



§ 2. МЕТОДИ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ЇХ ВИМІРЮВАННЯ. НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ



Чим відрізняється мова фізики (та й будь-якої іншої точної науки) від звичайної мови? Мова фізики інтернаціональна: вона створювалася найкращими умами всіх народів, її однозначно розуміють у будь-якому куточку нашої планети. Мова фізики об'єктивна: кожне її поняття має один зміст, який може змінитися (найчастіше — розширитися) тільки завдяки досліддам.

Як і методи наукового пізнання, мова фізики народилася з практики. Про методи фізичних досліджень і деякі поняття мови фізики ви згадаєте в цьому параграфі.

1

Що таке фізичне дослідження і якими є його методи

Згадаємо, із чого починається дослідницька робота вчених. Перш за все — це *спостереження* за певним явищем (тілом або матеріалом) і міркування над його сутністю.

Спостереження — це сприйняття природи з метою одержання первинних даних для подальшого аналізу.

Далеко не завжди спостереження ведуть до правильного висновку. Тому, щоб спростувати або довести власні висновки, учений проводить *фізичні дослідження*.

Фізичне дослідження — це цілеспрямоване вивчення явищ і властивостей природи засобами фізики.

Методи фізичних досліджень	
експериментальний	теоретичний
<i>Експеримент</i> — дослідження фізичного явища в умовах, які перебувають під контролем ученого. У своїй основі фізика є експериментальною наукою: більшість її законів ґрунтуються на фактах, виявлених дослідним шляхом.	Аналіз отриманих у результаті експериментів даних, формулювання законів природи, пояснення певних явищ і властивостей на основі цих законів, а головне — передбачення й теоретичне обґрунтування (із широким використанням математики) нових явищ і властивостей.



Які спостереження, теоретичні й експериментальні дослідження ви провели б, щоб дослідити світіння звичайної лампи розжарення?

Теоретичні дослідження проводять не з конкретним фізичним тілом, а з його ідеалізованим аналогом — **фізичною моделлю**, яка має враховувати невелику кількість основних властивостей досліджуваного тіла. Так, вивчаючи рух автомобіля, ми інколи використовуємо його фізичну модель — *матеріальну точку* (рис. 2.1, а). Цю модель застосовують, якщо розміри тіла не є суттєвими для теоретичного опису руху автомобіля, тобто в моделі «матеріальна

точка» враховують тільки масу тіла, а його форму та розміри до уваги не беруть. А от якщо необхідно визначити, як на рух автомобіля впливає опір повітря, доцільно застосовувати вже іншу фізичну модель — вона має враховувати і форму, і розміри автомобіля (рис. 2.1, б), але не буде враховувати, наприклад, розташування пасажирів у салоні. Чим більше обрано відповідних параметрів для дослідження фізичної системи «автомобіль», тим краще можна передбачити «поведінку» цієї системи.

? Чи доцільно використовувати модель «матеріальна точка», якщо інженери мають розраховувати стійкість автомобіля?

2 Як виміряти фізичну величину

Описуючи, наприклад, рух автомобіля, ми обов'язково використовуємо певні *кількісні характеристики*: швидкість, прискорення, час руху, силу тяги, потужність тощо. Із попереднього курсу фізики ви знаєте, що *кількісну міру певної властивості тіла, певного фізичного процесу або явища називають фізичною величиною*.

Значення фізичної величини встановлюють у ході вимірювання.

Вимірювання бувають **прямі** і **непрямі**.

У разі *прямих вимірювань* величину порівнюють із її одиницею (метром, секундою, кілограмом, ампером тощо) за допомогою вимірювального приладу, проградуйованого у відповідних одиницях (рис. 2.2).

? Назвіть кілька фізичних величин, значення яких ви знаходили за допомогою прямих вимірювань. У яких одиницях вимірюють ці величини? якими приладами?

У разі *непрямих вимірювань* величину обчислюють за результатами прямих вимірювань інших величин, пов'язаних із вимірюваною величиною певною функціональною залежністю. Так, щоб обчислити середню густину ρ тіла, потрібно за допомогою терезів виміряти його масу m , за допомогою, наприклад, мензурки виміряти об'єм V , а потім масу поділити на об'єм:

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



Рис. 2.1. Визначаючи швидкість і час руху автомобіля, можна застосовувати фізичну модель «матеріальна точка» (а); визначаючи аеродинамічні властивості автомобіля, цю фізичну модель застосовувати не можна (б)



Рис. 2.2. Сучасні прилади для прямого вимірювання температури (а); маси (б); швидкості руху (в)

Основні одиниці СІ

- **кілограм** (1 кг, 1 kg)
одиниця маси
- **метр** (1 м, 1 m)
одиниця довжини
- **секунда** (1 с, 1 s)
одиниця часу
- **ампер** (1 А, 1 A)
одиниця сили струму
- **моль** (1 моль, 1 mol)
одиниця кількості речовини
- **кельвін** (1 К, 1 K)
одиниця температури
- **кандела** (1 кд, 1 kd)
одиниця сили світла



Використовувався
в 1899–1960 рр.

3 Побудова системи одиниць

Завдання вибудувати систему одиниць на науковій основі було поставлено перед французькими вченими наприкінці XVIII ст., після Великої французької революції. У результаті з'явилася *метрична система одиниць*. У 1960 р. було створено **Міжнародну систему одиниць СІ**, яка згодом стала у світі домінуючою.

Історично одиниці фізичних величин пов'язували з певними природними тілами або процесами. Так, 1 метр був пов'язаний із розмірами планети Земля, 1 кілограм — із певним об'ємом води, 1 секунда — з добовим обертанням Землі. Потім для кожної одиниці створювали **еталон** — *засіб (або комплекс засобів) для відтворення та зберігання одиниці фізичної величини*. Основні еталони зберігалися (і зберігаються зараз) у Міжнародному бюро мір і ваг (м. Севр, Франція).

Зараз дедалі більше поширюються методи побудови системи одиниць, які ґрунтуються на особливостях випромінювання та поширення електромагнітних хвиль і на фундаментальних фізичних константах.

Розглянемо основні етапи побудови системи одиниць на прикладах метра і кілограма.

1 метр Довжина 1/10 000 000 частини чверті меридіана Землі, який проходить через Париж (Франція)

Спеціальний відрізок, калібрований за довжиною. Довжину цього відрізка визначено як 1 метр

1 метр дорівнює шляху, який проходить світло у вакуумі за інтервал часу 1/299 792 458 секунди

1 кілограм Маса 1 літра чистої води за температури 4 °С й атмосферного тиску 760 мм рт. ст.

Платиново-іридієвий циліндр, діаметр і висота якого 39 мм. Масу цього зразка визначено як 1 кілограм

Поки залишається платиново-іридієвий циліндр, але планується пов'язати 1 кілограм зі сталою Планка або з числом Авогадро

Створений у 1899 р.



Нагадаємо, що для зручності запису великих і малих значень фізичних величин використовують *кратні та частинні одиниці*.

Кратні одиниці є більшими за основні одиниці в 10, 100, 1000 і більше разів.

Частинні одиниці є меншими за основні одиниці в 10, 100, 1000 і більше разів.

Назви кратних і частинних одиниць містять певні префікси. Наприклад, **кілометр** (1000 м, або 10^3 м) — кратна одиниця довжини, **міліметр** (0,001 м, або 10^{-3} м) — частинна одиниця довжини (див. [табл. 1](#)).

4 Похибки вимірювань

У ході вимірювання будь-яких фізичних величин зазвичай виконують три послідовні операції: 1) вибір, перевірка та встановлення приладу (приладів); 2) зняття показів приладів; 3) обчислення шуканої величини за результатами вимірювань (у разі непрямих вимірювань); 4) оцінювання похибки.

Наприклад, слід виміряти відстань близько 5 м. Зрозуміло, що для цього не треба брати учнівську лінійку, — зручніше скористатися рулеткою. Усі прилади мають певну точність. Відстань у 5 м, як правило, не потрібно визначати з точністю до міліметра, тому шкала рулетки може й не містити відповідних поділок.

А от якщо для полегдження лабораторного крана необхідно визначити розмір дрібної шайби, доцільно скористатися штангенциркулем (див. [рис. 2.3](#)).

Але навіть за допомогою надточного приладу не можна здійснити вимірювання **абсолютно** точно. Завжди є **похибки (невизначеності) вимірювань** — відхилення значення виміряної величини від її істинного значення.

Модуль різниці між виміряним ($x_{\text{вим}}$) та істинним (x) значеннями вимірюваної величини називають **абсолютною похибкою вимірювання** Δx :

$$\Delta x = |x_{\text{вим}} - x|$$

Відношення абсолютної похибки до виміряного значення вимірюваної величини називають **відносною похибкою вимірювання** ε_x :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}}, \text{ або у відсотках: } \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \cdot 100\%$$

Таблиця 1

Префікси для утворення назв кратних і частинних одиниць

Префікс	Позначення	Множник
ато-	а	10^{-18}
фемто-	ф	10^{-15}
піко-	п	10^{-12}
нано-	н	10^{-9}
мікро-	мк	10^{-6}
мілі-	м	10^{-3}
санти-	с	10^{-2}
кіло-	к	10^3
мега-	М	10^6
гіга-	Г	10^9
тера-	Т	10^{12}
пета-	п	10^{15}
екса-	е	10^{18}



Рис. 2.3. Штангенциркуль. Точність вимірювання зображеним приладом — соті частки міліметра

Похибки в ході вимірювань бувають **випадкові** і **систематичні**.

Випадкові похибки	Систематичні похибки
<i>Випадкові похибки пов'язані з процесом вимірювання: вимірюючи рулеткою відстань, неможливо прокласти рулетку ідеально рівно; відлічуючи час секундоміром, неможливо його миттєво ввімкнути та вимкнути, й т. д.</i> Щоб результати були точнішими, вимірювання проводять кілька разів і визначають <i>середнє значення вимірюваної величини</i>: $x_{\text{вим}} = x_{\text{сер}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N},$ де $x_1, x_2, \dots, x_N$ — результати кожного з N вимірювань. У даному разі <i>випадкову абсолютну похибку</i> $\Delta x_{\text{вип}}$ можна визначити за формулою: $\Delta x_{\text{вип}} = \frac{ x_1 - x_{\text{вим}} + x_2 - x_{\text{вим}} + \dots + x_N - x_{\text{вим}} }{N}$ Якщо вимірювання проводилося <i>один раз</i>, то вважаємо, що <i>випадкова похибка дорівнює половині ціни поділки шкали приладу</i>.	<i>Систематичні похибки пов'язані насамперед із вибором приладу: неможливо знайти рулетку з ідеально точною шкалою, ідеально рівноплечі важелі тощо. Систематичні похибки визначаються класом точності приладу, тому їх часто називають <i>похибками приладу</i>.</i> У процесі експлуатації точність приладів може зменшуватися, тому їх необхідно періодично калібрувати за допомогою спеціального обладнання. Абсолютні похибки деяких приладів, що використовують у школі, наведено в табл. 2. Якщо використовуються інші прилади, вважаємо, що похибка приладу дорівнює <i>половині ціни поділки шкали цього приладу</i>.
<i>Абсолютна похибка прямого вимірювання (Δx) враховує як систематичну похибку, зумовлену приладом ($\Delta x_{\text{прил}}$), так і випадкову похибку ($\Delta x_{\text{вип}}$), зумовлену процесом вимірювання: $\Delta x = \Delta x_{\text{прил}} + \Delta x_{\text{вип}}$.</i> <i>Зверніть увагу!</i> Наведені формули є дуже спрощеними. Учені використовують значно складніші формули та методи розрахунків похибок.	

Таблиця 2. Абсолютні похибки деяких фізичних приладів

Фізичний прилад	Ціна поділки шкали приладу	Абсолютна похибка приладу
Лінійка учнівська	1 мм	± 1 мм
Стрічка вимірювальна	0,5 см	$\pm 0,5$ см
Штангенциркуль	0,1 мм	$\pm 0,05$ мм
Циліндр вимірювальний	1 мл	± 1 мл
Секундомір	0,2 с	± 1 с за 30 хв
Динамометр навчальний	0,1 Н	$\pm 0,05$ Н
Термометр лабораторний	1 °C	± 1 °C

5 Як визначити похибки непрямих вимірювань

Багато фізичних величин неможливо виміряти безпосередньо. Їх *непряме* вимірювання має два етапи: 1) методом прямих вимірювань знаходять значення певних величин, наприклад x , y ; 2) за відповідною формулою

обчислюють шукану величину f . Як у такому випадку визначити абсолютну Δf і відносну ε_f похибки?

- Відносну похибку визначають за певними формулами (див. табл. 3).
- Абсолютну похибку визначають за відносною похибкою:

$$\Delta f = \varepsilon_f \cdot f_{\text{вим}}$$

- Якщо експеримент проводять, щоб з'ясувати, чи справджується певна рівність (наприклад, $X=Y$), то відносну похибку експериментальної перевірки рівності $X=Y$ можна оцінити за формулою:

$$\varepsilon = \left| \frac{X}{Y} - 1 \right| \cdot 100\%$$

Таблиця 3. Деякі формули для визначення відносної похибки

Функціональна залежність	Відносна похибка
$f = x + y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = xy$	$\varepsilon_f = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = \frac{x}{y}$	
$f = x^n$	$\varepsilon_f = n\varepsilon_x$

6 Як правильно записати результати

Абсолютна похибка експерименту визначає точність, із якою є сенс обчислювати вимірювану величину.

Абсолютну похибку Δx зазвичай округлюють до однієї значущої цифри із завищенням, а результат вимірювання $x_{\text{вим}}$ — до величини розряду, який залишився в абсолютній похибці після округлення. Остаточний результат x записують у вигляді:

$$x = x_{\text{вим}} \pm \Delta x$$

Абсолютна похибка — додатна величина, тому $x = x_{\text{вим}} + \Delta x$ — найбільше ймовірне значення, а $x = x_{\text{вим}} - \Delta x$ — найменше ймовірне значення вимірюваної величини (рис. 2.4).

Приклад. Нехай вимірювали прискорення вільного падіння (g). Після обробки експериментальних даних отримали: $g_{\text{вим}} = 9,736 \text{ м/с}^2$; $\Delta g = 0,123 \text{ м/с}^2$.

Абсолютну похибку слід округлити до однієї значущої цифри із завищенням: $\Delta g = 0,2 \text{ м/с}^2$. Тоді результат вимірювання округлюється до того ж розряду, що й розряд похибки, тобто до десятих: $g_{\text{вим}} = 9,7 \text{ м/с}^2$. Відповідь за підсумками експерименту слід подати у вигляді: $g = (9,7 \pm 0,2) \text{ м/с}^2$. Відповідно істинне значення прискорення вільного падіння міститься в інтервалі від $9,5 \text{ м/с}^2$ до $9,9 \text{ м/с}^2$ (рис. 2.5).

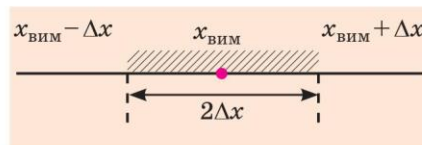


Рис. 2.4. Абсолютна похибка визначає інтервал, у якому перебуває істинне значення вимірюваної величини

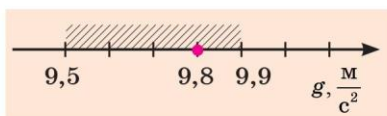


Рис. 2.5. Табличне значення: $g_{\text{табл}} = 9,8 \text{ м/с}^2$ — належить до інтервалу $[9,5; 9,9] \text{ м/с}^2$, тому можна сказати, що результат експерименту ($g_{\text{вим}} = 9,7 \text{ м/с}^2$) збігся з табличним у межах похибки вимірювань



Підбиваємо підсумки

• Фізичне дослідження — це цілеспрямоване вивчення явищ і властивостей природи засобами фізики. Існують два методи фізичних досліджень: теоретичний та експериментальний. В основі будь-якого теоретичного дослідження лежить ідеалізований об'єкт — фізична модель.

• У ході будь-якого вимірювання обов'язково є похибки: випадкові, пов'язані з процесом вимірювання, і систематичні, пов'язані з вибором приладу для вимірювання.

• Абсолютна похибка експерименту визначає інтервал, у якому перебуває істинне значення вимірюваної величини, та обчислюється за формулою: $\Delta x = \Delta x_{\text{вип}} + \Delta x_{\text{прил}}$. Відносна похибка характеризує якість вимірювання, дорівнює відношенню абсолютної похибки до середнього значення вимірюваної величини і подається у відсотках: $\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{вим}}} \cdot 100\%$.



Контрольні запитання

1. Назвіть основні методи фізичних досліджень. Наведіть приклади.
2. Наведіть приклади фізичних моделей. Чому фізична модель — це ідеалізований об'єкт?
3. Назвіть основні одиниці СІ та відповідні їм фізичні величини.
4. Які види похибок вимірювань ви знаєте?
5. Як визначити випадкову похибку вимірювання?
6. Чим визначається абсолютна систематична похибка?
7. Що називають відносною похибкою вимірювання?
8. Як правильно округлити й записати результати вимірювань?



Вправа № 2

1. Щоб довести закон збереження механічної енергії, провели експеримент. За отриманими даними середня енергія системи тіл до взаємодії дорівнювала 225 Дж, а після взаємодії — 243 Дж. Оцініть відносну похибку експерименту.
2. Визначаючи діаметр дроту за допомогою штангенциркуля, вимірювання проводили чотири рази. Було одержано такі результати: $d_1 = 2,2$ мм; $d_2 = 2,1$ мм; $d_3 = 2,0$ мм; $d_4 = 2,0$ мм. 1) Обчисліть середнє значення діаметра дроту, випадкову похибку вимірювання, абсолютну та відносну похибки вимірювання. 2) Округліть одержані результати й запишіть результат вимірювання.