмірність співпадає з розмірністю вимірюваної величини. Тому безглуздим, наприклад, є запитання: яке вимірювання є більш точним – вимірювання довжини з точністю до 1 мм або вимірювання маси з точністю до 1 г? Поняття відносної похибки  $\delta x/x_{\text{вим}}$  (та її межі  $\Delta x/x_{\text{вим}}$ ) дозволяє порівнювати точність вимірювань, у тому числі, і величин з різними розмірностями.

Отже, експериментатору потрібно не лише отримати у досліді наближене значення  $x_{\text{вим}}$  вимірюваної величини, але й оцінити точність цього значення за допомогою меж абсолютної  $\Delta x$  або відносної  $\varepsilon$  похибок. Результат вимірювання подають у вигляді:

$$x = x_{\text{вим}} \pm \Delta x. \quad (1.1)$$

До запису результату за формою (1.1) висувають ряд вимог. Так, після того, як межю абсолютної похибки знайдено, її значення округляють з надлишком, як правило, до однієї значущої цифри (з більшою кількістю значущих цифр похибки записують лише при відповідальних вимірюваннях високої точності). Після цього у вимірюваному значенні  $x_{\text{вим}}$  залишають стільки десяткових знаків, скільки їх має похибка  $\Delta x$  (при цьому користуються звичайним правилом округлення). Такий підхід пояснюється тим, що перша зліва ненульова цифра похибки визначає сумнівну цифру у вимірюваному значенні  $x_{\text{вим}}$ . Тому друга цифра похибки звичайно не вносить суттєвих змін у результат. Наприклад, запис  $v = (1,40352 \pm 0,023)$  м/с є не зовсім вдалим. Бажано записати  $\Delta v = 0,03$  м/с та  $v = (1,40 \pm 0,03)$  м/с.

*Які цифри числа називають значущими?* За В.М. Брадїсом, значущими цифрами числа називають всі його цифри, окрім нулів, які стоять зліва від першої ненульової цифри, та нулів, які стоять у кінці числа, якщо вони замінюють невідомі або відкинуті цифри.

*Приклад 1.*

– Електрохімічний еквівалент алюмінію  $k = 0,0936$  мг/Кл. В цьому числі три значущі цифри.

– Питомий опір цинку при деякій температурі  $\rho = 0,060 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Це число задано з точністю до тисячних, тому останній нуль є значущим; число має дві значущі цифри.

– При вимірюванні тиску газу в посудині отримали  $p = 2500$  Па. Якщо це число задане з точністю до сотень, то два нулі є незначущими (вони стоять замість невідомих цифр).

В останньому прикладі, щоб з'ясувати кількість значущих цифр, треба було додатково знати, з якою точністю задане число. В подібних випадках слід користуватися стандартною формою запису числа або ж слід перейти до кратних одиниць. Отже, в нашому прикладі

виміряне значення тиску треба записати так:  $p = 2,5 \cdot 10^3$  Па або  $p = 2,5$  кПа. Якщо ж вимірювання було проведене з точністю до одиниць Па, то запис має бути таким:  $p = 2,500 \cdot 10^3$  Па (два нулі в цьому випадку – значущі цифри).

Які цифри числа називають правильними? У фізиці користуються поняттям «правильна цифра» у вузькому значенні: цифра  $n$ -го розряду називається *правильною*, якщо абсолютна похибка не перевищує половини одиниці цього розряду. У таблицях фізичних величин, у математичних таблицях значення записані лише правильними цифрами. Наприклад, у знайденому з таблиці густин значенні густини міді  $8,93 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> цифра 3 в розряді сотих – правильна. Отже, межа абсолютної похибки числа  $8,93 \cdot 10^3$  дорівнює

$\Delta\rho = \frac{0,01}{2} \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> =  $0,005 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Тепер можна вказати інтервал значень, який містить істинне значення густини міді (при певних умовах):  $\rho = (8,930 \pm 0,005) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Якщо ж абсолютна похибка числа перевищує половину одиниці останнього розряду у наближеному числі, то цифру цього розряду називають *сумнівною*. Так, у виразі  $v = (0,56 \pm 0,02)$  м/с цифра 5 є правильною, а цифра 6 – сумнівна.

Як оцінити межі абсолютної  $\Delta$  та відносної  $\varepsilon$  похибок? У першу чергу це залежить від способу отримання числового результату, за яким вимірювання поділяють на *прямі*, *непрямі* (посередні) та *сумісні* (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Класифікація вимірювань за способом отримання числового результату

*Прямими* називають вимірювання, результат яких отримують безпосередньо за допомогою вимірювального приладу або міри.

*Непрямими (посередніми)* називають вимірювання, результат яких отримують на основі розрахунків.

*Сумісними* називають вимірювання двох або кількох неоднойменних величин, з метою знаходження функціональної залежності між ними.

### **Похибки прямих вимірювань.**

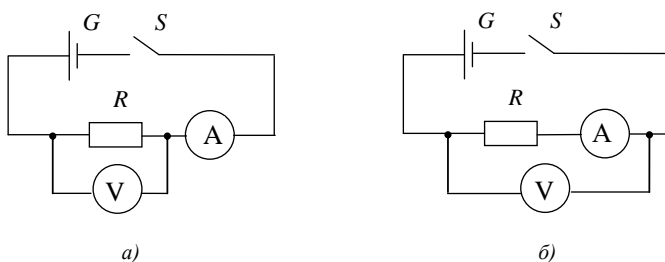
Відповідно до *причин виникнення* похибки вимірювань поділяють на *систематичні, випадкові та промахи*.

*Систематичними* називають похибки, які при повторних вимірюваннях залишаються постійними або змінюються за деяким законом. Наприклад, до ввімкнення амперметра сила струму в електричному колі була дещо більшою. Різниця між силою струму у колі до ввімкнення амперметра і його показами і є систематичною похибкою.

За походженням систематичні похибки поділяють на групи.

– *Похибки методу.* Вони виникають завдяки недосконалості вибраного методу вимірювань та наявності певних припущень та спрощень.

Як приклад, вкажемо на похибку методу вимірювання електричного опору резистора за допомогою амперметра і вольтметра (рис. 1.3). У цьому випадку опір визначають за формулою  $R = U/I$ , де  $U$  – спад напруги на резисторі  $R$ ,  $I$  – сила струму в ньому. Однак, ввімкнутий за схемою *а)* амперметр вимірює силу струму не в резисторі, а сумарну силу струмів у резисторі і у вольтметрі. А вольтметр, ввімкнутий за схемою *б)*, вимірює напругу не на резисторі, а на ділянці, до якої входить резистор і амперметр. Похибку даного методу можна зменшити, якщо вибрати вольтметр із опором, значно більшим  $R$ , а амперметр з опором, значно меншим  $R$ .



**Рис. 1.3. Схеми вимірювання опору резистора методом амперметра і вольтметра**

– *Інструментальні похибки.* Вони виникають через недосконалість конструкції засобів вимірювань та неточність їх виготовлення, через зношення (старіння) та несправність вимірювальних приладів.

– *Похибки, пов'язані з неправильним використанням приладів.* Так, деякі прилади потребують вертикального, інші – горизонтального встановлення; інколи прилад потрібно встановити під деяким кутом до горизонту. Зрозуміло, що за умови правильної експлуатації вимірювальних приладів розглядувані похибки не виникають.

– *Похибки, обумовлені зовнішнім несприятливим впливом* на засоби та об'єкти вимірювання (температура, атмосферний тиск, вологість повітря, сторонні електричні і магнітні поля тощо).

– *Похибки відліку.* Такі похибки виникають через недостатньо точне відлічування показів засобів вимірювань.

*Випадковими* називають похибки, які змінюються випадковим чином при повторних вимірах однієї і тієї ж величини. Їх виникнення пов'язане з дією випадкових факторів, які неможливо усунути у процесі експерименту. Наприклад, при зважуванні одного і того ж самого тіла на одних і тих самих терезах, як правило, отримують дещо різні значення маси. Це можна пояснити тим, що на встановлення рівноваги впливають тертя коромисла на осі та потоки повітря. При вимірюванні струмів і напруг у колі, що живиться від мережі, на результати впливає нестабільність її напруги. При вимірюванні діаметра циліндричного провідника мікрометром різні покази виникають за рахунок того, що при виготовленні провідника його діаметр у різних місцях виявився різним та й форма його не є строго циліндричною.

*Промахи* – похибки, які суттєво перевищують систематичні та випадкові похибки. Їх причинами, як зазвичай, є помилки спостерігача, несправність засобів вимірювань. Промахи виявляються при повторних вимірюваннях, відповідні результати відкидаються. Тому, якщо умови проведення дослідів дозволяють, ніколи не слід обмежуватися одним виміром.

*Похибки при прямих однократних вимірюваннях.* У лабораторних роботах найчастіше проводяться *однократні прямі* вимірювання. Похибка такого вимірювання складається з *похибки засобу вимірювання* (приладу, інструмента, міри)  $\Delta_{пр}$  (її ще називають *інструментальною похибкою*) та *похибки відліку*  $\Delta_{відл}$ :

$$\Delta = \Delta_{пр} + \Delta_{відл}. \quad (1.2)$$

*Інструментальні* похибки поділяють на *основні* – допустимі похибки вимірювальних приладів та *додаткові*, які виникають через зношення, старіння та несправність засобів вимірювань. Основні інструментальні похибки не можна усунути (ввести поправки на них в умовах навчальної лабораторії теж, як правило, неможливо). Додаткові ж інструментальні похибки мають бути усунені (прилади можна вивіряти та полагодити) або на них слід ввести *поправки* (під *поправкою* розуміють значення величини, яке треба додати до отриманого при вимірюванні значення величини з метою виключення систематичної похибки).

Наприклад, стрілка амперметра при відсутності струму встановлюється не на нульовій позначці, а на позначці 0,1 А. В цьому випадку до виміряного таким приладом значення, скажімо 1,4 А, слід додати поправку – 0,1 А, при цьому результат виміру становитиме  $I = 1,4 \text{ А} + (-0,1 \text{ А}) = 1,3 \text{ А}$ .

*Основні* похибки засобів вимірювання визначаються при їх виготовленні на заводі. Ці похибки можна знайти за паспортними даними засобів вимірювання або з довідникової літератури.

Однак похибка прямого однократного вимірювання залежить не лише від точності конкретного приладу. Певна неточність виникає і при зчитуванні показів приладу (зокрема через округлення показів до заданої точності), адже точно визначити відстань від покажчика (стрілки) до штриха (риски) шкали неможливо. З цим і пов'язана *похибка відліку*  $\Delta_{\text{відл}}$ . *Як її врахувати?*

Як правило, за межу похибки відліку приймають найменше значення, яке можна визначити або зчитати на даній шкалі. Так, при ширині поділки 1–2 мм межу похибки відліку беруть рівною половині ціни поділки  $C$ :

$$\Delta_{\text{відл}} = C/2.$$

Якщо ж виявляється можливою окомірною оцінка часток поділки, то для надійності вважають  $\Delta_{\text{відл}}$  рівною ціні частки (а не половині ціни частки).

*Похибки при зважуванні.* Дещо складніше оцінити похибку при використанні терезів. Потрібно, по-перше, врахувати основну похибку терезів  $\Delta_{\text{терезів}}$ , яка залежить від