

Міністерство освіти і науки України
Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально- науковий фізико- технологічний інститут

Кобель Г.П., Головіна Н.А., Шаварова Г.П.

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

Навчальний посібник

Вежа-Друк

Луцьк – 2022

УДК 006.91(075.8)
К 55

Рекомендовано до друку Вченою радою Волинського національного університету імені Лесі Українки Міністерства освіти і науки України (протокол №4 від 31.03. 2022 р.)

Рецензенти:

Пастернак Ярослав Михайлович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

Савош Валентин Олексійович – кандидат педагогічних наук, завідувач відділу фізико-математичних дисциплін Волинського інституту післядипломної педагогічної освіти;

Шигорін Павло Павлович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Кобель Г.П., Головіна Н.А., Шаварова Г.П.

К 55 Основи метрології: Навчальний посібник. Луцьк: Вежа-Друк, 2022. 125 с.

Навчальний посібник розрахований для студентів фізичних спеціальностей університетів, які вивчають курс основи метрології. Видання корисне студентам при вивченні загальної фізики, а також вчителям фізики ЗЗСО різного типу.

УДК 006.91(075.8)

© Кобель Г. П., Головіна Н.А., Шаварова Г.П. 2022

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| Вступ. Поняття про метрологію та її завдання | 5 |
| РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ЇХ ОДИНИЦІ..... | 6 |
| 1.1. Фізичні величини, їх місце в науці та техніці. Основні характеристики фізичних величин | 6 |
| 1.2. Літерні позначення фізичних величин..... | 9 |
| 1.3 Деякі історичні аспекти виникнення одиниць фізичних величин | 13 |
| 1.4. Системи одиниць та їх становлення. Системи одиниць – попередники СІ..... | 16 |
| 1.5. Міжнародна система одиниць СІ..... | 24 |
| 1.5.1. Основні одиниці СІ..... | 25 |
| 1.5.2. Похідні одиниці СІ, які мають спеціальні найменування..... | 28 |
| 1.5.3. Позасистемні одиниці, які допускаються до застосування нарівні з одиницями СІ..... | 29 |
| 1.5.4. Одиниці, що тимчасово допускаються до використання..... | 32 |
| 1.6. Одиниці системи СГС, що мають власне найменування, та інші одиниці, які використовуються у фізиці..... | 32 |
| 1.7. Деякі старі українські й російські неметричні одиниці..... | 34 |
| 1.8. Деякі неметричні одиниці, що використовуються в Англії та США | 36 |
| 1.9. Десяткові кратні та частинні одиниці | 37 |
| 1.10. Правила написання найменувань одиниць..... | 40 |
| 1.11. Нормативи і правила написання та застосування позначень одиниць..... | 41 |
| 1.12. Пам'ятка вчителю для правильного використання назв, позначень і означень фізичних величин та їх одиниць..... | 43 |
| 1.13. Фундаментальні фізичні сталі..... | 45 |
| 1.13.1 Фізичний зміст та методи визначення універсальних фізичних сталей..... | 47 |
| 1.14. Короткі відомості про вчених, ім'я яких увічнено у найменуваннях одиниць СІ..... | 53 |
| РОЗДІЛ ІІ. ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА ОЦІНКА ПОХИБОК..... | 71 |
| 2.1. Поняття про вимірювання фізичної величини. Класифікація вимірювань..... | 71 |
| 2.2. Графічне зображення результатів експерименту..... | 75 |
| 2.3. Відомості про вимірювальні прилади..... | 78 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 2.4. | Поняття про похибки вимірювань. Класифікація похибок вимірювання в залежності від причин їх виникнення..... | 95 |
| 2.5. | Оцінка похибок при обробці результатів вимірювань..... | 99 |
| 2.6. | Основні методи наближених обчислень..... | 105 |
| 2.6.1. | Метод меж..... | 105 |
| 2.6.2. | Метод підрахунку цифр..... | 106 |
| 2.6.3. | Додавання і віднімання наближених значень чисел..... | 107 |
| 2.6.4. | Множення і ділення наближених значень чисел..... | 108 |
| 2.6.5. | Піднесення до степеня і добування кореня..... | 109 |
| 2.7. | Додаткові правила підрахунку цифр..... | 111 |
| 2.7.1. | Правило запасної цифри | 111 |
| 2.7.2. | Правило попереднього заокруглення більш точних даних..... | 112 |
| 2.7.3. | Правило обчислень з наперед заданою точністю..... | 112 |
| 2.8. | Наближені обчислення зі значеннями тригонометричних функцій..... | 113 |
| 2.9. | Наближене обчислення з допомогою мікрокалькуляторів..... | 115 |
| | Додатки..... | 117 |
| | Список використаних джерел..... | 123 |

Вступ. Поняття про метрологію та її завдання

Метрологією (грец. metron – міра і logos – поняття, вчення) називають науку про вимірювання фізичних величин і про способи забезпечення єдиності і необхідної точності цих вимірювань.

До основних розділів метрології належить загальна теорія вимірювань фізичних величин, одиниці фізичних величин та їх системи, методи і засоби вимірювань, метрологічне забезпечення, суттєву частину якого становлять еталони і зразкові засоби вимірювань, а також методи передачі розмірів одиниць робочим засобам вимірювань.

Метрологію поділяють на теоретичну і законодавчу.

Основними питаннями теоретичної метрології є розвиток загальної теорії вимірювань фізичних величин, розробка теоретичних питань побудови систем фізичних величин та їх одиниць, теоретичне обґрунтування створення та використання еталонів одиниць, розробка оптимальних засобів і способів передачі розмірів одиниць в практику вимірювань, вдосконалення методів обробки результатів фізичних експериментів.

Законодавча метрологія розробляє положення і правила метрологічного забезпечення, які вимагають регламентації з боку уряду та державних структур.

Розділ 1. Фізичні величин та їх одиниці

1.1. Фізичні величини, їх місце в науці та техніці. Основні характеристики фізичних величин

Основним поняттям у фізиці є поняття величини. Величини є складовими частинами змісту багатьох наук: математики, фізики, астрономії, біології тощо. Без величин вивчення природи обмежувалося б лише спостереженнями і залишалося б на описовому рівні.

Величини не існують самі по собі як деякі субстанції, відірвані від матеріальних об'єктів і їх властивостей. З іншого боку величини в деякій мірі ідеалізують властивості об'єктів і явищ. Тому величини – це не сама реальність, а її відображення.

Г. С. Лансберг у передмові до першого тому «Елементарного підручника фізики» писав, що будь-яка властивість, яка вводиться у фізиці, дістає конкретний зміст тільки тоді, коли з нею пов'язується прийом спостереження й вимірювання, без якого ця властивість не може застосовуватися в дослідженні реальних фізичних явищ.

Отже, вимірювання роблять властивості фізичних об'єктів такими, що до них можна застосувати кількісні методи. Властивості стають величинами. Що ж таке фізична величина?

Фізична величина – це властивість, спільна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів (фізичних систем, їхніх станів та процесів, що в них відбуваються), але в кількісному відношенні – індивідуальна для кожного об'єкта.

Фізичними величинами є, наприклад, маса, енергія, температура, електричний заряд, густина, і інші. Наприклад, всі фізичні тіла, всі частинки речовини мають масу. В якісному відношенні маси всіх фізичних об'єктів однакові, вони характеризують інертні і гравітаційні властивості цих об'єктів. Але в кількісному відношенні маса кожного об'єкта – властивість індивідуальна, різна. Наприклад, маса протона приблизно в 1836 разів більша маси електрона.

Термін «величина» застосовується до властивостей або їхніх характеристик, які можна оцінювати кількісно, тобто вимірювати. Є багато властивостей, які ми ще не вміємо оцінювати кількісно, наприклад колір, запах, смак. Поки ми їх не вміємо вимірювати, не називаємо їх величинами, а називаємо властивостями.

Для визначення фізичної величини потрібно встановити:

а) яку реальну властивість фізичного об'єкта повинна

характеризувати величина, що вводиться;

б) з якими раніше введеними величинами вона пов'язана і яка формула виражає цей зв'язок;

в) як виміряти величину.

Відповідно, розкриваючи поняття тієї або іншої фізичної величини, треба показати:

1) властивість фізичного об'єкта;

2) спільність цієї властивості для багатьох фізичних об'єктів;

3) важливість даної властивості для дослідження фізичних об'єктів;

4) можливість порівняння властивостей, тобто вказати, як можна встановити, де ця властивість більша, а де вона менша;

5) такий метод визначення: на скільки властивість одного об'єкта більша чи менша від такої самої властивості іншого об'єкта. Для цього вказується одиниця фізичної величини;

б) основні методи вимірювання фізичної величини;

7) засоби вимірювання даної фізичної величини.

В навчальній і методичній літературі з фізики можна зустріти різні визначення поняття величини. В більшості з них відмічають два моменти:

1) фізична величина є деяка характеристика тіла, явища чи процесу;

2) фізична величина може бути вимірною.

У фізиці велике значення надається розкриттю фізичної суті тієї чи іншої фізичної величини. Наприклад, маса характеризує інертні і гравітаційні властивості матерії. В цьому її фізична суть. Для його розуміння потрібно знати, чим пояснюється властивість інертності і гравітації. Це справедливо і для інших величин. Тому введенню тієї чи іншої величини передуює вивчення тих властивостей об'єктів, які ці величини відображають. В багатьох випадках розкрити фізичний зміст величин допомагає досвід, експеримент.

Всі фізичні величини можна розділити на два великих класи: постійні і змінні фізичні величини. В свою чергу постійні фізичні величини діляться на декілька груп і можуть бути розмірнісі чи безрозмірнісі.

До першої групи належать постійні фізичні величини, які входять у фундаментальні фізичні закони або є характеристиками елементарних частинок і процесів мікросвіту. Вони називаються фундаментальними константами. До них належать: гравітаційна стала

G , швидкість світла у вакуумі c , постійна Планка h , елементарний електричний заряд e , маса електрона m і інші.

До другої групи належать постійні фізичні величини, які мають зміст констант фізичних теорій (наприклад, постійна Авогадро N_A , постійна Больцмана k , постійна Фарадея F і інші).

До третьої групи належать специфічні постійні величини, що характеризують певні властивості явищ, фізичних систем або окремих речовин, але які мають в теоріях власний характер (наприклад, червона межа фотоефекту, критична температура, температура потрійної точки води або іншої речовини, межа міцності і ін.)

І до четвертої групи відносять різні коефіцієнти, які мають розмірність і безрозмірнісні (коефіцієнт тертя, коефіцієнт лінійного розширення, температурний коефіцієнт, коефіцієнт опору і ін.)

Фізичні величини розрізняють за родом, розміром, розмірністю, їм установлюють найменування, літерні позначення. Залежно від області фізичних явищ фізичні величини об'єднують у системи, в яких кожна із них займає цілком певне місце. Деякі з фізичних величин вибирають за основні, інші називають похідними. Все це регламентується державними стандартами та іншими нормативними документами державної системи забезпечення єдиності вимірювань.

Родом фізичної величини називають її якісну означеність.

За родом розрізняють однорідні та неоднорідні величини. Однорідні величини відображають одну і ту ж властивість об'єкта. Вони відрізняються тільки числовими значеннями. Неоднорідні величини відображають різні властивості об'єктів. Однорідні величини, як правило, позначаються однаковими літерами. Хоча швидкість світла позначають c , а не U . Неоднорідні величини позначаються різними літерами (в межах однієї теми). У фізиці розрізняють також однойменні і різнойменні величини. однойменні величини мають однакову розмірність, а різнойменні – різну.

Всі однорідні величини є одночасно і однойменними. Неоднорідні величини можуть бути однойменними і різнойменними.

Розміром фізичної величини називається кількісний вміст у даному матеріальному об'єкті властивості, що відповідає поняттю «фізична величина». Слід зауважити, що не правильно використовують термін «величина» як кількісну характеристику даної властивості. Наприклад, вживаючи термін «величина маси», «величина напруги», ми стикаємося із звичайною тавтологією,

оскільки і маса, і напруга самі по собі є величинами. Потрібно казати «значення напруги». Розмір величини не залежить від вибраної одиниці. Числове значення фізичної величини визначається вибором одиниці вимірювання.

Системою фізичних величин називається сукупність величин, пов'язаних між собою певними залежностями. В такій системі кілька величин вибираються як незалежні, їх називають основними. Фізична величина, яка входить у систему величин і визначається через її основні величини називається похідною.

Розмірністю фізичної величини називається вираз, який в умовних позначеннях відображає її зв'язок з основними величинами системи.

Розмірність похідної величини x у системі, розмірність основних величин якої A_1, A_2, \dots, A_n у загальному вигляді виражається так:

$$\dim x = A_1^{\alpha_1} \cdot A_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot A_n^{\alpha_n}.$$

Наприклад, $\dim v = LT^{-1}$; $\dim a = LT^{-2}$; $\dim F = LMT^{-2}$.

Фізичні величини можуть бути розмірнісними і безрозмірнісними. Безрозмірною називається величина, у виразі розмірності якої всі показники степенів рівні нулю.

При встановленні основних одиниць дуже важливою є можливість забезпечення сталості одиниці, її перевірки, відтворення, а у випадку втрати – відновлення. Тому виникло прагнення пов'язувати одиниці з величинами, які зустрічаються у природі.

1.2. Літерні позначення фізичних величин

| Найменування величини | Позначення | | Примітка |
|-----------------------------|-------------------------|----------|---|
| | основне | запасне | |
| Простір та час | | | |
| Кут плоский | α, β, γ | | Використовують також інші літери грецького алфавіту |
| Кут тілесний | Ω | ω | |
| Довжина | l, L | | |
| Ширина | b | | |
| Висота, глибина | h | | |
| Товщина | d, δ | | |
| Радіус, радіальна відстань. | r, R | | |
| Діаметр | d, D | | |

| | | | |
|--|-----------|-----------|---|
| Довжина траєкторії, відрізок прямої | s | | |
| Площа, площа поверхні | A | S | |
| Об'єм | V | v | |
| Час | t | | |
| Кутова швидкість | ω | Ω | |
| Кутове прискорення | α | | |
| (Лінійна) швидкість | v | | |
| (Лінійне) прискорення | a | | |
| Прискорення вільного падіння | g | | |
| Періодичні та пов'язані величини | | | |
| Частота | f | ν | |
| Частота обертання | n | | |
| Кутова частота | ω | | |
| Довжина хвилі | λ | | |
| Період | T | | |
| Швидкість поширення електромагнітних хвиль | c | | |
| Коефіцієнт затухання | δ | | |
| Механіка | | | |
| Маса | m | | |
| Густина | ρ | | Визначається як маса, поділена на об'єм |
| Кількість руху (Поширене у класичній механіці. У квантовій механіці використовують найменування "Імпульс") | p | | |
| Момент інерції | I, J | | |
| Сила | F | | |
| Вага | F_g | G, P, W | |
| Момент сили | M | | |
| Жорсткість | k | | |
| Коефіцієнт тертя ковзання | f, μ | | |
| Тиск | p | | |
| Робота | W | A | |
| Енергія | E | W | |
| Густина енергії (об'ємна) | e | w | |
| Потужність | P | | |

| | | | |
|--|-------------|-----------|--|
| Коефіцієнт корисної дії | η | | |
| Теплота | | | |
| Абсолютна температура | T | Θ | |
| Молярна маса | M | | |
| Температура (за Цельсієм) | t, θ | | |
| Кількість теплоти | Q | | |
| Температурний коефіцієнт | α | | |
| Коефіцієнт теплопровідності | λ | χ | |
| Теплоємність | C | | |
| Питома теплоємність | c | | |
| Питома теплота плавлення | λ | | |
| Питома теплота пароутворення | r | | |
| Питома теплота згоряння | q | | |
| Електрика та магнетизм | | | |
| Вектор Пойтінга | S | P | |
| Заряд електричний | Q | | |
| Поверхнева густина електричного заряду | σ | | |
| Об'ємна густина електричного заряду | ρ | | |
| Відношення кількості витків двох котушок | n | q | |
| Густина електричного заряду лінійна | τ | | |
| Напруженість електричного поля | E | | |
| Потенціал електричний | V | φ | |
| Різниця потенціалів, напруга | U | V | |
| Електрорушійна сила, ЕРС | E | | |
| Електрична індукція | D | | |
| Ємність електрична | C | | |
| Електрична проникність | ϵ | | |
| Електричний дипольний момент | p | | |
| Струм, сила струму | I | | |
| Густина електричного струму | J | | |
| Напруженість магнітного поля | H | | |
| Магнітна індукція | B | | |
| Потік магнітний | Φ | | |
| Індуктивність власна | L | | |

| | | | |
|--|----------------|----------|--------------------------|
| Проникність магнітна абсолютна | μ_a | μ | |
| Опір електричний, резистанс | R | r | |
| Опір електричний питомий | ρ | | |
| Провідність електрична активна, кондуктанс | G | | $G = \frac{1}{R}$ |
| Провідність електрична питома, кондуктанс питомий | γ | σ | |
| Опір електричний повний, імпеданс | Z | | |
| Опір електричний реактивний, реактанс | X | x | |
| Декремент згасання коливань логарифмічний | Θ | | |
| Довжина електромагнітної хвилі | λ | | |
| Добротність | Q | | |
| Енергія електромагнітна | W | | |
| Енергія електромагнітна питома | ω | | |
| Зсув фаз між напругою та струмом | φ | | |
| Кількість витків | N | w | |
| Кількість пар полюсів | p | | |
| Кількість фаз багатофазної системи кіл | m | | |
| Коефіцієнт потужності | λ | | $\lambda = \cos \varphi$ |
| Коефіцієнт потужності при синусоїдальних напрузі та струмі | $\cos \varphi$ | | |
| Коефіцієнт трансформації трансформатора напруги | K | K_U | |
| Коефіцієнт трансформації трансформатора струму | K | K_I | |
| Період коливань електричної чи магнітної величини | T | | |
| Потужність, потужність активна | P | | |
| Потужність повна | S | P_S | |
| Потужність реактивна | Q | P_Q | |
| Стала електрична | ϵ_0 | | |
| Стала магнітна | μ_0 | | |

| | | | |
|---|-----------|----------|--|
| Частота коливань електричної чи магнітної величини | f | ν | |
| Частота коливань електричної чи магнітної величини кутова | ω | Ω | |
| Швидкість поширення електромагнітних хвиль | c | | |
| Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі | c_0 | | |
| Випромінювання | | | |
| Енергія випромінювання | Q, W | Q_e, U | |
| Потік випромінювання, потужність випромінювання | Φ, P | Φ_e | |
| Інтенсивність випромінювання | I | I_e | |
| Яскравість | L | L_e | |
| Енергетична світність | M | M_e | |
| Освітленість | E | E_e | |
| Фотометрія | | | |
| Сила світла | I | I_V | |
| Світловий потік | Φ | Φ_V | |
| Світлова енергія | Q | Q_V | |
| Яскравість | L | L_V | |
| Світність | M | M_V | |
| Освітленість | E | E_V | |

1.3. Деякі історичні аспекти виникнення одиниць фізичних величин

У давні часи вимірювання базувалися на одиницях довжини, що, як правило, ототожнювалися з назвами частин тіла людини. Наприклад, у багатьох країнах протягом кількох віків як одиницю довжини використовували: ширину великого пальця – *дюйм*, ширину чотирьох пальців без великого – *долоню*, відстань між розставленими кінцями великого і середнього пальців – *п'ядь*, відстань між кінцями великого пальця і мізинця – *велику п'ядь*, довжину ступні – *фут*, довжину ліктя – *аршин*, або *лікоть*, відстань, що дорівнює розмаху рук, – *сажень*, відстань між ступнями ніг під час руху – *крок*, відстань, яку встигає пройти людина за час, поки сходить Сонце над горизонтом (за 2 хв) – *стадій*, відстань, яку проходить людина за 1000 кроків, – *милю* тощо.

Для встановлення більшої визначеності в XIV–XVI ст. одиниці

вимірювання величин почали заміняти набором *об'єктивних* одиниць, суб'єктивно незалежних від людини. Так, за одиницю довжини брали довжину трьох приставлених одне до одного сухих зерен ячменю, вийнятих із середньої частини колоска – *законний дюйм*, ширину 64 зернин ячменю, покладених бік у бік – *фут*, довжину руки від кінця середнього пальця до кінчика носа короля Едгара (Англія – XIIст.) – *ярд*. Король Генріх I (1068–1135р.р.) узаконив постійний ярд і наказав виготовити із в'яза еталон.

У Київській Русі найпоширенішими лінійними мірами були *п'ядь, аршин, сажень, верста*.

В якості суб'єктивних одиниць площі використовували *криниця* – площа, яку можна полити з однієї криниці, *соха* – середня площа поля, обробленого за день сохою або плугом, *морген* (у німців) – площа поля, виораного за ранок.

Міра довжини епохи будівництва пірамід у Єгипті називалась *великий лікоть* або *царський лікоть*. Довжина його рівна наближено 525 мм. В цей період у Єгипті була і менша міра довжини – так званий *малий лікоть*, який був рівний 450 мм.

Одиниця для вимірювання площі називалась *арура*. Вона являла собою площу квадрата зі стороною у сто царських ліктів і була рівна 2756 м².

Одиницею об'єму був *хотен*, який представляв собою 0,5 кубічного царського ліктя.

Одиниця маси – *тен*, який дорівнює 91 г.

Необхідно відмітити, що вавилонці вперше в історії народів встановили на основі астрономічних спостережень одиниці часу: рік, місяць, година, хвилина, секунда, які існують і в наш час.

Найбільш рання спроба створення законних мір мала місце в Греції в період діяльності Солона (VI ст. до н.е.). Мірою довжини в той час в Греції був *фут*, який приблизно рівний 297 мм. Однак використання законних мір не було обов'язковим, завдяки цьому, одночасно із законними мірами використовувались інші міри, інколи з однією і тією ж назвою.

Із Греції дещо змінені практичні міри довжини, об'єму і маси були поширені на Захід і Північ.

Пізніше спроби введення мір, обов'язкових для всіх вимірювань і однакових для всієї країни, мали місце в Англії (1001, 1215р.р.), у Франції (1321р.), в Австрії (1438 р.), однак вони успіху не мали.

У Німеччині ще навіть на початку XIX століття був незвичний

хаос мір. Так, наприклад, одиниця довжини фут мала значення від 0,25 до 0,33 м, а одиниця ваги фунт від 0,46 до 0,51 кг.

Узаконені міри появились в Англії у 1494 році. Це були:

законний дюйм, який представляв собою довжину трьох приставлених один до одного ячмінних зерен; фут, який являє собою ширину 64 ячмінних зерен, покладених бік в бік. В якості одиниці маси були введені гран (маса зерна) і карат (маса насінини цератонії)

У першій половині XVIII ст. виготовляються еталони одиниць довжини і маси, а саме: у Франції еталон одиниці довжини тауз (1735 р.), в Росії еталон одиниці маси один фунт (1747 р.), в Англії у 1766 році були виготовлені одиниці довжини ярд і одиниці маси фунт. Міри довжини і маси в Англії з того часу і по сьогодні не змінювались.

Дальший розвиток лінійних одиниць вимірювання характеризувався застосуванням взаємопов'язаних одиниць. Наприклад, миля містила 1760 ярдів, ярд – 3 фути, фут – 12 дюймів. На території України, що входила до складу Російської держави, сажень містив 7 футів, або 84 дюйми, аршин – 1/3 сажня, вершок – 1/16 аршина, фут – 12 дюймів, лінія – 1/10 дюйма, точка – 1/10 лінії, верста – 500 сажнів (у даний час 1,07 км), миля – 7,49 км.

У XVIII ст. налічувалося до 400 різних за значеннями одиниць, що мали однакові назви, але вживалися в різних країнах. В Європі (XVII – XVIII ст.) спостерігався хаос щодо використовуваних мір і відповідних одиниць. Існувало близько ста футів і близько півсотні миль різних розмірів. І це значно ускладнювало внутрішні і міжнародні торгівельні відносини.

Деякі неметричні одиниці, що використовувались у Вавилоні

| Найменування одиниці та її співвідношення з іншими неметричними одиницями | Значення в одиницях СІ |
|---|------------------------|
| Одиниці довжини | |
| 1 парасанг = 30 стадій | 5882 м |
| 1 стадій (амат гагар) = 360 ліктів | 194 м |
| 1 лікоть = 20 великих пальців | 540 мм |
| 1 ступня = 12 великих пальців | 324 мм |
| 1 великий палець = 12 ліній | 27 мм |
| 1 лінія | 2,25 мм |
| Одиниці об'єму | |

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| 1 бат = 3 сатонів | 39,366 дм ³ |
| 1 сатон = 2 гнів | 13,122 дм ³ |
| 1 гін = 3 каби | 6,561 дм ³ |
| 1 каб = 4 логи | 2,187 дм ³ |
| 1 лог | 0,546 дм ³ |
| Одиниці маси | |
| 1 важкий талант | 60,6 кг |
| 1 важка міна | 1,01 кг |
| 1 важкий сикль | 16038 г |
| 1 легковажний талант | 30,3 кг |
| 1 легковажна міна | 505 г |
| 1 легковажний сикль | 8,41 г |
| Одиниці для вимірювання часу | |
| 1 рік = 12 місяців і 5 днів | 31536000 с |
| 1 місяць = 30 діб | 2592000 с |
| 1 доба = 24 годин | 86400 с |
| 1 година = 60 хвилин | 3600 с |
| 1 хвилина | 60 с |

1.4. Системи одиниць та їх становлення. Системи одиниць – попередники СІ

Історія розвитку фізичних величин дуже складна. Кожного століття в багатьох країнах Європи змінювались одиниці довжини, маси і інші одиниці. Особливо це було помітно в XVII–XVIII століттях. Ця різноманітність заважала розвитку торговельних зв'язків і промисловості, а також прогресу природничих і технічних наук.

В 1789 р. великі торгові центри Франції звернулися з проханням установити єдині міри для всієї країни. 8 травня 1790 р. Національні збори Франції прийняли декрет про реформу мір. З ініціативи французького міністра іноземних справ Ш.М. Талейрана на обговорення до Паризької академії наук був поданий офіційний запит з приводу докорінної реформи мір. Академія зацікавлено відгукнулася на це звернення і 22 серпня 1790 р. призначила особливу комісію мір і ваг у складі видатних французьких учених: Ж. Борда, Ж. Лагранжа, П. Лапласа, Ж. Кондорсе і Г. Монжа.

На пропозицію видатного математика і механіка Ж. Лагранжа Паризька академія рекомендувала встановити десяткову систему

кратних і часткових одиниць. Члени комісії запропонували взяти за одиницю довжини одну сорокамільйонну частину довжини Паризького земного меридіана. На основі цієї одиниці довжини, названої за пропозицією депутата Прійора метром (фр. *metr* від грецьк. *metron* – міра), і створювалася нова система мір, яка згодом дістала назву *метричної*.

Рекомендації Паризької академії наук були затверджені Національними зборами Франції 26 березня 1791 р. Декрет про тимчасові нові міри і ваги був прийнятий Конвентом Франції 7 квітня 1795 р.

Закон установлював основну одиницю міри довжини – *метр* – як одну десятимільйонну частину чверті Паризького меридіана і похідні міри (та їх одиниці): *ар* – площа квадрата з довжиною сторони 10 м; *стер* – об'єм деревини, що дорівнює 1 м³; *літр* – об'єм і місткість рідких і сипких тіл, рівний об'єму куба з довжиною ребра 0,1 м; *грам* – маса чистої води, що займає об'єм куба з довжиною ребра 0,01 м. При цьому вводилися десяткові кратні та частинні одиниці, утворювані за допомогою префіксів: *мірія* – (10⁴), *кіло* – (10³), *гекто* – (10²), *дека* – (10¹), *деци* – (10⁻¹), *санти* – (10⁻²) і *мілі* – (10⁻³).

Теоретичне означення одиниці лінійної довжини (*метра*) вимагало геофізичних і астрономічних вимірювань дуги Паризького меридіана від Дюнкерка до Барселони. Для кращого виконання складного завдання було створено шість спеціальних комісій, кожна з яких мала цілком визначене завдання. Найвідповідальнішим було завдання астрономів Мешена і Деламбера. Для виконання розпочатої роботи довелося встановити триангуляційну сітку з 90 трикутників уздовж вибраного меридіана. У 1798 р. роботу було закінчено, і комісія Паризької академії наук обговорила підготовлені матеріали (спостереження, обчислення) і остаточно визначила довжину істинного метра.

За дорученням комісії і під її керівництвом механік Ленуар виготовив з платини чотири еталонні лінійки – прототипи метра – завширшки близько 25 мм, завтовшки близько 3,5 мм і відстанню між кінцями в 1 м.

Після цього можна було приступати до виготовлення істинної одиниці маси – природного кілограма. Комісія у складі Траллеса, Вассалі, Кулона, Маскероні і фан-Свіндена кілограм означила як одиницю маси (до 1901 р. – як одиницю ваги) 1 дм³ чистої води за її

найбільшої густини ($t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$) в умовах вакууму. Виготовити еталон (прототип кілограма) доручили Лефевр-Жіно і Фабброні, які вміло застосували гідростатичний метод для виконання цього завдання. Враховуючи складність завдання, на допомогу цій комісії був призначений відомий механік Фортен. Нарешті прототип кілограма був виготовлений у вигляді платиногового циліндра (діаметр і висота циліндра становили 39 мм). Таким чином, Ленуар виготовив з платини плоску кінцеву лінійку, відстань між кінцями якої дорівнювала 1 м за $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, а Фортен – циліндр, маса якого відповідала 1 кг.

Українські фізики не залишили поза увагою метричну систему мір, яка повільно входила в ужиток. Так професор Г. Г. Де-Метц у грудні 1899 р. в Київському відділенні Російського технічного товариства зробив доповідь «Сторіччя метричної системи».

У липні 1916 р. метричну систему було проголошено рівноправною з російською системою мір.

Перші історичні відомості про впровадження метричної системи на території майбутньої Української держави засвідчують, що на базі невеликої Харківської палати мір і ваг, заснованої ще Д. І Менделєєвим у 1901 р., у 1922 р. було утворено *Українську головну палату мір і ваг*. У 1930 – 1933 рр. її перейменували на філію Всесоюзного науково-дослідного інституту метрології і стандартизації ім. Д. І. Менделєєва.

Вагомий внесок у поширення метричної системи зробила Українська Академія наук.

Однак метрична система не є системою одиниць в тому розумінні, яке надають цьому поняттю в наш час. В Метричну систему мір входять одиниці обмеженого числа величин – довжини, маси, часу, площі, об'єму.

Уперше загальний принцип побудови системи одиниць був сформульований відомим німецьким ученим К. Гауссом у праці «Напруженість земної магнітної сили, приведена до абсолютної міри» (1832р.). Взявши за основні одиниці міліметр (одиниця довжини), секунду (одиниця часу), міліграм (одиниця маси). К. Гаусс показав, що похідні одиниці фізичних величин можна встановити, використовуючи закономірні зв'язки між фізичними величинами. Така система механічних одиниць (ММСА) уперше запропонована італійським ученим Дж. Джорджі (у 1901 р., а потім у 1934 р.). Вона увібрала в себе більшість використовуваних одиниць фізичних

величин, включаючи електричні й магнітні вимірювання.

Спочатку Гаус за виведеною ним формулою для земного магнетизму виразив напруженість магнітного поля через основні одиниці довжини, маси і часу, а потім і інші одиниці магнітних величин через вказані ним основні одиниці - міліметр, міліграм, секунду. При цьому він вказав, що таким же чином можна виразити одиниці електричних величин. Це і зробив у 1851 році німецький фізик В. Вебер, виразивши через основні одиниці силу струму, електрорушійну силу і електричний опір.

Гаус показав, що запропонований ним метод побудови єдиної системи одиниць вимірювання дозволяє значно спростити рішення теоретичних і експериментальних задач з магнетизму.

Хоча система Гауса не отримала широкого поширення через малі розміри основних одиниць, ідеї Гауса стали все ж таки плідними.

Системи одиниць вимірювання механічних величин засновуються на фізичних рівняннях, які виражають зв'язок цих величин між собою. В результаті аналізу такої системи рівнянь можна зробити висновок про можливість побудови різних систем одиниць, у яких в якості основних вибрано або дві або три одиниці, які призначені для вимірювання різних фізичних величин.

Можна побудувати системи одиниць типу LT, у яких в якості основних вибрані одиниці довжини і часу. В залежності від вибору розміру основних одиниць можна отримати велику кількість систем одиниць цього типу. Системи типу LT не знайшли поширення, так як вони виявились менш зручними, ніж системи з трьома основними одиницями.

Найбільш досконалими системами одиниць, які у більшій мірі задовольняють розглянутим вище вимогам і умовам побудови раціональної системи одиниць, є системи типу LMT. Основними одиницями в них є одиниці довжини, маси і часу. Найбільш поширеними і загальноприйнятими системами цього типу в той час були системи СГС (сантиметр, грам, секунда) і МКС (метр, кілограм і секунда). Перша з цих систем більш зручна для проведення фізичних вимірювань і розрахунків, в той час як друга більш зручна для практичних цілей вимірювання.

У системі СГС з використанням вказаних трьох основних одиниць, встановлені похідні одиниці механічних і акустичних величин. З використанням одиниці термодинамічної температури – кельвіна – і одиниці сили світла – кандели – система СГС

поширюється на область теплових і оптичних величин.

Система **МКС** була запропонована у 1901 році італійським інженером Джорджі і вміщувала крім основних одиниць похідні одиниці механічних і акустичних величин. Шляхом додавання в якості основних одиниць термодинамічної температури кельвіна, і одиниці сили світла – кандели – систему **МКС** можна було б поширити на область теплових і світлових величин.

Система одиниць **МТС** побудована на основі системи величин **LMT**. Основні одиниці системи: метр – одиниця довжини, тонна – одиниця маси, секунда – одиниця часу. Система одиниць **МТС** була розроблена у Франції і узаконена її урядом у 1919 році.

Система одиниць **МТС** була прийнята і в колишньому СРСР і, у відповідності з державним стандартом, застосовувалась більше двадцяти років (1933 – 1955).

Одиниця маси цієї системи – тонна, що за своїм розміром виявилась зручною в ряді галузей виробництва, які мають справу з порівняно великими масами. Система одиниць **МТС** мала ряд інших переваг. По-перше, числові значення густини речовини при вираженні її, в системі **МТС** співпадали з числовими значеннями цієї величини при вираженні її в системі **СГС** (наприклад, в системі **МТС** густина заліза $7,8 \text{ т/м}^3$, а в системі **СГС** – $7,8 \text{ г/см}^3$). По-друге, одиниця роботи системи **МТС** – кілоджоуль – мала просте співвідношення з одиницею роботи системи **МКС** ($1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж}$). Але розміри одиниць переважної більшості похідних величин в цій системі виявились не зручними на практиці.

Широкого поширення в техніці отримала і так звана технічна система механічних одиниць, або інакше система **МКГСС**. Ця система побудована на основі системи величин **LFT**. Основні одиниці її: метр – одиниця довжини, кілограм-сила – одиниця сили, секунда – одиниця часу.

Кілограм-сила – це сила, рівна вазі тіла масою один кілограм при нормальному прискоренні вільного падіння $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$. Ця одиниця сили, а також деякі похідні одиниці системи **МКГСС** виявились зручними при застосуванні їх в техніці. Тому система отримала широке поширення в механіці, теплотехніці і в ряді інших галузей виробництва.

Основний недолік системи **МКГСС** – дуже обмежені її можливості застосування у фізиці. Значним недоліком системи **МКГСС** є також те, що одиниця маси в цій системі немає простого

десятькорового співвідношення з одиницями маси інших систем (1 т.о.м.= 9,81 кг).

З введенням Міжнародної системи одиниць СІ система МКГСС втратила своє значення.

До систем одиниць типу LFT належить і поширена в деяких країнах, які розмовляють англійською мовою, система ФФС (фут, фунт-сила, секунда). Аналогічно системі МКГСС в ній фут (0,3048 м), фунт-сила – вага фунта при нормальному прискоренні вільного падіння (0,45359 кгс) і секунда є основними одиницями.

Вибір систем одиниць типу LFT пояснюється тим, що найважливішою величиною в техніці, з вимірюванням якої найчастіше приходиться мати справу (крім вимірювання довжини і часу), є сила. В цих системах одиниця маси вже виявляється похідною одиницею.

З точки зору метрології системи одиниць типу LFT мають вагомий недолік, який полягає в тому, що відтворення однієї з основних одиниць цієї системи – одиниці сили – у вигляді ваги еталона в багато разів менш точно, ніж відтворення одиниці маси. Це пов'язано головним чином з тим, що вага еталона змінюється при зміні широти його місця знаходження і висоти над рівнем моря.

На основі системи СГС відомо два способи побудови системи електричних і магнітних величин: на трьох основних одиницях (сантиметр, грам, секунда) і на чотирьох основних одиницях (сантиметр, грам, секунда і одна одиниця електричної або магнітної величини).

Першим способом отримані три системи одиниць: електростатична система одиниць (система СГСЕ), електромагнітна система одиниць (система СГСМ), симетрична система одиниць (система СГС). Розглянемо ці системи. Електростатична система одиниць (система СГСЕ).

При побудові цієї системи першою похідною електричною одиницею вводиться одиниця електричного заряду з використанням закону Кулона для визначального рівняння. При цьому вважається $\epsilon_0 = 1$.

При побудові системи СГСМ першою похідною електричною одиницею вводиться одиниця сили струму з використанням закону Ампера для визначального рівняння. При цьому $\mu_0 = 1$. Всі одиниці системи СГСМ визначали за одиницею сили струму. Конгрес запропонував спеціальні назви:

а) для магнітного потоку - максвел (Мкс) на честь Дж. Максвела – англійського фізика, засновника класичної електродинаміки;

б) для магнітної індукції – гаус (Гс) на честь К.Гауса;

в) для напруженості магнітного поля – ерстед (Е) на честь датського фізика Х. Ерстеда, який встановив зв'язок між електричними і магнітними явищами в дослідах по відхиленню магнітної стрілки під дією провідника із струмом;

г) для магніторушійної сили – гільберт (Гб) на честь англійського фізика У. Гільберта, який розробив першу теорію магнітних явищ;

Симетрична система одиниць є сукупністю систем СГСЕ і СГСМ: одиниці електричних величин – одиниці системи СГСЕ, а одиниці магнітних величин - одиниці системи СГСМ.

На I міжнародному конгресі електриків (1881 р.) крім одиниць систем СГСЕ та СГСМ були прийняті практичні електричні одиниці: $1 \text{ Ом} = 10^9$ од. опору системи СГСМ; $1 \text{ В} = 10^8$ од. е.р.с. СГСМ; $1 \text{ А} = 0,1$ од. сили струму СГСМ; $1 \text{ Ф} = 10^9$ од. ел. ємності системи СГСМ. II Міжнародним конгресом електриків список практичних одиниць було доповнено: $1 \text{ Г} = 10^9$ од. індуктивності системи СГСМ, $1 \text{ Дж} = 10^7$ ерг.

Система МКСА була створена на основі системи МКС додавши до основних одиниць (метр, кілограм, секунда) одну електричну одиницю з практичної системи електричних одиниць. Цією одиницею стала одиниця сили струму – ампер.

При створенні системи СІ, ця система була використана як основна складова.

У 1961 році Міжнародним союзом чистої і прикладної фізики прийнято ще дві нові системи СГС. В одній з них – системі СГСФ – четвертою основною одиницею є одиниця електричного заряду Франклін, в якій вибирається такий заряд, який діє на рівний йому заряд, розміщений у вакуумі на відстані 1 см від першого з силою в одну дину.

У другій системі – системі СГСБ – четвертою основною одиницею вибрана електромагнітна одиниця сили струму біо. Ця одиниця сили струму рівна такій силі постійного струму, який при проходженні його в двох безкінечно довгих паралельних провідниках безкінечно малого перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 см один від одного, викликає між ними взаємодію з силою в 2 дина на 1 см довжини провідника.

Окрім вище наведених є ще **природні системи одиниць**, це такі системи в яких за основні одиниці прийняті фундаментальні фізичні сталі, такі, наприклад, як елементарний електричний заряд (заряд електрона) e , маса електрона m , постійна Планка h , швидкість світла у вакуумі c , гравітаційна стала G , постійна Больцмана k .

Таким чином, на відміну від всіх інших систем одиниць, в яких вибір основних одиниць зумовлений вимогам практики вимірювань, в природних системах розмір основних одиниць визначається явищами природи.

Вперше таку систему запропонував М. Планк (1906), вибравши в якості основних одиниць, постійну Планка h , швидкість світла у вакуумі c , гравітаційну сталу G , постійну Больцмана k .

При побудові таких систем одиниць фундаментальні сталі, вибрані в якості основних одиниць, формально покладаються рівними безрозмірній одиниці.

Крім системи Планка відомі:

Система Хартрі, яка носить назву системи атомних одиниць. До неї входять: електричний заряд (заряд протона) e , маса електрона m , постійна Планка h .

Релятивістська система одиниць, яка використовується у квантовій електродинаміці і яка містить такі одиниці: швидкість світла у вакуумі c , маса електрона m , постійна Планка h .

В 1960 р. XI Генеральна конференція з мір і ваг прийняла рішення:

- Присвоїти системі, яка ґрунтувалася на шести основних одиницях, назву «Міжнародна система одиниць»;
- Встановити міжнародну скорочену назву цієї системи SI ;
- Ввести таблиці префіксів для утворення кратних і частинних одиниць;
- Утворити 27 похідних одиниць Міжнародної системи, вказавши, що у майбутньому можуть бути додані інші похідні одиниці.

В СРСР СІ була введена з 1 січня 1963 року.

Крім кратних і часткових одиниць допускаються деякі позасистемні одиниці, як нарівні з одиницями СІ, так і тимчасово.

В теоретичній фізиці та астрономії дозволяється використовувати одиниці системи СГС, також деяку кількість позасистемних одиниць.

1.5. Міжнародна система одиниць СІ

Інтенсивний розвиток промисловості і науки, а також розширення торгівельних зв'язків між різними країнами у **XIX** столітті були основними причинами, які стимулювали створення і прогрес метрології як науки і постановку в якості основної її проблеми створення єдиної міжнародної системи одиниць, яка б охоплювала всі області вимірювань.

Вчені різних країн більше ста років працювали над створенням такої універсальної системи одиниць вимірювань, яка була б побудована з урахуванням найбільш строгих метрологічних вимог і яка була б придатна для міжнародних відносин.

Це питання розглядалося на IX (1948р.), X (1954р.) і XI (жовтень 1960р.) Генеральних конференціях з міри і ваги. На Одинадцятій генеральній конференції з міри і ваги було прийнято рішення про встановлення для міжнародних відносин практичної системи одиниць вимірювань з шістьма основними одиницями, а саме: одиниця довжини – метр, одиниця маси – кілограм, одиниця часу – секунда, одиниця температури – кельвін, одиниця сили струму – ампер, одиниця сили світла – кандела. Пізніше було введено ще одну основну одиницю – одиниця кількості речовини – моль.

Цій універсальній системі одиниць присвоєно назву «Міжнародна система одиниць вимірювань», міжнародне позначення – SI, українське – СІ.

У СІ було введено дві додаткові одиниці: одиниця плоского кута – радіан, і одиниця тілесного кута – стерадіан.

Радіан дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

Стерадіан дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, яка дорівнює радіусу сфери.

На XX Генеральній конференції з мір і ваг (1995 р. резолюція 8) радіан і стерадіан визначено як безрозмірнісні похідні одиниці, назви і позначення яких можуть (там де це зручно), але не обов'язково мають використовуватися у вираженні інших похідних одиниць СІ; таким чином клас додаткових одиниць було вилучено зі складу СІ.

1.5.1. Основні одиниці СІ

| Величина | | Одиниця СІ | | |
|----------------------------|-------------|--------------|------------|------------|
| Найменування | Розмірність | Найменування | Позначення | |
| | | | міжнародне | українське |
| Довжина | L | метр | m | м |
| Маса | M | кілограм | kg | кг |
| Час | T | секунда | s | с |
| Сила електричного струму | I | ампер | A | А |
| Термодинамічна температура | Θ | кельвін | K | К |
| Кількість речовини | N | моль | mol | моль |
| Сила світла | J | кандела | cd | кд |

Означення основних одиниць СІ

Метр дорівнював 1650763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптому – 86 (ХІ Генеральна конференція з мір та ваг, 1960 р.).

На XVII ГКМВ (1983 р.) було сформульовано і прийнято нове визначення метра, яке ґрунтується на швидкості світла з урахуванням досягнень лазерної техніки та квантової електроніки. Введення його в практику дало змогу суттєво підвищити точність лінійних вимірювань.

За цим визначенням метр дорівнював відстані, яку проходить у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за $1/299\,792\,458$ частку секунди.

Чинне (2019): Метр визначається фіксацією числового значення швидкості світла у вакуумі $c = 299\,792\,458$ в одиницях $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, де секунда визначається через частоту випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133. $L = \frac{c_0}{f}$.

Кілограм дорівнював масі міжнародного прототипу кілограма (І ГКМВ, 1889 р. і ІІІ ГКМВ, 1901 р.). До 2019 р. одиниця маси – кілограм, була прив'язана до маси циліндра зі сплаву платини та іридію, який зберігався у французькому місті Севр. Однак кілька міжнародних звірянь національних копій, виготовлених з того ж матеріалу, показали що їх маси змінюються щодо головного еталону



в діапазоні ± 50 мікрограмів за 100 років. У зв'язку з такою неточністю було ухвалено рішення «відв'язати» кілограм від матеріального носія-еталону. Тепер він буде визначатися через постійну Планка. Установка, за допомогою якої можна реалізувати новий еталон маси, має назву ваги Кіббла. У таких вагах еталоном є вантаж, який врівноважує силу відштовхування між постійним магнітом і котушкою, через яку пропускають струм. Так, масу об'єкта можна знайти за рахунок рівності електричної і механічної сил.

Завдяки новому визначенню кілограма, кожна країна зможе відтворити еталонну установку самостійно в будь-який час, не вдаючись до звірення з головним еталоном.
$$m = h \frac{f_{j1} \cdot f_{j2}}{v \cdot g}$$

Чинне (2019): кілограм визначається через сталу Планка h , яка точно дорівнює $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (Дж = $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$), та визначення метра і секунди.

Секунда дорівнювала 9192631770 періодів випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію – 133 за температури 0 К (ХІІ ГКМВ, 1967 р.).

Чинне (2019): Секунда визначається прийняттям фіксованого числового значення частоти надтонкого розщеплення основного стану атома цезію-133, що дорівнює точно 9192631770, коли вона виражена одиницею SI Гц, яка еквівалентна с^{-1} . $1 \text{ с} = 9192631770 T_{\text{Cs}}$

Ампер дорівнював силі незмінного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках

нескінченної довжини та нескінченно малого кругового поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, зумовив би на кожній ділянці провідника завдовжки 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н (ІХ ГКМВ, 1948 р.).

Чинне (2019): ампер встановлюється фіксацією числового значення елементарного електричного заряду e , коли він виражений одиницею Кл, що відповідає А·с, де секунда визначається через частоту випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133. Тепер вчені вирішили зафіксувати числове значення електричного заряду для нового визначення ампера. Елементарний електричний заряд e дорівнюватиме точно $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ (Кл). $I = ef_T$ (метод – SET – тунелювання).

Кельвін дорівнював 1/273,16 частини термодинамічної температури потрійної точки води (ХІІІ ГКМВ, 1967 р.).

Чинне (2019): кельвін визначається через встановлення фіксованого числового значення сталої Больцмана k рівним $1,380649 \cdot 10^{-23}$ в одиницях Дж·К⁻¹, або в основних одиницях SI: кг·м²·с⁻²·К⁻¹, де кілограм, метр і секунда визначаються через h , c і $\Delta\nu_{Cs}$. (h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі, $\Delta\nu_{Cs}$ – частота, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями незбуреного основного стану атома цезію ¹³³Cs).

Моль дорівнював кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці – 12 масою 0,012 кг.

При застосуванні моля структурні елементи мають бути специфіковані й можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами та іншими частинками або специфікованими групами частинок (ХІV ГКМВ, 1971 р.).

Чинне (2019): Один моль містить точно $6,02214076 \cdot 10^{23}$ формульних одиниць. Це число є фіксованим значенням сталої Авогадро (N_A), коли виражається в одиниці моль⁻¹ і називається числом Авогадро. Еталон не створюється.

Кандела дорівнює силі світла у заданому напрямку джерела, що випромінює монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого у цьому напрямку становить 1/683 Вт/ср (ХVІ ГКМВ, 1979 р.).

Чинне (2019): кандела визначається прийняттям фіксованого числового значення сили світла монохроматичного випромінювання

частотою 540×10^{12} Гц, зі світловою віддачею K_{cd} , яка дорівнює $683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$, що є еквівалентним $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{Вт}^{-1}$ або в основних одиницях SI $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^3$, де кілограм, метр і секунда визначаються через h , c і $\Delta\nu_{Cs}$ (h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі, $\Delta\nu_{Cs}$ – частота, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями незбудованого основного стану атома цезію ^{133}Cs)

1.5.2. Похідні одиниці СІ, які мають спеціальні найменування

| № п/ п | Величина | | Одиниця | | | |
|--------------|--|-------------------------|--------------|------------|------------|--|
| | Найменування | Розмірність | Найменування | Позначення | | вираз через основні |
| | | | | міжнародне | українське | |
| 1. | Частота | T^{-1} | герц | Hz | Гц | s^{-1} |
| 2. | Сила, вага | $LM T^{-2}$ | ньютон | N | Н | $м \cdot кг \cdot с^{-2}$ |
| 3. | Тиск, механічна напруга, модуль пружності | $L^{-1} M T^{-2}$ | паскаль | Pa | Па | $м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}$ |
| 4. | Енергія, робота, кількість теплоти | $L^2 M T^{-2}$ | джоуль | J | Дж | $м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}$ |
| 5. | Потужність, потік енергії | $L^2 M T^{-3}$ | ват | W | Вт | $м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$ |
| 6. | Кількість електрики (електричний заряд) | T | кулон | C | Кл | A·с |
| 7. | Електрична напруга, електричний потенціал, електрорушійна сила | $L^2 M T^{-3} I^{-1}$ | вольт | V | В | $м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot A^{-1}$ |
| 8. | Електрична ємність | $L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$ | фарад | F | Ф | $м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^4 \cdot A^2$ |
| 9. | Електричний опір | $L^2 M T^{-3} I^{-2}$ | ом | Ω | Ом | $м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot A^{-2}$ |
| 10. | Електрична провідність | $L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$ | сименс | S | См | $м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^3 \cdot A^2$ |
| 11. | Потік магнітної індукції, | $L^2 M T^{-2} I^{-1}$ | вебер | Wb | Вб | $м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot A^{-1}$ |

| | | | | | | |
|-----|--|--------------------|-----------|-----|-----|--|
| | магнітний потік | | | | | |
| 12. | Магнітна індукція, густина магнітного потоку | $MT^{-2}I^{-1}$ | тесла | T | Тл | $кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$ |
| 13. | Індуктивність, взаємна індуктивність | $L^2MT^{-2}I^{-1}$ | генрі | H | Гн | $м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$ |
| 14. | Світловий потік | J | люмен | lm | лм | кд·ср |
| 15. | Освітленість | $L^{-2}J$ | люкс | lx | лк | $м^{-2} \cdot кд \cdot ср$ |
| 16. | Активність нукліда в радіоактивному джерелі (активність радіонукліда) | T^{-1} | беккерель | Bq | Бк | $с^{-1}$ |
| 17. | Поглинута доза випромінювання, керма, показник поглинутої дози (поглинута доза іонізуючого випромінювання) | L^2T^{-2} | грей | Gy | Гр | $м^2 \cdot с^{-2}$ |
| 18. | Еквівалентна доза випромінювання | L^2T^{-2} | зіверт | Sv | Зв | $м^2 \cdot с^{-2}$ |
| 19. | Плоский кут | - | радіан | rad | рад | - |
| 20. | Тілесний кут | - | стерадіан | sr | ср | - |

1.5.3. Позасистемні одиниці, які допускаються до застосування нарівні з одиницями СІ

| Величина Найменування | Одиниця | | | |
|--------------------------|--------------|------------|-----|------------------------------|
| | Найменування | Позначення | | |
| | | міжн. | укр | Співвідношення з одиницею СІ |
| Маса | тонна | t | т | 10^3 кг |

| | | | | |
|--|-------------------------|------------------|-------------------|--|
| | атомна одиниця маси | u | а.о.м . | $\approx 1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг |
| Час | хвилина | min | хв | 60 с |
| | година | h | год | 3600 с |
| | доба | d | доба | 86400 с |
| Плоский кут | градус | ... ⁰ | ... ⁰ | $\pi/180$ рад= $1,745329 \cdot 10^{-2}$ рад |
| | хвилина | ...' | ...' | $\pi/10800$ рад |
| | секунда | ...'' | ...'' | $\pi/648000$ рад |
| | град | g(gon) | град | $\pi/200$ рад |
| Об'єм, місткість | літр | l | л | 10^{-3} м ³ |
| Довжина | астрономічна одиниця | у.а. | а.о. | $\approx 1,45598 \cdot 10^{11}$ м |
| | світловий рік | ly | св. рік | $\approx 9,4605 \cdot 10^{15}$ м |
| | парсек | pc | пк | $\approx 3,0857 \cdot 10^{16}$ м |
| Площа | гектар | ha | га | 10^4 м ² |
| Температура Цельсія, різниця температур | градус Цельсія | ⁰ С | ⁰ С | $t = T - T_0$, де $T_0 = 273,15$ К |
| Оптична сила | діоптрія | - | дптр | 1 м^{-1} |
| Енергія | електрон - вольт | eV | eВ | $\approx 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж |
| Повна потужність | вольт-ампер | V·A | В·А | - |
| Реактивна потужність | вар | var | вар | - |
| Відносна величина (безрозмірнісне відношення фізичної величини до однойменної фізичної величини, взятої за вихідну: ККД, масова частка) | процент | % | % | 10^{-2} |
| | проміле | ‰ | ‰ | 10^{-3} |
| | мільйонна частка | ppm | млн ⁻¹ | 10^{-6} |

| | | | | |
|--|---------|-----|-----|--|
| Логарифмічна величина (логарифм безрозмірного відношення фізичної величини до однойменної фізичної величини, взятої за вихідну: рівень звукового тиску, підсилення, послаблення) | бел | В | Б | 1 Б= $\lg(P_2/P_1)$ при $P_2=10 \cdot P_1$ (для енергетичних од.) 1 Б = $2 \cdot \lg(F_2/F_1)$ при $F_2= \sqrt{10} F_1$ (для “силових” величин: тиск, напруга, сила струму) |
| | децибел | дВ | дБ | 0,1 Б |
| Частотний інтервал | октава | - | окт | 1 окт = $\log_2(f_2/f_1)$ при $f_2=2 \cdot f_1$ |
| | декада | - | дек | 1 дек = $\lg(f_2/f_1)$ при $f_2=10 \cdot f_1$ |
| Кількість інформації | біт | bit | біт | 1 біт – кількість інформації, яка отримується при здійсненні однієї з двох рівно імовірних подій |

1.5.4. Одиниці, що тимчасово допускаються до використання

| Назва величини | Одиниця | | | Співвідношення з одиницями SI | Галузь переважного застосування |
|-------------------|----------------------------------|-------------|-------------|---|---|
| | Назва | Позначення | | | |
| | | укр. (рос.) | міжн. | | |
| Довжина | морська миля миля ангстрем | миля Å | n.mile Å | 1 миля = 1852 м 1 Å = 10 ⁻¹⁰ м | Морська навігація Оптика |
| Площа | ар гектар | а га | а ha | 1 а = 10 ² м ² 1 га = 10 ² а = 10 ⁴ м ² | Сільське господарство |
| Швидкість | вузол | вуз (уз) | kn | 1 вуз = 1 миля/год = 0,514(4) м/с | Морська навігація |
| Тиск | бар | бар | bar | 1 бар = 10 ⁵ Па | Винятково для вираження тиску |
| Активність | кюрі | Ki(Ки) | Сi | 1 Ки = 3,7 · 10 ¹⁰ Бк | Атомна та ядерна фізика |
| Поглинута доза | рад | рад | rad | 1 рад = 10 ⁻² Гр | Радіаційна фізика та медична радіологія |
| Еквівалентна доза | рем | рем (бер) | rem | 1 рем = 10 ⁻² Зв | Те саме |
| Експозиційна доза | рентген | R | R | 1 Р = 2,58 · 10 ⁻⁴ Кл/кг | Те саме |

1.6. Одиниці системи СГС, що мають власне найменування, та інші одиниці, які використовуються у фізиці

| Величина | Одиниця | | | Співвідношення з одиницею SI |
|--------------|-------------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| | Найменування | Позначення | | |
| | | міжн. | укр. | |
| Довжина | ангстрем | Å | Å | 10 ⁻¹⁰ м |
| | мікрон | μ | мк | 10 ⁻⁶ м |
| | ікс-одиниця | X | ікс-од. | ≈ 1,00206 · 10 ⁻¹³ м |
| Площа | барн | b | б | 10 ⁻²⁸ м ² |
| Тілесний кут | квадратний градус | □ ⁰ | □ ⁰ | 3,0462... · 10 ⁻⁴ ср |
| Прискорення | гал | Gal | Гал | 0,01 м/с ² |
| Сила, вага | дина | dyn | дин | 10 ⁻⁵ Н |

| | | | | |
|--|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---|
| | кілограм-сила | kgf | кгс | 9,80665 Н |
| | понд | p | – | $9,80665 \cdot 10^{-3}$ Н |
| Тиск | кілограм-сила на квадратний сантиметр | kgf/cm ² | кгс/см ² | 98066,5 Па |
| | міліметр водяного стовпа | mm H ₂ O | мм вод. ст. | 9,80665 Па |
| | міліметр ртутного стовпа | mm Hg | мм рт. ст. | 133,322 Па |
| | тор | Torr | | 133,322 Па |
| | фізична атмосфера | atm | атм | 101325 Па |
| | технічна атмосфера | at | ат | 98066,5 Па |
| Напруга (механічна) | кілограм-сила на квадратний міліметр | kgf/mm ² | кгс/мм ² | $9,80665 \cdot 10^6$ Па |
| Робота, енергія | ерг | erg | ерг | 10^{-7} Дж |
| Потужність | кінська сила | – | к.с. | 735,499 Вт |
| Динамічна в'язкість | пуаз | P | П | 0,1 Па·с |
| Кінематична в'язкість | стокс | St | Ст | 10^{-4} м ² /с |
| Кількість теплоти, термодинамічний потенціал (внутрішня енергія, ентальпія), теплота фазового перетворення | калорія (міжнар.) | cal | кал | 4,1868 Дж |
| | калорія (термохімічна) | cal _{th} | кал _{тх} | 4,1840 Дж |
| | калорія 15-градусна | cal ₁₅ | кал ₁₅ | 4,1855 Дж |
| Електричний заряд, кількість електрики | одиниця СГС | – | – | $10/c$ * Кл = $333,564 \cdot 10^{-12}$ Кл |
| Сила електричного струму | одиниця СГС | – | – | $10/c$ А = $=333,564 \cdot 10^{-12}$ А |
| Електрична напруга, потенціал, різниця потенціалів, ЕРС. | одиниця СГС | – | – | $10^{-8} \cdot c$ В = $=299,7925$ В |

| | | | | |
|--|-------------|-----|-----|---|
| Напруженість електричного поля | одиниця СГС | – | – | $10^{-6} \cdot c \text{ В/м} = 29979,25 \text{ В/м}$ |
| Електрична ємність | одиниця СГС | см | см | $10^9/c^2 \text{ Ф} = 1,11265 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ |
| Електричний опір | одиниця СГС | – | – | $10^{-9}c^2 \text{ Ом} = 898,755 \cdot 10^9 \text{ Ом}$ |
| Електрична провідність | одиниця СГС | – | – | $10^9/c^2 \text{ См} = 1,11265 \cdot 10^{-12} \text{ См}$ |
| Магнітний потік | максвел | Мх | Мкс | 10^{-8} Вб |
| Магнітна індукція | гаусс | Gs | Гс | 10^{-4} Тл |
| Магніторушійна сила, різниця магнітних потенціалів | гільберт | Gb | Гб | $10/(4\pi) \text{ А} = 0,795775... \text{ А}$ |
| | ампервиток | At | ав | 1 А |
| Напруженість магнітного поля | ерстед | Oe | Е | $10^3/(4\pi) \text{ А/м} = 79,5775... \text{ А/м}$ |
| Індуктивність | одиниця СГС | – | – | 10^{-9} Гн |
| Освітленість | фот | ph | фот | 10^4 лк |
| Яскравість | стільб | sb | сб | 10^4 кд/м^2 |
| | ніт | nt | нт | 1 кд/м ² |
| Активність нукліда у радіоактивному джерелі | кюрі | Ci | Кі | $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ |
| Експозиційна доза випромінювання | рентген | R | Р | $2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ |
| Поглинута доза випромінювання | рад | rad | рад | 0,01 Гр |
| Еквівалентна доза випромінювання | бер | rem | бер | 0,01 Зв |

* c- швидкість світла у вакуумі в см/с

1.7. Деякі старі українські й російські неметричні одиниці

| Найменування одиниці та її співвідношення з іншими неметричними одиницями | Значення в метричних одиницях |
|---|-------------------------------|
| Одиниці довжини | |
| 1 верста = 500 сажням = 1500 аршинам | 1066,80 м |
| 1 сажень = 3 аршинам = 7 футам | 2,13360 м |
| 1 аршин = 16 вершкам = 28 дюймам | 71,120 см |

| | |
|--|-------------------------------------|
| 1 вершок = 1,75 дюйма | 4,4450 см |
| 1 фут = 12 дюймам | 30,480 см |
| 1 дюйм = 10 лініям | 25,4 мм |
| 1 лінія = 10 точкам | 2,54 мм |
| 1 точка | 0,254 мм |
| Одиниці площі | |
| 1 квадратна верста | 1,138062 км ² |
| 1 десятина = 2400 кв. сажням | 10925,4 м ² = 1,09254 га |
| 1 квадратний сажень | 4,55225 м ² |
| 1 квадратний аршин | 0,505805 м ² |
| 1 квадратний вершок | 19,7580 см ² |
| 1 квадратний фут | 929,030 см ² |
| 1 квадратний дюйм | 6,45160 см ² |
| 1 квадратна лінія | 6,45160 мм ² |
| Одиниці об'єму | |
| 1 кубічний сажень = 27 квадратних аршинів | 9,71268 м ³ |
| 1 кубічний аршин | 0,35972 м ³ |
| 1 кубічний вершок | 87,8244 см ³ |
| 1 кубічний фут | 0,0283168 м ³ |
| 1 кубічний дюйм | 16,38706 см ³ |
| 1 кубічна лінія | 16,387 мм ³ |
| Одиниці місткості для рідин | |
| 1 бочка = 40 відер = 491,91 л | 0,5 м ³ |
| 1 відро = 12,29941 л | 12,29941 дм ³ |
| 1 чверть (відра) | 3,07485 дм ³ |
| 1 штоф = 0,1 відра | 1,229941 дм ³ |
| 1 винна пляшка = 1/16 відра | 0,7687129 дм ³ |
| 1 горілчана пляшка = 1/20 відра | 0,6149703 дм ³ |
| 1 чарка = 1/5 горілчаної пляшки = 0,01 відра | 122,9941 см ³ |
| 1 шкалик = 1/2 чарки = 0,1 горілчаної пляшки | 61,497 см ³ |
| Одиниці місткості для сипких тіл | |
| 1 четверть = 8 четверикам = 64 гарнцям | 209,9099 дм ³ |
| 1 четверик = 8 гарнцям | 26,23873 дм ³ |
| 1 гарнець | 3,279842 дм ³ |
| Одиниці маси | |

| | |
|------------------------------------|---------------|
| 1 берковець = 10 пудів | 163,804964 кг |
| 1 пуд = 40 фунтів | 16,3804964 кг |
| 1 фунт = 32 лотам = 96 золотникам | 409,51241 г |
| 1 лот = 3 золотникам | 12,7972628 г |
| 1 золотник = 96 доль | 4,26575 г |
| 1 доля | 44,435 мг |
| 1 карат (для дорогоцінних каменів) | 0,2053 г |

Сталою мірою був «корець» (96 кг). На Гуцульщині йому відповідав «кобельчи» («кобель»), що поділявся на чотири «фердилі», а останній, у свою чергу, – на чотири «патралиці» (8 л).

1.8. Деякі неметричні одиниці, що використовуються в Англії та США

| Найменування одиниці та її співвідношення з іншими неметричними одиницями | Значення в метричних одиницях |
|---|-------------------------------|
| Одиниці довжини | |
| 1 морська ліга (міжн.) = 3 морські милі (міжн.) | 5559,52 м |
| 1 ліга законна (США) = 3 милі законні | 4828,0 м |
| 1 морська миля (міжн.) = 10 кабельтов | 1852 м (точно) |
| 1 миля законна (США) = 1760 ярдів | 1609,344 м |
| 1 фарлонг | ≈ 201,17 м |
| 1 кабельтов (міжн.) | 185,2 м |
| 1 ярд = 3 фути | 0,9144 м |
| 1 фут = 12 дюймів | 30,48 см |
| 1 дюйм | 25,4 мм |
| 1 велика лінія | 2,54 мм |
| 1 мала лінія | 2,117 мм |
| Одиниці площі | |
| 1 квадратна миля = 640 акрів | ≈ 2,590 км ² |
| 1 акр = 4840 квадратних ярдів | ≈ 4047 м ² |
| 1 квадратний ярд = 9 квадратних футів | ≈ 0,836 м ² |
| 1 квадратний фут = 144 квадратних дюйми | ≈ 0,0929 м ² |
| 1 квадратний дюйм | ≈ 6,452 см ² |
| 1 квадратна лінія (велика) | ≈ 6,452 мм ² |
| Одиниці об'єму | |
| 1 кубічний ярд = 27 кубічних футів | ≈ 0,7646 м ³ |
| 1 кубічний фут = 1728 кубічних дюймів | ≈ 0,02832 м ³ |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1 кубічний дюйм | $\approx 16,387 \text{ см}^3$ |
| Одиниці місткості для рідин | |
| 1 барель нафтова (США) | $\approx 159 \text{ дм}^3$ |
| 1 галон (англ.) = 4 кварта = 8 пінтам | $\approx 4,546 \text{ дм}^3$ |
| 1 кварта (англ.) = 2 пінти | $\approx 1,136 \text{ дм}^3$ |
| 1 пінта (англ.) | $\approx 0,568 \text{ дм}^3$ |
| 1 галон (США) = 4 кварта (США) | $\approx 3,785 \text{ дм}^3$ |
| 1 кварта рідинна (США) = 2 пінти (США) | $\approx 0,946 \text{ дм}^3$ |
| 1 пінта рідинна (США) | $\approx 0,473 \text{ дм}^3$ |
| Одиниці місткості для сипких тіл | |
| 1 барель суха (США) | $\approx 115,6 \text{ дм}^3$ |
| 1 бушель (англ.) = 8 галонів (англ.) | $\approx 36,37 \text{ дм}^3$ |
| 1 бушель (США) = 64 пінтам | $\approx 35,24 \text{ дм}^3$ |
| 1 галон сухий (США) | $\approx 4,4 \text{ дм}^3$ |
| 1 кварта суха (США) | $\approx 1,1 \text{ дм}^3$ |
| 1 пінта суха (США) | $0,551 \text{ дм}^3$ |
| Одиниці маси | |
| 1 тонна (довга) = 2240 фунтів | $\approx 1016 \text{ кг}$ |
| 1 тонна (коротка) = 2000 фунтів | $\approx 907 \text{ кг}$ |
| 1 центнер (довгий) = 112 фунтів | $\approx 50,80 \text{ кг}$ |
| 1 центнер (короткий) = 100 фунтів | $\approx 45,36 \text{ кг}$ |
| 1 фунт = 16 унцій | $\approx 453,59 \text{ г}$ |
| 1 торгова унція (унція) = 16 драхм | $\approx 28,35 \text{ г}$ |
| 1 тройська унція = 1 аптекарській унції = 480 гранам | $\approx 31,1035 \text{ г}$ |
| 1 драхма (англ.) | $\approx 1,772 \text{ г}$ |

1.9. Десяткові кратні та частинні одиниці

Для утворення десяткових кратних і частинних одиниць використовується ряд множників, що дорівнюють 10^n , де n – ціле додатне або від'ємне число, і префіксів до найменувань одиниць, по одній для кожного множника. Цей спосіб, який був уперше прийнятий ще під час створення метричної системи мір, дає змогу легко переводити числові значення величин при переході від одиниць СІ до кратних і частинних від них або від одних кратних і частинних одиниць до інших.

Додаткові множники, префікси, їх найменування та позначення для кратних і частинних одиниць SI, уведені ДСТУ 3651. 0-97

| Множ- ник | Префікс | Символ | | Множ- ник | Префікс | Символ | |
|--------------|---------|--------|------|--------------|---------|--------|------|
| | | міжн. | укр. | | | міжн. | укр. |
| 10^{24} | йота | Y | Й | 10^{-1} | деци | d | д |
| 10^{21} | зета | Z | ЗТ | 10^{-2} | санти | с | с |
| 10^{18} | екса | E | Е | 10^{-3} | мілі | m | м |
| 10^{15} | пета | P | П | 10^{-6} | мікро | μ | мк |
| 10^{12} | тера | T | Т | 10^{-9} | нано | n | н |
| 10^9 | гіга | G | Г | 10^{-12} | піко | p | п |
| 10^6 | мега | M | М | 10^{-15} | фемто | f | ф |
| 10^3 | кіло | k | к | 10^{-18} | атто | a | а |
| 10^2 | гекто | h | г | 10^{-21} | зепто | z | зп |
| 10^1 | дека | da | да | 10^{-24} | йокто | y | й |

Примітка. Одиниці часу (хвилину, годину, добу), плоского кута (градус, хвилину, секунду), астрономічну одиницю, світловий рік, діоптрію та атомну одиницю маси не допускається застосовувати з префіксами.

При утворенні десяткових кратних і частинних одиниць слід керуватися певними правилами, встановленими стандартом.

1. Не допускається приєднання до найменування одиниці двох або більше префіксів підряд. Наприклад, замість найменування одиниці мікромікрофарад слід вживати пікофарад.

2. Префікс або його позначення слід писати разом з найменуванням одиниці, до якої він приєднується, або відповідно з його позначенням.

3. Якщо одиницю утворено як добуток або відношення одиниць, то префікс слід приєднувати до найменування першої одиниці, що входить до добутку або до відношення.

Правильно: кілопаскаль-секунда на метр (кПа s/m; кПа с/м).

Неправильно: Паскаль-кілосекунда на метр (Па ks/m; Па кс/м).

4. Допускається застосовувати, префікс в другому множнику добутку або в знаменнику лише в обґрунтованих випадках, коли такі одиниці дуже поширені. Наприклад, тонна-кілометр (t km; т км); ват на квадратний сантиметр (W/cm², Вт/см²); вольт на сантиметр (V/cm, В/см); ампер на квадратний міліметр (A/mm², А/мм²).

5. Найменування кратних і частинних одиниць від одиниці, піднесеної до степеня, слід утворювати приєднанням префікса до найменування вихідної одиниці. Наприклад, кратною або частинними одиницями від одиниці площі – квадратного метра – будуть квадратний кілометр, квадратний дециметр, квадратний сантиметр, квадратний міліметр і т. д.

6. Позначення кратних і частинних одиниць від одиниці, піднесеної до степеня слід утворювати доданням відповідного показника степеня до позначення кратної або частинної від цієї одиниці, при цьому показник означає піднесення до степеня кратної або частинної одиниці разом з префіксом. Наприклад:

а) $5 \text{ км}^2 = 5(10^3 \text{ м})^2 = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^2$;

б) $250 \text{ см}^3/\text{с} = 250(10^{-2} \text{ м})^3/(1 \text{ с}) = 250 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$;

в) $0,002 \text{ см}^{-1} = 0,002(10^{-2} \text{ м})^{-1} = 0,002 \cdot 100 \text{ м}^{-1} = 0,2 \text{ м}^{-1}$.

7. Вибір десяткової кратної або частинної одиниці від одиниці СІ диктується насамперед зручністю її застосування. З різних кратних і частинних одиниць, що можуть бути утворені за допомогою префіксів, вибирають таку, щоб числові значення величини лежали в межах від 0,1 до 1000.

8. Як десяткові кратні та частинні одиниці від основних і похідних одиниць СІ рекомендуються такі:

| Одиниці СІ | Позначення | | Десяткові кратні та частинні від одиниць СІ |
|------------|------------|------------|---|
| | міжнародн | українське | Позначення |
| Найменуван | | | Міжнародні/українські |
| Метр | m | м | km; cm; mm; μm ; nm; μm ; км; см; мм; мкм; нм; пм; |
| Кілограм | kg | кг | g; mg; μg . г; мг; мкг |
| Секунда | s | с | ks; ms; μs ; ns кс; мс; мкс; нс |
| Ампер | A | А | kA; mA; μA ; nA кА; мА; мкА; нА |
| Кельвін | K | К | MK; kK; mK; μK МК; кК; мК; мкК |
| Моль | mol | моль | kmol; mmol; μmol кмоль; ммоль; мкмоль |

| | | | |
|-----------|-----|-----|-----------------|
| Кандела | cd | кд | |
| Радіан | rad | рад | mrad; μ rad |
| | | | мрад; мкрад |
| Стерадіан | sr | ср | |

9. Для зменшення імовірності помилок при розрахунках десяткові кратні та частинні одиниці рекомендується підставляти тільки в кінцевий результат, а під час розрахунків усі величини слід виражати в одиницях СІ, замінюючи префікси степенями числа 10.

1.10. Правила написання найменувань одиниць

1. Найменування одиниць, які входять у добуток, з'єднуються дефісом (короткою рисочкою). Наприклад, ньютон-метр, джоуль на кілограм-кельвін та ін.

2. Дефіс застосовується також у складних словах для найменування одиниць сили, складовими частинами яких є кілограм, грам, тонна та ін. і слово «сила». Наприклад, кілограм-сила, грам-сила, тонна-сила тощо.

Для найменування добутку двох одиниць не допускається застосовувати сполучну голосну. Наприклад: правильно – кілограм-метр, ньютон-метр, а неправильно – кілограмометр, ньютонometr.

2. Якщо похідна одиниця є дробом, то в найменуванні цієї одиниці слід перед першою одиницею в знаменнику вживати прийменник «на». Наприклад: метр на секунду в квадраті, радіан на секунду в квадраті, ампер на метр, кандела на квадратний метр та ін.

Це правило не поширюється на одиниці фізичних величин, які залежать від часу в першому степені і характеризують швидкість проходження процесу: для цих одиниць слід перед одиницею часу, що стоїть у знаменнику, вживати прийменник «за». Наприклад: метр за секунду, радіан за секунду, Грей за секунду та ін.

3. У найменуваннях одиниць площі й об'єму, а також у найменуваннях складних похідних одиниць, в які входять одиниці площі й об'єму, слід застосовувати прикметники «квадратний» і «кубічний».

Якщо у найменуваннях одиниць входять другий або третій степені довжини, які не є одиницями площі або об'єму, то слід використовувати вирази у квадраті (або у другому степені) й у кубі (або у третьому степені) замість прикметників «квадратний» або «кубічний». Наприклад: квадратний метр, квадратний кілометр,

кубічний метр, кубічний дециметр, кандела на квадратний метр, але кілограм метр у квадраті (момент інерції).

4. У найменуваннях складних похідних одиниць, які є добутком кількох одиниць, слід відмінювати лише найменування останньої одиниці та прикметник «квадратний» або «кубічний», який стосується її. Наприклад: питомий електричний опір міді дорівнює $1,7 \cdot 10^{-8}$ ом·метрів; магнітний момент виражається в ампер-квадратних метрах; момент інерції маховика дорівнює 73 кілограм – метрам у квадраті.

5. При відмінюванні найменувань складних похідних одиниць, які є дробом, слід змінювати лише найменування останньої одиниці чисельника та прикметник «квадратний» або «кубічний», який стосується її, залишаючи без зміни знаменник. Наприклад: прискорення в метрах на секунду в квадраті; питома теплоємність у джоулях на кілограм – кельвін; густина електричного струму в амперах на квадратний метр та ін.

1.11. Нормативи і правила написання та застосування позначень одиниць

Позначення одиниць фізичних величин слід застосовувати відповідно до позначень одиниць, які наведено у стандарті.

Крім установлення одиниць та їх позначень, він дає перелік правил написання позначень одиниць і вказівки щодо їх практичного використання.

Нижче наводяться вибірково деякі з цих правил і вказівок.

1. При написанні значень величин застосовуються позначення одиниць літерами та спеціальними знаками (...⁰, ...', ..."), причому встановлено два види літерних позначень одиниць: міжнародні (з використанням літер латинського і грецького алфавітів) та державні (з використанням літер російського або українського алфавітів).

Міжнародні та державні позначення відносних і логарифмічних одиниць такі: відсоток (сота частка) – %; проміле (тисячна частка) – ‰; мільйонна частка – ppm (млн⁻¹); бел – В(Б) та ін.

2. Позначення одиниць слід застосовувати після числових значень величин і поміщати їх в одному рядку (без перенесення всього або частини позначення в наступний рядок).

Між останньою цифрою числа і позначенням одиниці слід лишати пропуск.

Наведемо приклади правильних і неправильних записів позначень фізичних величин.

Правильно: 100 kW; 100 кВт; 80 %; 20 °C.

Неправильно: 100kW; 100кВт; 80%; 20° C.

Винятки становлять позначення кутів у вигляді знаків, піднятих над рядком (...°, ...', ..."), які записуються без пропусків.

Правильно: 20°; 15'; 60".

Неправильно: 20 °; 15 ' ; 60 " .

3. Якщо числове значення величини є десятковим дробом, то позначення одиниці слід записувати після усіх цифр.

Правильно: 423,06 м; 5,758°; 5°45,48', 5°45'28,8".

Неправильно: 423м,06; 5°,758; 5°45',48; 5°45'28",8.

4. Стандартом не допускається поміщати позначення одиниць в один рядок з формулою, що виражає залежність між величинами. При необхідності пояснень величин у формулі запис їх виконується окремо.

Правильно: $v = \frac{3,6s}{t}$,

де v – швидкість, м/с; s – шлях, м; t – час, с.

Неправильно: $v = \frac{3,6s}{t}$ м/с, де s – шлях у м; t – час у с.

5. Літерні позначення одиниць, які входять у добуток, слід відокремлювати крапками на середній лінії як знаками множення.

Правильно: N·m, Н·м ; A·m², А·м²; Pa·s, Па·с.

Неправильно: Nm, Нм; Am², Ам²; Pas, Пас.

6. У літерних позначеннях відношень одиниць як знак ділення має застосовуватися лише одна похила або горизонтальна риска. Допускається використовувати позначення одиниць у вигляді добутку позначень одиниць, піднесених до степенів (додатних і від'ємних).

Примітка. Якщо для однієї з одиниць, що входять до відношення, встановлено позначення у вигляді від'ємного степеня (наприклад, с⁻¹, м⁻¹, К⁻¹), то застосовувати похилу або горизонтальну риску не допускається.

Правильно: W · m⁻² · K⁻¹, Вт · м⁻² К⁻¹; $\frac{W}{m^2 \cdot K}$, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

Неправильно: W/m²/K, Вт/м²/К; $\frac{W}{m^2}$, $\frac{Вт}{м^2}$.

7. При використанні похилої rischi позначення одиниць у чисельнику та знаменнику слід поміщати в рядок, добуток позначень одиниць у знаменнику необхідно брати в дужки.

Правильно: $m/s, m/c; W/(m \cdot K), Вт/(m \cdot K)$.

Неправильно: $m/s, m/c; W/m \cdot K, Вт/m \cdot K$.

8. При використанні похідної одиниці, що складається з двох і більше одиниць, не допускається комбінувати літерні позначення та найменування одиниць, тобто для одних одиниць наводити позначення, а для інших – найменування.

Правильно: $1,05 \text{ кг/м}^3; 9,8 \text{ м/с}^2; 80 \text{ кілометрів за годину}$.

Неправильно: $1.05 \text{ кг/куб. м}; 9,8 \text{ м/сек}^2; 80 \text{ кілометрів за год}; 80 \text{ км за годину}$.

9. У кінці позначень одиниць не можна вживати крапку як знак скорочення, за винятком випадків скорочення слів, як входять у найменування одиниці, але самі не є найменуваннями одиниці.

Правильно: $745 \text{ мм рт. ст.}; 120 \text{ мм вод. ст.}$

Неправильно: $745 \text{ мм. рт. ст.}; 120 \text{ мм. вод. ст.}$

1.12. Пам'ятка вчителю для правильного використання назв, позначень і означень фізичних величин та їх одиниць

1. Не застосовуйте слово «величина» для вираження кількісної характеристики фізичного об'єкта. Не варто казати: величина маси, величина швидкості. Оскільки маса і швидкість є величинами.

2. Не змішуйте терміни: розмірність фізичної величини, позначення фізичної величини, одиниця фізичної величини.

Наприклад

| Фізична величина | Позначення фізичної величини | Розмірність фізичної величини | Найменування одиниці фізичної величини | Позначення одиниці фізичної величини |
|------------------|------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------------|
| швидкість | v | $L T^{-1}$ | метр за секунду | m/c |

Не називайте одиницю фізичної величини та її позначення розмірністю фізичної величини. Не кажіть, що розмірність швидкості метр за секунду. Запам'ятайте, що розмірність являє собою характеристику фізичної величини у формі степеневого одночлена з коефіцієнтом рівним одиниці. Він виражає зв'язок фізичної величини з основними величинами даної системи. Розмірність друкується

великими буквами, прямим шрифтом. Розмірність безрозмірних відносних величин рівна 1.

3. Розрізняють два види рівнянь зв'язку: рівняння зв'язку між фізичними величинами (більшість рівнянь фізики) і рівняння зв'язку між числовими значеннями величин. В цих рівняннях є коефіцієнти:

$$\text{рівні одиниці} - p = \frac{F}{S};$$

$$\text{безрозмірні коефіцієнти} - S = \pi \cdot R^2;$$

розмірні коефіцієнти, які є, як правило, фундаментальними сталими – $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$.

У цих рівняннях зв'язку розмірність правої та лівої частин рівняння співпадають.

У рівняннях зв'язку між числовими значеннями величин коефіцієнти – це безрозмірні числа і їх значення залежать від вибору одиниць, в яких виражені величини.

$$M = 10^{-3} \cdot M_r, M \text{ у кг/моль.}$$

4. Не використовуйте в якості найменувань фізичних величин геометричні поняття «поверхня», «переріз» з вираженням їх в одиницях площі. Правильне найменування величин «площа поверхні», «площа перерізу».

5. Не дозволяється використовувати такі найменування фізичних величин, як сила ваги, сила тиску, об'єм маси та інше, оскільки вони являють собою величину величини.

6. У зв'язку з тим, що фізична величина – первинне поняття, а одиниця фізичної величини – вторинне поняття і фізична величина не залежить від одиниць, тому не слід використовувати такі найменування фізичних величин, у які входили б одиниці їх вимірювання.

Наприклад: правильно: густина газу, кг/м³; неправильно маса 1 м³ газу, кг.

7. Не називайте концентрацією величину, рівну відношенню маси компонента до маси суміші, розчину. В цих випадках використовуйте термін «масова частка» і виражайте їх одиниці в одиницях відносних величин (1, %, ‰, млн⁻¹).

8. Масовою концентрацією називається величина, яка рівна відношенню маси одного компонента до повного об'єму суміші, розчину і виражається у кілограмах на кубічний метр або у грамах на літр (у хімії).

9. Молярною концентрацією називається величина, яка рівна відношенню кількості речовини компонента до повного об'єму суміші, розчину і виражається у (моль/м³, моль/л).

10. Не використовуйте поняття «мольний» замість «молярний» (молярна маса).

11. Не використовуйте терміни «число Авогадро», «число Фарадея» замість «стала Авогадро», «стала Фарадея». Під числами Авогадро та Фарадея розуміють числові значення цих сталих.

12. Не використовуйте терміни «точка роси», «потрійна точка води» з вираженням їх в одиницях температури замість правильних найменувань «температура точки роси», «температура потрійної точки води».

13. Запам'ятайте, що в даний час не використовують виразів: шкала Цельсія, шкала Кельвіна. Допускається використання двох температурних шкал: Міжнародної 1990 р. (МТШ-90) з градуванням у градусах Цельсія і термодинамічної з градуванням у кельвінах.

14. Не використовуйте слово «коефіцієнт» перед найменуваннями таких величин: теплопровідність, динамічна в'язкість, кінематична в'язкість, поверхневий натяг.

15. Не використовуйте термін «видиме світло», оскільки під світлом розуміють видиме випромінювання.

16. Не використовуйте термін «точність» замість абсолютна похибка і відносна похибка. Точність – це величина обернена до відносної похибки вираженої в частинах, а тому вона більша за одиницю.

17. Не використовуйте термін «одиниця вимірювання сили» замість «одиниця сили».

18. Не використовуйте град або ...⁰ в якості позначення одиниць температури замість °С, не кажіть 20 градусів холоду або 20 градусів нижче нуля замість –20 °С.

1.13. Фундаментальні фізичні сталі

| Назва величини | Позначення | Значення величини |
|----------------------------|--------------|---|
| Гравітаційна стала | G | $(6,672\ 59 \pm 0,000\ 85) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ |
| Швидкість світла у вакуумі | c | $299\ 792\ 458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ |
| Магнітна стала* | μ_0 | $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,566\ 370\ 614 \dots \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ |
| Електрична стала | ϵ_0 | $8,854187817 \dots \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ |

| | | |
|--|------------|---|
| Стала Планка | h | $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| Стала Дірака | \hbar | $(1,054572\ 66 \pm 0,00000063) \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| Маса спокою електрона | m_e | $(9,1093897 \pm 0,0000054) \cdot 10^{-31}$ кг |
| Маса спокою протона | m_p | $(1,6726231 \pm 0,0000010) \cdot 10^{-27}$ кг |
| Маса спокою нейтрона | m_n | $(1,6749286 \pm 0,0000010) \cdot 10^{-27}$ кг |
| Елементарний заряд | e | $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Відношення заряду електрона до його маси | e/m_e | $(-1,75881962 \pm 0,00000053) \cdot 10^{11}$ Кл·кг ⁻¹ |
| Класичний радіус електрона | r_e | $(2,81794092 \pm 0,00000038) \cdot 10^{-15}$ м |
| Борівський радіус | a_0 | $(0,529177249 \pm 0,000000024) \cdot 10^{-10}$ м |
| Атомна одиниця маси (уніфікована)** | $a.o.m.$ | $(1,6605402 \pm 0,0000010) \cdot 10^{-27}$ кг |
| Стала Авогадро | N_A | $6,02214076 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹ |
| Стала Фарадея | F | $(96\ 485,309 \pm 0,029)$ Кл·моль ⁻¹ |
| Стала Лошмідта | n_0 | $(2,686763 \pm 0,000023) \cdot 10^{25}$ м ⁻³ |
| Універсальна (молярна)** газова стала | R | $(8,314510 \pm 0,000070)$ Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹ |
| Молярний об'єм ідеального газу за нормальних умов ($T=273,15$ К, $p = 101\ 325$ Па) | V_m | $(22,41410 \pm 0,00019) \cdot 10^{-3}$ м ³ /моль |
| Стала Больцмана | k | $1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К |
| Стала Стефана — Больцмана | σ | $(5,67051 \pm 0,00019) \cdot 10^{-8}$ Вт·м ⁻² ·К ⁻⁴ |
| Стала у законі зміщення Віна | b | $(2,897756 \pm 0,000024) \cdot 10^{-3}$ м·К |
| Перша стала випромінення | c_1 | $(3,7417749 \pm 0,0000022) \cdot 10^{-16}$ Вт·м ⁻² |
| Друга стала випромінення | c_2 | $(0,01438769 \pm 0,00000012)$ м·К |
| Стала Рідберга | R_∞ | $(10\ 973\ 73\ 1,534 \pm 0,013)$ м ⁻¹ |

* точність визначається числом π .

** наведене в дужках слово є необов'язковим до застосування.

1.13.1 Фізичний зміст та методи визначення універсальних фізичних сталих

Гравітаційна стала G - це фундаментальна фізична константа, яка входить в закон всесвітнього тяжіння. Вона чисельно рівна силі, з якою взаємодіють дві матеріальні точки масами 1 кг кожна, що знаходяться на відстані 1 м одна від одної. Числове значення G вперше визначив Кавендіш (1798 р.), використавши крутильні терези. Більш точне значення G було визначене методом Жолі – Ріхарда. Найбільш точне значення G визначають динамічним методом – за зміною періоду коливань крутильних терезів, яка зумовлена наближенням взаємодіючих мас.

Швидкість світла у вакуумі c , швидкість поширення будь-яких електромагнітних хвиль; одна із фундаментальних фізичних сталих; являє собою граничну швидкість поширення будь – яких фізичних впливів та інваріантна при переході від однієї системи відліку до іншої. Величина c зв'язує масу і повну енергію матеріального тіла; через неї виражають перетворення координат, швидкостей і часу при зміні системи відліку; вона входить в багато інших співвідношень. Швидкість світла у середовищі залежить від показника заломлення середовища n , який є різним для різних частот ν випромінювання.

Вперше швидкість світла визначив у 1676 р. данський астроном О.К. Рьомер за змінами проміжків часу між затемненнями супутників Юпітера. У 1728 р. її встановив англійський астроном Дж. Брайлей, виходячи із своїх спостережень аберації світла зірок. На Землі швидкість світла першим виміряв – за часом проходження світлом точно відомої відстані (бази) – у 1849 р. французький фізик А.І.Л. Фізо. У досліді Фізо пучок світла від джерела S , відбитий напівпрозорим дзеркалом, періодично переривався зубчастим диском, що оберталося. Світло проходило базу і, відбившись від дзеркала, поверталося до диска. Попадаючи при цьому на зубець, світло не доходило до спостерігача, а попавши в проміжок між зубцями, воно спостерігалось через окуляр. За відомою швидкістю обертання диска визначали час проходження світлом бази. Фізо отримав значення $c = 313300$ км/с. В 1862 р. французький фізик Ж.Б.Л. Фуко реалізував висунуту в 1838 р. французьким вченим Д. Араго ідею використати замість зубчастого колеса дзеркало, яке швидко обертається (512 об/с). Схеми та основні ідеї дослідів Фізо та Фуко були багаторазово використані в наступних дослідів з визначення швидкості світла. Отримане американським фізиком

А. Майкельсоном в 1926 р. значення $c = 299796 \pm 4$ км/с було тоді найбільш точним і увійшло в інтернаціональні таблиці фізичних величин.

Вимірювання швидкості світла у 19 столітті відіграли велику роль у фізиці, додатково підтвердивши хвильову теорію світла, а також встановили зв'язок оптики з теорією електромагнетизму – вимірювана швидкість світла співпала з швидкістю електромагнітних, яка обчислена із відношення електро – магнітних та електро – статичних одиниць електричного заряду. Такий збіг виявився одним із відправних пунктів при створенні Максвелом електромагнітної теорії світла у 1864 – 73.

В сучасних вимірюваннях швидкості світла використовується модернізований метод Фізо (модуляційний метод) із заміною зубчатого колеса на електрооптичний, дифракційний, інтерференційний або якийсь інший модулятор світла, який повністю перериває або послаблює світловий пучок. Приймачем випромінювання є фотоелемент або фотоелектронний помножувач. Використання лазера в якості джерела світла, ультразвукового модулятора із стабілізованою частотою і підвищення точності вимірювання довжини бази дозволило знизити похибки вимірювань і отримати значення $c = 299792,5 \pm 0,15$ км/с. Крім прямих вимірювань швидкості світла, широко використовуються посередні методи, які забезпечують більшу точність. Так з допомогою мікрохвильового вакуумного резонатора (англ. фізик К. Фрум) при довжині хвилі випромінювання $\lambda = 4$ см отримано значення $c = 299792,5 \pm 0,1$ км/с. Ще з більшої точності у визначенні c досягають знаходячи незалежними методами λ та ν для атомарних чи молекулярних спектральних ліній. Американський вчений К. Івенсон з колегами в 1972 р. за цезієвим стандартом частоти знайшов з точністю до 11 знаку частоту випромінювання CN_4 – лазера, а за криптоновим стандартом частоти – його довжину хвилі (3,39 мкм).

Рішенням Генеральної асамблеї Міжнародного комітету з числових даних для науки і техніки – КОДАТА швидкість світла у вакуумі прийнято вважати рівною $299792458 \pm 1,2$ м/с.

Найточніше визначення величини c надзвичайно важливе не лише в загальнотеоретичному плані та для визначення інших фізичних величин, але й для практичних цілей. До них, зокрема, належать визначення відстаней за часом проходження радіо або

світлових сигналів у радіолокації, оптичній локації, світлометрії, в системах слідкування за ШСЗ.

Електрична і магнітна сталі ϵ_0 та μ_0 фізичного змісту не мають. Вони залежать лише від вибору систем одиниць. Тільки комбінація $\epsilon_0 \mu_0$ має реальний фізичний зміст $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$.

Стала Планка h (квант дії) – фундаментальна фізична константа, що визначає широке коло фізичних явищ, для яких характерна дискретність величин з розмірністю дії. Введена німецьким фізиком М. Планком у 1900 р. при встановленні закону розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла. Найбільш точне значення сталої Планка отримане на основі ефекту Джозефсона в надпровідниках. Ефект Джозефсона полягає у протіканні надпровідного струму через тонкий шар діелектрика, який розділяє два надпровідники (так званий контакт Джозефсона). Електрони провідності проходять через діелектрик (плівку окислу металу товщиною 10^{-9} м) завдяки тунельному ефекту. Якщо струм через контакт Джозефсона не перевищує певного значення, яке називається критичним струмом контакту, то спад напруги на контакті відсутній – стаціонарний ефект Джозефсона. Якщо ж через контакт пропускати струм більший від критичного, то на контакті виникає спад напруги, і контакт випромінює електромагнітні хвилі – нестаціонарний ефект Джозефсона. Випромінювати електромагнітні хвилі може лише змінний струм – саме такий струм протікає через контакт Джозефсона при постійному спаді напруги U на контакті. Частота випромінювання ν зв'язана з U формулою $\nu = \frac{2eU}{h}$.

Випромінювання зумовлене тим, що об'єднані в пари електрони, які створюють надпровідний струм, при переході через контакт набувають надлишкової по відношенню до основного стану

надпровідника енергії $2eU$. Відношення $\frac{e}{h}$ отримують шляхом вимірювання частоти випромінювання змінного струму контакту Джозефсона при фіксованій різниці потенціалів U , або з допомогою дослідження ступінчастої вольт – амперної характеристики, ступені на якій з'являються в результаті квантового детектування зовнішнього випромінювання відомої частоти ν . На практиці метод детектування ступенів є більш точним.

Маса спокою електрона m_e , *елементарний заряд* e , *відношення заряду електрона до його маси*.

Думку про те, що електричний заряд є дискретним вперше висловив Б. Франклін у 1749 р.

Перші обґрунтовані припущення про те, що електрика складається з особливих частинок, було зроблено на основі праць М. Фарадея з дослідження явища електролізу. Цю найменшу порцію електрики, яку часто називають елементарним зарядом, ірландський фізик Г. Стоней в 1891 р. назвав електроном (від гр. *elektron* – бурштин). Його відкрив англійський фізик Дж. Томсон у 1897 р. Він вперше в 1897 р. визначив питомий заряд електрона $\frac{e}{m}$. Ця величина виявилася рівною $1,7588 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Метод Томсона ґрунтується на компенсації дії однорідних електричного і магнітного полів на рухомий потік електронів в електронно – променевої трубці.

Пряме експериментальне вимірювання елементарного заряду у 1909 р. виконав американський фізик Р. Мілікен. Аналогічні досліди були повторені в різних країнах світу. В Росії майже в той самий час такі досліди провів А. Ф. Йоффе.

Мілікен в простір між горизонтально розташованими обкладками конденсатора вприскували масло. Краплини масла, проходячи через канал пульверизатора, внаслідок тертя електризувались. При відсутності зовнішнього електричного поля краплини рівномірно і повільно падали. при накладанні зовнішнього електричного рух краплини або прискорювався, або сповільнювався залежно від напрямку напруженості поля і знаку заряду краплини. Підбиралися такі значення і напрям \vec{E} , щоб краплина масла рівномірно піднімалася з швидкістю \vec{v} . Під час опромінення простору між пластинами конденсатора рентгенівськими променями повітря іонізувалося, краплини масла змінювали свій заряд і стрибком змінювалася їхня швидкість. Урівноважуючи електричним полем діючі сили, щоб кожного разу рухалась рівномірно, визначили різницю швидкостей її руху і обчислили зміну заряду. Вона виявилася кратною до величини e . Таким чином, за допомогою дослідів Мілікена довели існування елементарного заряду $|e|$ і вперше визначили його величину $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. З дослідів Томсона для електрона відомо відношення $\frac{e}{m}$. Звідси знайшли масу електрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Отже, електрон є матеріальним носієм найменшої маси і найменшого електричного заряду у природі.

Поняття «розмір електрона» не вдається сформулювати однозначно. З одного боку приймають, що електрон є точковою безструктурною частинкою, тобто увесь електричний заряд електрона зосереджений у точці. З другого боку умовно вводять так званий класичний радіус електрона $r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} \approx 2,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}$. Причину протиріч з'ясовує квантова механіка. Електрон, як і всяка інша мікрочастинка, крім корпускулярних має і хвильові властивості.

Атомна одиниця маси рівна 1/12 маси ядра атома ^{12}C .

Універсальна (молярна) газова стала R – це робота розширення 1 моль ідеального газу при постійному тиску при нагріванні на 1 К. Її числове значення можна визначити, вимірявши об'єм 1 моль ідеального газу при нормальному тиску (101325 Па) і температурі 273,15 К. Універсальну газову сталу визначають також методом відкачування, застосувавши до двох станів повітря рівняння Менделєєва – Клапейрона. Універсальна газова стала пов'язана з іншими фізичними сталими $R = kN_A$.

Стала Больцмана k рівна відношенню універсальної газової сталої R до сталої Авогадро N_A . Вона пов'язує енергетичну та абсолютну термодинамічну температуру: $\Theta = k T$. Стала Больцмана входить в ряд важливих фізичних співвідношень: основне рівняння МКТ, у вираз для середньої енергії теплового руху частинок, зв'язує ентропію фізичної системи з її термодинамічною ймовірністю. Числове значення k отримують на основі даних про R та N_A . Безпосередньо значення сталої Больцмана можна знайти, наприклад, із дослідної перевірки законів теплового випромінювання.

Французький фізик Жан Перрен експериментально підтвердив теоретично отриману А. Ейнштейном формулу для середнього квадрата переміщення броунівської частинки $\langle x^2 \rangle = 2kTvt$. Це дало можливість обчислити числове значення сталої Больцмана k .

Обертальний броунівський рух в теоретичному плані простіший від поступального і легше піддається дослідному дослідженню.

В 1932р. Капплер здійснив експеримент з вивчення обертального броунівського руху. На дуже тонкій кварцовій нитці підвішувалося маленьке дзеркальце. Під впливом ударів молекул навколишнього газу дзеркальце робить безладні крутильні коливання біля положення рівноваги. Для їх спостереження на дзеркальце напрямляють світловий промінь, який після відбивання попадає на

шкалу. За положенням зайчика на шкалі визначають кутове зміщення дзеркальця через рівні проміжки часу.

Сталу Больцмана знаходять за формулою $k = \frac{f}{T} \langle \varphi^2 \rangle$, де f – модуль кручення нитки, T – температура, $\langle \varphi^2 \rangle$ – середній квадрат кута повороту дзеркальця від положення рівноваги.

Стала Авогадро N_A рівна числу структурних елементів (атомів, молекул, іонів або інших частинок), що містяться в 1 моль речовини. Сталу Авогадро використовують для визначення інших фізичних констант: сталої Больцмана, сталої Фарадея. Один із кращих експериментальних методів визначення сталої Авогадро ґрунтується на вимірюванні електричного заряду, який необхідний для електролітичного розпаду відомого числа молів складної речовини та заряду електрона. N_A обчислюють також, знайшовши сталу Больцмана k .

Стала Фарадея F чисельно рівна електричному заряду, який повинен пройти через електроліт, щоб на електроді виділився один моль одновалентної речовини. Стала Фарадея рівна добутку сталої Авогадро на елементарний електричний заряд: $F = N_A e$.

Значення F визначалося на основі вимірювань електрохімічного еквівалента срібла.

Стала Стефана – Больцмана σ входить у закон, який визначає повну (для всіх довжин хвиль) випромінювальну здатність абсолютно чорного тіла. Числове значення сталої знайдено теоретично на основі формули Планка для функції розподілу енергії у спектрі випромінювання. Виходячи з формули Планка: $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$.

Стала Віна входить у закон зміщення Віна, який стверджує, що довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла обернено пропорційна абсолютній температурі: $\lambda_{\max} T = b$. Числове значення сталої знайдено теоретично на основі формули Планка для функції розподілу енергії у спектрі випромінювання. Виходячи з формули Планка: $b = \frac{hc}{4,965k}$.

Радіаційні сталі (постійні випромінювання), - це фізичні сталі $c_1 = 2\pi hc^2$ і $c_2 = \frac{hc}{k}$, які входять у формулу Планка для функції

розподілу енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла

$$e(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

Стала Рідберга – фундаментальна стала, яка входить у вираз для рівнів енергії і частот випромінювання атомів. Якщо вважати, що маса ядра атома нескінченно велика у порівнянні з масою електрона (ядро нерухоме), то, за квантово-механічними розрахунками

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3}, \text{ де } e \text{ та } m - \text{ заряд і маса електрона.}$$

Сталу Рідберга можна обчислити, вимірюючи довжини хвиль відповідних ліній у спектрі випромінювання атома водню. Для цих вимірювань використовують монохроматор.

1.14. Короткі відомості про вчених, ім'я яких увічнено у найменуваннях одиниць СІ

Ампер – одиниця сили електричного струму, одна з основних одиниць СІ.

Ампер Андре Марі (22.01.1775-10.06.1836)



Французький фізик, член Паризької академії наук, один із творців сучасної електродинаміки. Народився у Ліоні. Під керівництвом батька здобув всебічну домашню освіту. Уже в 14 років прочитав усі 20 томів «Енциклопедії» Дідро й Д'Аламбера, особливо зацікавився природничими науками, математикою та філософією.

Перші наукові праці Ампера були присвячені теорії ймовірностей, дослідженню задач з окремих розділів математичного аналізу. Та найбільших наукових успіхів досяг в електродинаміці. Ґрунтовно дослідив взаємодію між електричним струмом і магнітом, сконструював для цього багато оригінальних приладів. Виявив вплив магнітного поля Землі на рухомі провідники зі струмом. Відкрив взаємодію електричних струмів і встановив закон такої взаємодії (закон Ампера).

Ампер – автор теорії магнетизму. Він сформулював гіпотезу, за якою всі магнітні взаємодії є наслідком взаємодії колових молекулярних струмів усередині тіл, кожний з яких еквівалентний плоскому магніту. За Ампером, великий магніт складається з великої кількості таких елементарних плоских магнітів. Таким чином, Ампер

уперше вказав на тісний зв'язок між електричними та магнітними явищами й послідовно проводив ідею про електричне походження магнетизму. Дослідив магнітне поле котушки зі струмом – соленоїда, висловив ідею підсилення магнітного поля соленоїда розміщенням всередині його залізного осердя.

Добре відомі тепер поняття: електричний струм, його напрям, електричне поле, вперше були запроваджені в науковий обіг саме Ампером. Йому належить назва приладу, дія якого ґрунтується на відхиленні магнітної стрілки в магнітному полі електричного струму – гальванометра. Він уперше висловив ідею використання електромагнітних явищ для передавання сигналів на великі відстані, яка згодом була реалізована у вигляді електромагнітного телеграфу.

За видатні наукові досягнення Ампер обирався членом багатьох академій наук світу.

Беккерель – одиниця активності нукліда, похідна одиниця СІ.

Беккерель Антуан Анрі (15.12.1852 – 25.08.1908)



Французький фізик, член Паризької академії наук. Народився в Парижі, в сім'ї відомих учених-фізиків. Його батько Беккерель Олександр Едмон свої наукові інтереси присвятив магнетизмові й оптичним явищам, особливо дослідженням фосфоресценції. Був членом Паризької академії наук, її президентом. Дід Беккерель Антуан Сезар (також член Паризької академії наук) був офіцером інженерних військ, професором Паризького природничо-історичного музею. Досліджував явища фосфоресценції, флуоресценції, термоелектрики. Винайшов гальванічний елемент зі слабкою поляризацією, диференціальний гальванометр.

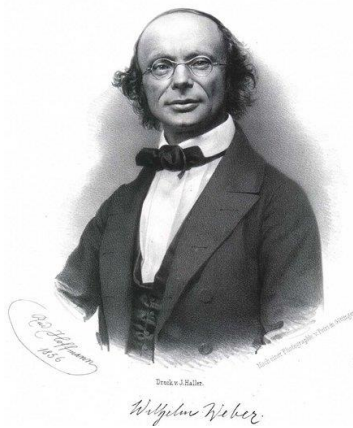
Наукові інтереси Беккереля Антуана Анрі торкалися переважно питань оптики, зокрема явищ фосфоресценції, флуоресценції, електрики, магнетизму, пізніше також фотохімії, електрохімії та метеорології. В усіх цих галузях знань виконав багато різноманітних наукових досліджень. Але найбільше прославив своє ім'я відкриттям і дослідженням природного явища, яке дістало назву спонтанної радіоактивності, за що разом з М. Склодовською-Кюрі та П. Кюрі в 1903 р. був удостоєний Нобелівської премії.

На фасаді Паризького природничо-історичного музею, де жив і працював Беккерель А.А., встановлено меморіальну дошку з

написом: «У лабораторії прикладної фізики Анрі Беккерель відкрив радіоактивність 1 березня 1896 р.»

Вебер – одиниця магнітного потоку, похідна одиниця СІ.

Вебер Вільгельм Едуард (24.10.1804 – 23.06.1891)



Німецький фізик, професор університетів у Галлі, Геттінгені та Лейпцигу. Тривалий час плідно співпрацював з відомим німецьким математиком Гаусом.

Вебер досліджував явища, пов'язані з акустикою, теплотою, молекулярною фізикою, земним магнетизмом. Однак основні його наукові праці присвячені електромагнетизмові. Він є автором гіпотези про дискретність електричного заряду, теорії елементарних магнітів – магнітних диполів. Досліджуючи взаємодію двох рухомих електричних зарядів, дійшов висновку, що результат такої взаємодії залежить не тільки від відстані між ними, а й від швидкості, з якою вони рухаються один відносно одного, відкрив закон такої взаємодії. Це дало йому змогу, з одного боку, обґрунтувати теоретично закон Ампера для двох малих



відрізків провідників зі струмом, а з іншого, теоретично підтвердити встановлений експериментально загальний закон електромагнітної індукції.

Незаперечні заслуги Вебера в електрометрії. Він узяв найактивнішу участь у розробленні та впровадженні в практику чудової ідеї Гаусса про раціональну абсолютну систему одиниць. Зокрема, Вебер запропонував кілька одиниць сили струму, розробив нові прилади для електричних вимірювань.

Особливо важливим з історичного погляду було виконане Вебером спільно з Кольраушем порівняння заряду конденсатора в електростатичних (СГСЕ) і магнітних (СГСМ) одиницях.

Вольт – одиниця електричної напруги, потенціалу, різниці потенціалів, електрорушійної сили.

Вольта Алессандро (18.02.1745 – 5.03.1827)

Італійський фізик, винахідник гальванічного елемента. Народився в Комо, поблизу Мілана. З раннього дитинства зацікавився



природничими науками, зокрема вивченням електричних явищ. Кілька років викладав фізику в своєму рідному місті, після чого працював професором Павійського університету, згодом – деканом філософського факультету Падуйського університету.

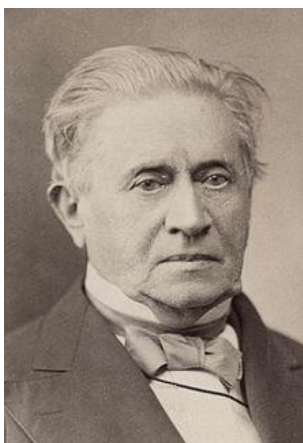
Вольта вперше здійснив замкнене коло електричного струму. Відкрив контактну різницю потенціалів і записав знаменитий ряд

Вольты в такій послідовності: цинк, олово, свинець, залізо, латунь, мідь, платина, золото, срібло, ртуть. Після тривалих дослідів для збільшення ефектів, що виникають при з'єднанні різнорідних провідників, прийшов до відкриття першого джерела електричного струму – вольтового стовпа. Перший такий стовп складався з 20 пар мідних і цинкових кружечків, розділених сукняними кружечками, змоченими солоною водою. Винайдений вольтів стовп дав змогу провести багато дослідів і вплинув не тільки на розвиток науки про електрику, а й на історію людства. І в цьому безсмертна заслуга Вольты в історії науки.

Вольты винайшов смоляний електрофор, дуже чутливий електроскоп, електрометр, конденсатор та інші прилади. В хімії також виконав багато досліджень, зокрема відкрив болотний газ і вивчив його властивості. У фізіології вперше показав, що нерви тварин мають значну електричну збудженість, відкрив властивість електричної збудженості органів чуттів людини.

Генрі – одиниця індуктивності, взаємної індуктивності

Генрі Джозеф (17.12.1797 – 13.05.1878)



Американський фізик, член Національної академії наук, її президент. Народився в Олбані. У 1832–1846 рр. – професор Прістонського коледжу, а з 1846 р. – директор Смітсоніанського інституту.

Наукові праці присвячені електромагнетизму. Першим сконструював електромагніти великої сили, намотуючи на залізне осердя ізольований дріт у кілька рядів; сконструював електричний двигун, винайшов електромагнітне реле, відкрив явище самоіндукції. Разом зі своїми учнями побудував електромагнітний телеграф, який діяв на території Прістонського коледжу. Встановив коливальний характер розряду конденсатора.

Герці був одним із організаторів Американської асоціації розвитку наук, її президентом, а також президентом філософського товариства у Вашингтоні.

Герц – одиниця частоти періодичного процесу.

Герц Генріх Рудольф (22.02.1857 – 01.01.1894)



Німецький фізик, один із засновників електродинаміки. Народився в Гамбурзі. Навчався в Дрезденському та Мюнхенському університетах, завершував свою освіту в Берлінському університеті під керівництвом Гельмгольца. Згодом – професор Вищої технічної школи в Карлсруе, професор Боннського університету.

За пропозицією Гельмгольца Герц досліджував явища електродинаміки і здійснив свої широко відомі експериментальні роботи, які принесли йому справжнє визнання. Експериментуючи з двома індуктивними котушками, Герц винайшов спосіб генерування електромагнітних хвиль за допомогою сконструйованого ним вібратора. Експериментально довів, що коливальний розряд вібратора збуджує в просторі хвилі, які складаються з двох коливань – електричного й магнітного, поляризованих перпендикулярно одне до одного. Надалі встановив відбиття, заломлення, інтерференцію, поляризацію цих хвиль і показав, що експериментальні факти цілком пояснюються теорією Максвелла.

Герц розробив класичний метод вимірювання швидкості хвиль у прямолінійному провіднику і першим застосував вектор Умова–Пойнтінга для обчислення потоку енергії, що випромінюється диполем у навколишній простір.

Наукові дослідження Герца поклали початок теоретичних основ радіотехніки.

Грей – одиниця поглинутої дози радіоактивного випромінювання.



Грей Луї Гарольд (10.11.1905 – 09.07.1965)

Англійський фізик і радіобіолог.

Луї Гарольд Грей народився 10 листопада 1905 р. в Лондоні. Вже під час навчання в середній школі він почав виявляти підвищену цікавість до природничо-наукових експериментів. Своє навчання він продовжив в Триніті Коледжі в

Кембриджі, де привернув до себе увагу видатними успіхами в навчанні. У віці 23 років він був прийнятий в лабораторію Кавендиша (Відома фізична лабораторія, що виховала цілу плеяду видатних фізиків, у тому числі і академіка Іоффе), яку тоді очолював відомий вчений Ернест Резерфорд.

Це були роки відкриттів, які викликали цілий переворот у фізиці, і чимала заслуга в цьому належить лабораторії Кавендиша. Молодий Грей отримав можливість співпрацювати з відомими ученими, багато хто з яких були лауреатами Нобелівської премії. Тут він остаточно сформувався як учений і в подальші роки завжди намагався створити творчу «кавендишську» атмосферу і у своїх лабораторіях.

В ті роки Грей інтенсивно займався вивченням взаємодії випромінювання і маси. У 1929 р. в одній зі своїх перших робіт він виклав принцип дії вакуумної камери незалежно від більше ранніх робіт в цій області В. Брегга. Ця теорія, яка стала основою дозиметрії іонізуючого випромінювання, називається сьогодні принципом Брегга - Грея. Наступні роботи Грея торкалися абсорбції стійких гамма-квантів і стали основою вчення про утворення електрон-позитронних пар. Незважаючи на успіхи в галузі «чистої» фізики, Грея все більше притягала радіобіологія. В середині 30-х років ця галузь науки тільки зароджувалася, і Грей розумів, що тут потрібно провести ще дуже велику роботу першозасновника. Радіобіології він залишився вірний до кінця свого життя. Одним з перших завдань було знайти спосіб вимірювання іонізуючого випромінювання при біологічних процесах. Тому йому довелося зайнятися вивченням біологічних проблем, засвоїти багато що з хімії, біології і медицини, щоб мати повне уявлення про радіобіологічні процеси. У кінці 30-х років разом зі своїми співробітниками він сконструював нейтронний генератор для вивчення дії іонізуючого випромінювання на живі тканини. Ці біологічні дослідження були пов'язані з основними роботами з нейтронної дозиметрії, і тут дуже згодився його досвід роботи в Кавендишській лабораторії.

Після закінчення другої світової війни Грей обіймав керівні посади у великих клініках, спочатку в Хаммерсміт Госпіталі, а з 1953р. і до кінця життя в Маунт Вернон госпіталі. Багато зусиль він доклав до пошуку шляхів використання штучних радіоактивних ізотопів в радіобіології і при вивченні злоякісних пухлин. Необхідно було знайти кошти і шляхи ефективної дії іонізуючого

випромінювання на пухлинні клітини без ушкодження здорових тканин. Здобули популярність і його фундаментальні праці про «кисневий ефект», причому він першим кількісно оцінив вплив кисню на опірність клітин опроміненню. Не менш значимою була діяльність Грея у багатьох англійських і зарубіжних наукових товариствах і комітетах. Досить, наприклад, згадати про його роботу в Міжнародній комісії радіобіологічних одиниць і вимірювань, віцепрезидентом якої він був впродовж багатьох років. Він вніс великий вклад в розробку визначень і уточнень різних понять при вимірюванні іонізуючого випромінювання.

Луї Гарольд Грей помер 9 липня 1965 р. у Нортвуді. У 1967 р. Міжнародна комісія радіобіологічних одиниць і вимірювань заснувала в його честь медаль, яка присуджується один раз в чотири роки за видатні наукові результати в цій галузі.

Джоуль – одиниця роботи, енергії кількості теплоти.

Джоуль Джеймс Прескотт (24.12.1818-11.10.1889)



Англійський фізик, член Лондонського королівського товариства. Народився в Солфордї. Здобув домашню освіту. Уроки з фізики давав йому Дж. Дальтон, під впливом якого почав експериментальні дослідження явищ електромагнетизму та теплоти. Одночасно конструював електричні прилади.

Джоуль виконав основоположні експериментальні дослідження, які сприяли встановленню закону теплової дії електричного струму і взаємозв'язку між переданою теплотою та виконаною механічною роботою. Розроблений ним метод визначення механічного еквівалента теплоти ввійшов у всі підручники з фізики.

Разом з англійським фізиком У. Томсоном відкрив явище охолодження газу при адіабатичному розширенні, яке пізніше було успішно використане для скраплення газів. Будучи прихильником кінетичної теорії теплоти, Джоуль пояснив тиск газу на стінки посудини, обчислив швидкість руху газових молекул і встановив її залежність від температури. Побудував термодинамічну температурну шкалу. Виконав багато інших експериментальних наукових фізичних досліджень.

Зіверт – одиниця еквівалентної дози.



Рольф Максиміліан Зіверт (Rolf Maximilian Sievert) (06.05. 1896 – 03. 10. 1966).

Відомий шведський фізик, що працював у галузі радіаційної фізики, медичної фізики, радіаційного захисту і радіобіології. Р.М. Зіверт народився 6 травня 1896 р. в Стокгольмі (Швеція) в сім'ї відомого підприємця Макса Зіверта. Вчився в Стокгольмі: в 1914–1915 рр. – в Каролінському інституті, а 1915 – 1916 рр. – в Королівському технологічному інституті. Ступінь магістра (у 1919 р.) і докторський ступінь (у 1932 р.) отримав в Уппсальському університеті. У 1932 р. став також асоційованим професором медичної фізики в Стокгольмському університеті. У 1920 р. почав працювати в Центрі клінічної рентгенорадіології. З 1924 р. по 1937 р. керував в цьому Центрі Фізичною лабораторією, яку він організував і фінансував за власні кошти.

Під керівництвом Р. М. Зіверта ця лабораторія стала всесвітньо визнаним центром по радіаційній фізиці. У 1938 р. лабораторія відійшла до Каролінського інституту і була перейменована у Відділ радіаційної фізики. Р.М.Зіверт став керівником цього відділу, а з 1941р. по 1965 р.– професором Каролінського інституту. Р. М. Зіверт є одним з основоположників дозиметрії іонізуючого випромінювання (особливо при його використанні в медицині в діагностичних і лікувальних цілях) і радіаційного захисту.



У 1920–1940рр. ним розроблений ряд оригінальних приладів і пристроїв для дозиметрії іонізуючого випромінювання (найбільш відомою з них є камера Зіверта) і технічних пристосувань для опромінення хворих. У 1930-і роки він почав вивчати біологічні ефекти дії іонізуючого випромінювання, зокрема малих доз хронічного опромінення, що отримуються радіологами в їх щоденній роботі. За ініціативою Р. М. Зіверта в 1941 р. був ухвалений перший шведський закон по радіаційному захисту. Відповідно до цього закону Відділу радіаційної фізики, очолюваному Р.М. Зівертом, доручалося здійснювати контроль за усіма роботами, що проводяться з використанням іонізуючого випромінювання в медицині і промисловості Швеції. У 1928–1931 рр. і 1956–1962 рр. Р.М. Зіверт очолював Міжнародну комісію з радіологічного захисту – МКРЗ

(International Commission on Radiological Protection – ICRP), а в 1958–1960 рр. – Науковий комітет з дії атомної радіації при ООН – НКДАР (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR) В 1964 р. він заснував Міжнародну асоціацію по радіаційному захисту (International Radiation Protection Association – IRPA). Р.М. Зіверт був одружений двічі: перший раз – з 1918 р. по 1931 р. на Інгрід Сандберг і другий раз – з 1932 р. на Астрід Остергрен.

Помер Р.М. Зіверт 3 грудня 1966 р. у Стокгольмі. Ім'ям Зіверта неофіційно називають Медаль радіаційного захисту (**медаль Зіверта**), що присуджується Шведською королівською академією наук з 1962 р за його ініціативою. На відміну від більш відомої нагороди Шведської академії - Нобелівської премії - лауреатів «медалі Зіверта» вкрай мало - лише 13 осіб за станом на 2016р. У 1973р. Міжнародна асоціація з радіаційного захисту заснувала премію імені Р. Зіверта за винятковий вклад в радіаційний захист. Цю премію присуджують один раз в чотири роки і вручають на Конгресі асоціації, який починається лекцією лауреата. У 1979 р. на честь Р.М. Зіверта названа одиниця еквівалентної дози і ефективної дози іонізуючого випромінювання в Міжнародній системі одиниць (СІ) – Зіверт (Зв; англ. sievert, Sv).

Кулон – одиниця електричного заряду.

Кулон Шарль Огюстен (14.06.1736 – 23.08.1806)



Французький фізик і військовий інженер, член Паризької академії наук. Народився в Ангулемі. Закінчив школу військових інженерів і все життя був військовим.

Кулон виконав ґрунтовні наукові дослідження в технічній механіці, магнетизмі, й особливо електриці. Сформулював закони тертя ковзання та кочення. Дослідив кручення волосяних, шовкових і металевих ниток, установив закони кручення. На основі цих досліджень створив новий дуже чутливий метод вимірювання сили. За допомогою виготовлених ним крутильних терезів відкрив основний закон електростатики, що дістав назву закону Кулона. Пізніше цей закон він поширив на взаємодію магнітних полюсів.

Уперше висловив гіпотезу, що кожна молекула під час намагнічування стає поляризованою, встановив відсутність електризації всередині провідника.

Дослідження Кулона стали основою для наступних експериментальних і теоретичних досліджень електричних та магнітних явищ.

Ньютон – одиниця сили.

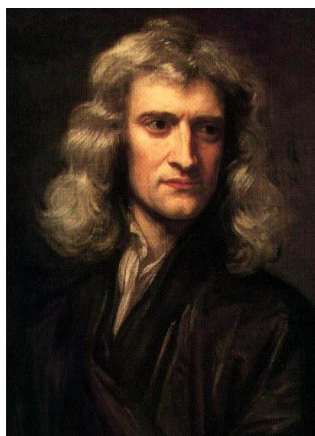
Ньютон Ісаак (04.01.1643 – 31.03.1727)



Англійський фізик і математик, основоположник сучасного природознавства, творець класичної фізики. Член Лондонського королівського товариства, його президент, наглядач, а згодом директор Монетного двору Англії. Народився у Вулсторпі в селянській родині, помер у Кенсінгтоні – околиці Лондона, похований у Національному пантеоні Англії –

Вестмінстерському абатстві. Напис на його пам'ятнику закінчується такими словами: «... Нехай смертні радіють, що існувала така краса людського роду».

Ньютон сформулював основні закони класичної механіки, відкрив закон всесвітнього тяжіння, дисперсію світла, розвинув корпускулярну теорію світла, розробив (незалежно від Лейбніца) диференціальне й інтегральне числення. Узагальнивши результати досліджень своїх попередників у механіці та власні, Ньютон написав величезну працю «Математичні початки натуральної філософії» (1687). «Початки» містять основні поняття та аксіоматику класичної механіки, зокрема поняття маси, кількості руху, сили, прискорення й три закони руху – закон інерції, закон пропорційності сили прискоренню й закон дії та протидії. У «Початках» сформульовано також закон всесвітнього тяжіння, виходячи з якого Ньютон пояснив рух небесних тіл (планет, їхніх супутників, комет) і створив теорію тяжіння.



Величезним є внесок Ньютона в оптику. Відкриття дисперсії світла, дослідження інтерференції та дифракції світла, вивчення природи кольорів тонких пластинок, відкриття дифракційних кілець, встановлення закономірності в їх розміщенні, відкриття явища хроматичної аберації, виготовлення телескопа-рефлектора оригінальної системи з метою усунення в ньому явища аберації – такий далеко не повний перелік досягнень Ньютона в оптиці. Свої оптичні дослідження він виклав у праці «Оптика» (1704).

Наукова творчість Ньютона мала виключно важливе значення в історії розвитку фізики.

Ом – одиниця електричного опору.

Ом Георг Сімон (16.03.1787– 7.07.1854)



Німецький фізик, викладач фізики та математики в різних гімназіях, згодом професор Нюрнберзької вищої політехнічної школи та Мюнхенського університету.

Основні наукові дослідження Ома стосуються електрики. Виконав основоположні експериментальні дослідження властивостей кола постійного електричного струму. На основі цих досліджень довів однаковість сили струму в різних ділянках кола, з'єднаних послідовно, залежність сили струму від довжини провідників, площі їхнього поперечного перерізу, а також від матеріалів, з яких вони виготовлені. Ввівши поняття опору кола, сформулював основний закон електричного кола, що пов'язує його опір, електрорушійну силу та силу струму в колі (закон Ома).

Ом досліджував також нагрівання електричним струмом провідників, виконав важливі дослідження в акустиці, на підставі яких дійшов висновку, що найпростіше слухове відчуття спричиняється лише гармонічними коливаннями і що людське вухо здатне розкладати звук на синусоїдні складові.

Автор численних наукових праць. Був обраний членом Лондонського королівського товариства.

Паскаль – одиниця тиску

Паскаль Блез (19.06.1623- 19.08.1662)



Французький математик, фізик, філософ. Народився в Клермон-Феррані в сім'ї математика. Здобув домашню освіту під особистим керівництвом батька. З дитинства виявив надзвичайні математичні здібності – у 16 років сформулював одну з основних теорем проєктивної геометрії, яку пізніше було названо теоремою Паскаля. Виконав низку досліджень в інших розділах математики, зокрема в теорії імовірностей, теорії чисел. У 1649 р. Паскаль сконструював додавальну машину (арифмометр).

У фізиці Паскаль уславив своє ім'я головним чином дослідженнями в гідростатиці. Він установив, що тиск на рідину передається без зміни в усіх напрямках (закон Паскаля); сформулював закон сполучених посудин і розробив теорію гідростатичного преса. Одним із перших указав на спільність законів рівноваги рідин і газів. На основі експериментів довів, що з висотою атмосферний тиск зменшується; встановив, що покази барометра залежать від вологості та температури повітря. Останнє мало важливе значення для метеорології.

Паскаль плідно займався також літературною діяльністю, а його наукові трактати з філософії вирізнялися глибиною думки й завершеністю.

Сименс – одиниця електропровідності.

Вернер фон Сіменс (або *Зіменс*, **13.12.1816 – 6.12.1892**) –



німецький інженер, винахідник, учений, промисловець, засновник фірми Siemens, громадський і політичний діяч.

Закінчивши з відзнакою гімназію в Любеку, потім артилерійське інженерне училище в Мальденбурзі, він в званні молодшого лейтенанта служить в артилерійських майстернях у Берліні, де займається винахідництвом і науковими дослідженнями.

Після смерті батьків 24-річний Вернер залишається старшим в сім'ї, що складається з десяти братів і сестер.

У 1845 р. він стає одним з найпомітніших молодих учених у недавно створеному Фізичному товаристві і вже наступного року його відряджають в комісію генштабу для підготовки впровадження електротелеграфії. У листі від 14 грудня 1846 р. Вернер Сіменс повідомляє родичів: *«Я тепер майже зважився вибрати постійний терен телеграфії. Телеграфія стане самостійною важливою галуззю техніки, і я відчуваю себе покликаним зіграти в ній роль організатора»*.

Перші наукові дослідження Сіменса пов'язані з гальванопластикою. Важливим у житті Сіменса було одержання патенту на сконструйований ним зразок телеграфного апарата, що дало йому змогу, заснувати невеличку майстерню для виготовлення телеграфних апаратів і виконання замовлень на побудову телеграфних ліній зв'язку. 1 жовтня 1847 р. разом з механіком

Гальське була заснована телеграфно-будівельна фірма Telegraphenbauanstalt Siemens & Halske, що займалася окрім електротелеграфії широким колом робіт в області точної механіки і оптики, а також створенням електромедичних апаратів. У 1849 р. фірма S&H побудувала першу в Німеччині телеграфну лінію Берлін – Франкфурт-на-Майні.

Для однієї з ділянок в основному повітряній лінії був використаний підземний кабель з гутаперчевою ізоляцією, накладеною за допомогою винайденого Сіменсом преса. Тоді ж Вернер запропонував затягувати кабель в свинцеві труби.

Він також удосконалив стрілочний телеграф Уїтстона-Кука, за що на Першій Міжнародній промисловій виставці в Англії (1851 р.) був удостоєний однієї з вищих нагород.

Починаючи з 1853 р. фірма S&H вела будівництво телеграфних ліній в Росії, пов'язавши Санкт-Петербург з Кронштадтом, Гельсінгфорсом, Варшавою, Ригою, Ревелем і взявши на себе їх технічне обслуговування.

Сіменс, поєднуючи наукові дослідження і винахідницьку діяльність з дослідно-конструкторськими розробками, впроваджував у виробництво нові і удосконалював вироби, що випускалися, — риза, що ріднила цього ученого-практика з Едісоном.

Його доповідь про електротелеграфію в Паризькій академії наук був високо оцінена Гумбольдтом і опублікована за рекомендацією Франсуа Араго. У віці 35 років Сіменс увійшов до лав всесвітньо визнаних авторитетів в області електротехніки. У 1860 р. Берлінський університет присвоїв йому почесне звання доктора філософії.

У 1868–1870 рр. фірма S&H брала участь в спорудженні Індоевропейської телеграфної лінії Лондон – Калькутта протяжністю 11000 км. Одну з ділянок цієї лінії (через Кавказ) було побудовано на залізних опорах і вона пропрацювала з 1871 по 1931 р.

До другої половини 1860-х років відноситься початок робіт Сіменса в області сильнострумної електротехніки. Його найзначніше досягнення в цій галузі датується 1867 р., коли він створив досконалу конструкцію генератора постійного струму з самозбудженням, що довгий час називалася динамо-машиною. Він же запропонував і виготовив ртутний еталон електричного опору, побудував електричний пірометр, селеновий фотометр, виміряв діелектричну проникність багатьох речовин.

На початку 1870-х років Siemens & Halske побудувала кабельне судно «Фарадей», оснащене вдосконаленою кабелеукладною машиною. У 1874 р. «Фарадей» проклав трансатлантичний телеграфний кабель, що безпосередньо зв'язав Ірландію і США (5700 км), минувши острів Ньюфаундленд. А всього за 10 років це судно проклало шість трансатлантичних кабелів.

У липні 1874 р. Сіменс був прийнятий в члени Пруської академії наук.

У 1877 р. фірма S&H виготовляла телефонні трубки Белла, а в 1881 р. брала участь у будівництві першої в Берліні телефонної станції.

У 1877 році в сланцях, що відносяться до пізнього юрському періоду, була виявлена єдина у своєму роді скам'янілість якоїсь викопної птиці, що чудово збереглася. Знайшов цю палеонтологічну рідкість геолог-любитель і мав намір продати її за кордон, запросивши за неї крупну суму грошей. Почувши про цю рідку знахідку, Сіменс відразу ж купує її, залишаючи таким чином, в Німеччині. Пізніше він передає її Берлінському музею природознавства. Наукова назва раритету *Archaeopteryx Simensii* (Археоптерикс Сіменса) досі нагадує нам про цей чудовий вчинок Вернера Сіменса.

Майже всіма успіхами підприємства Сіменса зобов'язані дослідницьким і винахідницьким здібностям свого керівника. Він відхиляв все, що всесторонньо не проаналізовано теоретично і не підтверджене експериментом.

Динамо-машина Сіменса провела справжню революцію в гірничій справі, завдяки їй з'явилися електровідбійний молоток, шахтний електровентилятор, електротранспортер і, головне, електрична копальна дорога.

У 1879 р. фірма S&H представила на берлінській промисловій виставці першу електричну залізну дорогу: трамвай, яким з величезним успіхом здійснювалися перевезення екскурсантів на території Берлінської промислової виставки.

А у 1880 р. на виставці в Мангеймі продемонструвала перший у світі електроліфт; у 1881 р. нею побудована перша лінія електричного трамваю на околиці Берліна; у 1882р. почата дослідна експлуатація безрейкового транспорту.

Сіменс багато зробив для розвитку німецької і європейської електротехніки. Він – ініціатор утворення Берлінського

електротехнічного союзу (1879р.), а також засновник і голова Товариства патентів у Берліні. Термін електротехніка ввів в ужиток саме Вернер фон Сіменс, написавши його в 1879 році в листі до Генріха фон Стефана, Генерального Поштмейстера Німеччини (до цього використовували термін «прикладна теорія електрики»).

Крім того, Вернер Сіменс відомий як меценат в області науки і культури: він пожертвував 500 тис. марок на створення Берлінської національної фізико-технічної лабораторії; завдяки його зусиллям і грошовій підтримці в Шарлоттенбурзі відкрився Фізико-технічний інститут.

На Першій Міжнародній електротехнічній виставці в Парижі в 1881 р. найбільший успіх припав на долю експонатів Едісона і Сіменса. Там же обидва корифеї електротехніки познайомилися і подружилися.

У 1888 р. Вернеру Сіменсу було надано дворянський титул і він став Вернером фон Сіменсом.

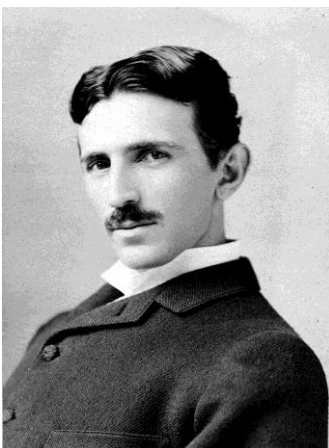
З 1889 року почався поступовий відхід Вернера Сіменса від активної участі в справах фірми, в цей час в його фірмі, включаючи дочірні підприємства в Лондоні, Санкт-Петербурзі і Відні, налічувалося вже 5000 співробітників. 31 грудня 1889 року Сіменс вийшов з керівництва фірмою.

У 1892 р. він винайшов сталеву стрічкову броню для захисту підземних кабелів від механічних впливів.

В кінці життя з властивим йому даром реального передбачення Сіменс вказав на перспективу світової торгівлі і економічного об'єднання Європи: «Це може статися тільки завдяки усуненню по можливості всіх внутрішньополітичних митних бар'єрів, які звужують райони збуту, здорожують виробництво, а це зменшує конкурентоздатність на світовому ринку».

Тесла –одиниця магнітної індукції.

Тесла Никола (10.07.1856- 07.01.1943)



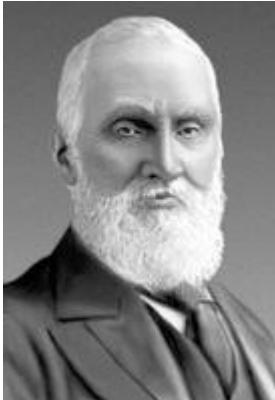
Сербський учений у галузях електро- та радіотехніки. Народився в Смилянах (Хорватія). Закінчив політехнічний інститут в Граці і Празький університет. Працював інженером у Будапешті, а пізніше в Парижі. У 1884р. емігрував до США.

Розробив конструкції багатофазних

генераторів, електродвигунів і трансформаторів та схеми розподілу багатофазних струмів. Відкрив явище обертового магнітного поля. Винайшов високочастотний трансформатор (трансформатор Тесла). Вивчав дію високочастотних струмів на організм живих істот. Винайшов електролічильник, частотомір і багато інших електро- та радіотехнічних приладів.

Кельвін – одиниця термодинамічної температури, Основна одиниця СІ.

Томсон (Кельвін) Уїльям (26.06.1824-17.12.1907)



Англійський фізик, член Лондонського королівського товариства. Народився в Белфасті. Закінчив Кембріджський університет і майже рік опрацьовував експериментальну фізику в одній з найкращих у світі фізичних лабораторій А. Реньо в Парижі. Після цього керував кафедрою теоретичної фізики Глазговського університету, деякий час був його президентом. Останні роки свого життя очолював Лондонське королівське товариство. За видатні наукові заслуги здобув титул лорда Кельвіна. Похований у національному пантеоні Англії – Вестмінстерському абатстві.

Виконав багато досліджень з різних розділів фізики, математики, техніки. Перші наукові праці присвячені проблемам математичної фізики, в тому числі застосуванню рядів Фур'є для розв'язування деяких теоретичних задач з фізики. Розробив важливий метод електричних зображень, який дав змогу розв'язати кілька дуже складних задач з електротехніки, теорії теплопровідності.

Томсон (Кельвін) розробив основи теорії електричних коливань, вивів відому формулу, яка встановлює залежність між періодом власних коливань коливального контуру та його ємністю й індуктивністю; сконструював кілька високочутливих електровимірювальних приладів.

Значні наукові досягнення мав Томсон (Кельвін) у термодинаміці. Сформулював другий закон термодинаміки і довів неможливість здійснення в природі вічного двигуна другого роду. Помилково висловив антинаукову гіпотезу про «теплову смерть» Всесвіту. Ця гіпотеза зазнала нищівної критики з боку видатних вчених у галузі фізики Л. Больцмана, М. Смолуховського та інших, яку, до речі, учений сприйняв належно.

Томсон (Кельвін) установив поняття абсолютної температури й

абсолютної шкали температур – шкали Кельвіна. Розробив термодинамічну теорію термоелектричних явищ. Здійснив кілька цікавих досліджень з теплопровідності.

Був обраний членом багатьох зарубіжних академій і наукових товариств.

Ват – одиниця потужності.

Уатт Джеймс (19.01.1736 – 25.08.1819)



Англійський винахідник. Народився в Гріноці (Шотландія). Працював механіком у Глазговському університеті.

Багато сил доклав до вдосконалення парової машини Ньюкомена. Побудував і використав у ній циліндр подвійної дії. Кривошипно-повзунковий механізм замінив планетарно-зубчастою передачею. Сконструював відцентровий регулятор із дросельною заслінкою для підтримування постійною кількістю обертів вала тощо. Такі вдосконалення дали можливість Уатту побудувати універсальний паровий двигун, який виявився на той час досить економічним, ефективним, набув великого поширення й відіграв значну роль у переході до капіталістичного машинного виробництва.

Фарад – одиниця електричної ємності.

Фарадей Майкл (22.09.1791- 25.08.1867)



Англійський фізик, член Лондонського королівського товариства. Народився в Лондоні. Навчався самостійно. Влаштувався на роботу асистентом у лабораторію відомого англійського фізика і хіміка Г. Деві в Королівському інституті. У 1825р. призначається директором лабораторії Королівського інституту, замінивши на цій посаді Г. Деві. З 1833р. – професор кафедри хімії цього інституту.

Перші наукові дослідження Фарадея стосувалися хімії. Вперше здійснив зрідження хлору і отримав бензол. Однак невдовзі всі свої наукові вподобання присвятив фізиці, зокрема електромагнетизму. Найвищим світовим науковим досягненням Фарадея було відкриття явища електромагнітної індукції, яке спричинило справжній переворот у техніці, стало основою електротехніки.

У працях Фарадея з електромагнетизму важливим також було

введення в науковий обіг поняття поля. Він уперше в історії розвитку фізики використав термін «магнітне поле». За висловом



А. Ейнштейна, ідея поля була найоригінальнішою ідеєю Фарадея, найважливішим відкриттям з часів Ньютона. За Фарадеєм, простір, в якому відбуваються явища, сам бере в них участь, є ніби вмістилищем усіх явищ. Фарадей у своїх дослідженнях чудово скористався уявленнями про електричні та магнітні силові лінії, хоча помилково і вважав їх реально існуючими. Отже, Фарадей виступив у цій частині своїх наукових досягнень творцем учення про електромагнітне поле. Матерія стала виступати не лише у формі речовини, а й у формі поля.

Фарадей відкрив закони електролізу, висловив гіпотезу про існування іонів, уперше описав явища пара- та діамагнетизму, обертання площини поляризації світла в магнітному полі. Виявив вплив діелектриків на електричну взаємодію і ввів у науковий обіг поняття діелектричної проникності, експериментально довів закон збереження електричного заряду. До того ж він був видатним популяризатором фізики.

РОЗДІЛ II. ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА ОЦІНКА ПОХИБОК

2.1. Поняття про вимірювання фізичної величини. Класифікація вимірювань

Під вимірюванням фізичної величини розуміють послідовність операцій, які виконуються дослідним шляхом при допомозі технічних засобів(приладів, лабораторних чи технічних установок) спеціально призначених для знаходження з відповідною точністю значення фізичної величини, що характеризує досліджуваний об'єкт або явище.

Всяке вимірювання полягає у порівнянні даної величини з іншою, однорідною величиною, яка взята за одиницю. Але не завжди таке порівняння виконують безпосередньо. У більшості випадків вимірюється не сама величина, а інші величини, які пов'язані з нею тими чи іншими співвідношеннями і закономірностями.

У цьому плані вимірювання поділяють на **прямі і непрямі**.

До прямих вимірювань належать такі, при яких числове значення шуканої величини отримують в результаті одного відліку чи спостереження. Або прямим називають таке вимірювання фізичної величини, при якому вхідний вимірювальний сигнал вже містить інформацію про вимірювану фізичну величину.

Наприклад: вимірювання температури термометром, атмосферного тиску – барометром, маси – терезами.

При прямому вимірюванні значення фізичної величини отримують за показами вимірюваного приладу.

Непрямі вимірювання – це вимірювання, при яких значення величини, яка являє собою відому функцію інших величин, визначають шляхом обчислень за результатами прямих вимірювань величин – аргументів функції. Потрібно відмітити, що величини, отримані прямими вимірюваннями, вимірюються у відповідних умовах. Тому результат непрямих вимірювань прив'язаний до тих умов, в яких проводились прямі вимірювання.

Широко використовують методи вимірювань, в яких на вхід приладу діє не безпосередньо вимірювання величина, деяка інша фізична величина, яка пов'язана з вимірюваною відомою функціональною залежністю. При цьому для зручності шкалу приладу градуують в одиницях вимірюваної величини, враховуючи відому функціональну залежність.

Прикладом може бути вимірювання висоти над поверхнею Землі альтиметром, який є барометром. Вимірюваною величиною є висота, а на вхід приладу діє тиск атмосфери. Чи можна вважати такі вимірювання непрямыми? Формально так. Але при подібних вимірюваннях немає похибок, які зумовлені обчисленнями. Оскільки результати вимірювань визначаються безпосередньо за показами вимірювальних приладів, їх зручніше віднести до прямих вимірювань.

До непрямих вимірювань відносять тільки такі вимірювання, при яких розрахунок проводять після отримання результатів прямих вимірювань, коли необхідно враховувати окремо похибки обчислень.

Багатократні вимірювання однієї величини виконують для зменшення впливу випадкових похибок вимірювань. Їх відносять до прямих вимірювань, хоча результат цих вимірювань знаходять як середнє арифметичне ряду результатів однократних вимірювань.

Вимірювання поділяють також на **лабораторні** і **технічні**.

Лабораторні вимірювання проводять в основному, при різних наукових дослідженнях, коли необхідно забезпечити більш високу точність вимірювань. Для цього під час самого вимірювання і після нього досліджується похибка отриманого конкретного результату вимірювань. Для зменшення можливих похибок результату вимірювань часто використовують такі заходи:

- використовувати засоби вимірювань індивідуально атестуються, визначаються нестабільності їх метрологічних характеристик;
- умови кожного акту вимірювань намагаються зробити такими, щоб нестабільність похибки стала якомога меншою;
- проводять багатократні вимірювання для зменшення впливу випадкових похибок;
- для зменшення динамічної похибки використовують засоби вимірювання з динамічними характеристиками, які за можливістю є близькими до ідеальних (такими, які забезпечують незначну залежність результату вимірювань від швидкості зміни вимірюваної величини.)

Отже, при лабораторних вимірюваннях одночасно проводять два взаємопов'язаних дослідження: одне напрямлене на отримання результату вимірювання з найменш можливою похибкою, а друге на оцінку похибки отриманого результату вимірювання.

Похибка результату лабораторного вимірювання і її характеристики стосуються тільки результату конкретного акту

вимірювання. Лабораторні вимірювання вимагають високої кваліфікації персоналу, який проводить вимірювання.

Технічними є вимірювання, для яких наперед визначається певна точність, достатня для даної практичної мети. Це вимірювання, які проводяться в заданих умовах, за певною методикою, розробленою і випробуваною наперед, до проведення вимірювань. Тому при виконанні технічних вимірювань немає потреби визначати і аналізувати похибки отриманих результатів вимірювань. Похибки всіх результатів, які можуть бути допущені при даній регламентованій методиці виконання вимірювань (МВВ) є наперед визначені.

Технічні вимірювання – це, як правило, масові вимірювання. Практично всі вимірювання, які виконують в усіх галузях народного господарства, за винятком наукових досліджень, належать до технічних.

Крім того розрізняють вимірювання постійної, або мало змінюваної фізичної величини, які називають статичними, і вимірювання змінної в часі величини, які називають динамічними.

Взагалі кажучи, незмінність вимірюваних величин, на практиці може зустрічатися лише при цілеспрямованій оцінці постійних похибок, коли вимірювану величину спеціально підтримують незмінною. При практичних вимірюваннях, часто вимірювана величина, повільно чи швидко, але міняється.

При класифікації вимірювань на статичні та динамічні її метою доцільно вважати врахування чи неврахування в конкретних вимірюваннях швидкості зміни величини.

Похибки, зумовлені впливом саме швидкості зміни вимірюваної величини, називаються динамічними. Якщо за певних умов вимірювання (швидкість зміни вимірюваної величини, використовувані засоби вимірювань) динамічною похибкою можна знехтувати – вимірювання статичні.

Сукупні вимірювання – це виконувані одночасно вимірювання кількох однойменних величин, при яких шукані значення величин знаходяться розв'язуванням системи рівнянь, здобутих при прямих вимірюваннях різних сполучень цих величин або при зміні умов вимірювання.

Наприклад масу декількох тіл знаходять за відомою масою одного з них, та за результатами прямих порівнянь мас різних сполучень.

Спільні вимірювання – це одночасно виконувани вимірювання двох або кількох неоднойменних величин для знаходження залежності між ними.

Вимірювання може бути виконане за допомогою засобів вимірювання. Це відповідні технічні засоби, які використовуються для і мають нормовані метрологічні властивості.

До засобів вимірювання належать:

1. Міри – це засоби вимірювання, призначені для відтворення фізичної величини заданого розміру (гиря – міра маси). Міри можуть бути однозначними, тобто такими, які відтворюють фізичну величину одного розміру (гиря, нормальний елемент) та багатозначними, що відтворюють однойменні величини різного розміру (лінійка з міліметровими, сантиметровими поділками, конденсатор змінної ємності, магазин опорів). Дуже поширені набори та магазини мір.

2. Вимірювальні прилади – засоби вимірювань, призначені для вироблення сигналу вимірюваної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприймання. Вимірювальний прилад, завдяки своїм структурним елементам має: певний принцип дії (фізичний принцип, покладений в основу його будови); вимірювальний механізм, головними складовими частинами якого є чутливий та перетворюючий елемент і відліковий пристрій.

3. Вимірювальні установки – це сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювання (мір, вимірювальних пристроїв, перетворювачів) та допоміжних пристроїв, що призначені для вироблення сигналів вимірюваної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприймання.

Залежно від природи вимірюваної величини, будови засобу вимірювання, потрібної точності, зручності і швидкості вимірювання застосовують різні методи вимірювання (сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання).

- метод безпосередньої оцінки – метод вимірювання, при якому значення величини визначають за відліковим пристроєм вимірювального приладу прямої дії (це прилад, в якому передбачене перетворення (одне чи декілька) одержаної інформації в одному напрямі (без зворотного зв'язку)), манометр, термометр, амперметр;

- метод порівняння з мірою – вимірювану величину порівнюють з величиною відтвореною мірою (зважування на терезах при зрівноваженні маси тіла гирями);

- метод протиставлення – це метод, при якому і вимірювана величина і величина, відтворена мірою одночасно впливають на прилад порівняння (знаходження маси на терезах, коли на шальку кладуть і тіло і гирьки);

- диференційований метод – метод порівняння з мірою, коли на прилад впливає різниця вимірюваної величини та відомої величини, яка відтворюється мірою;

- нульовий метод – метод порівняння з мірою, коли результуючий ефект впливу величин на прилад порівняння доводять до нуля (важільні терези, амперметр з нульовою точкою);

- метод заміщення – метод порівняння з мірою, при якому вимірювану величину заміщають відомою величиною, яка відтворюється мірою;

- метод збігів – метод порівняння з мірою, при якому різницю між вимірюваною величиною і величиною, яка відтворюється мірою, знаходять, використовуючи збіг позначок шкали, або періодичних сигналів (ноніус, явище биття, інтерференція, резонанс, стробоскопічний ефект).

2.2. Графічне зображення результатів експерименту

В багатьох випадках при обробці результатів фізичного експерименту слід вдаватися до графічного методу, який дає можливість наочніше подавати результати експерименту — залежність функції y (величина, закономірність якої вивчається) від аргументу x (величина, від зміни якої залежить значення функції), а також графічно знаходити величини y для таких значень x , які безпосередньо вимірюванням не досліджувались, наприклад для значення x , проміжного між двома вимірюваннями x_1 і x_2 (інтерполяція; під інтерполяцією розуміють, по-перше, знаходження значень функції для проміжних значень аргументу x і, по-друге, в чисельному аналізі інтерполяцією називається заміна функції $y = f(x)$ на проміжку $[a, b]$ деякою іншою функцією $\varphi(x)$, яка в точках x_0, x_1, \dots, x_n набуває тих самих значень, що й функція $y = f(x)$).

Мова може йти також про знаходження значень функції $y = f(x)$ для значень аргументу x , менших (або більших), ніж найменше (найбільше) з вимірюваних, — екстраполяцією. Звичайно, при цьому має бути тверда впевненість у тому, що характер залежності $y = f(x)$ для областей, де вимірювання не виконувались, такий самий, як і в областях, де вимірювання виконувались.

При побудові графіків найчастіше використовують прямокутну систему координат. Координатні осі використовують як функціональні шкали. Функціональною шкалою називається множина мічених точок, які відображають окремі значення функції та її аргументу. Шкали можуть бути рівномірними і нерівномірними. Відстань між двома сусідніми мітками шкали називається графічним інтервалом; різниця цих міток дає ціну поділки. На шкалі, як правило, наносять лише “круглі” мітки. Мітки без підписів називаються німими. Часто німі мітки поділяють проміжок між двома підписаними мітками на деяку кількість рівних частин.

Носієм функціональної шкали взагалі може бути і деяка крива лінія. Якщо аргумент виражається в кутових одиницях, зручніше використати полярну систему координат, а не прямокутну.

Для побудови графіків слід насамперед раціонально вибрати масштаб, тобто щоб на графіку цього розміру (аркуш міліметрового паперу) розмістився весь діапазон експериментальних значень фізичних величин, що їх відкладають на координатних осях, і щоб ціна однієї поділки виражалась, по можливості, цілим числом. Одночасно при виборі масштабу слід підпорядковувати точність вимірювання точності відліку за графіком. Крім того, слід акцентувати увагу на чіткому вираженні експериментальних даних (експериментальна крива має бути не дуже крутою і не дуже пологою, бо на таких кривих важко робити відліки). Потрібно, по можливості, використати всю площу графіка (якщо дослідні дані величин x і y набагато відрізняються від нуля, відлік поділок потрібно починати на осях з деяких значень, які трохи менші від одержаних під час досліду). Після нанесення на функціональні шкали міток біля них пишуть необхідні цифри. На кінцях координатних осей (шкал) наносять позначення відкладуваних величин, а одиниці вимірювання їх відокремлюють комою; якщо напис має більше п'яти знаків, то його розміщують вздовж осі, посередині.

Звернемо увагу на те, що числа, знайдені внаслідок вимірювання фізичних величин, є наближеними. Тому замість числа x треба було б писати $x \pm \Delta x$, замість y – число $y \pm \Delta y$. Звідси випливає, що замість точок на графіках треба було б зображати експериментальні дані маленькими прямокутниками з основами $2\Delta x$ і висотами $2\Delta y$, всередині яких і перебувають справжні дані, знайдені в результаті ідеального експерименту (при цьому автоматично виділяються також дані різних авторів). Відповідно до цього можна було б провести дві

граничні криві, між якими очевидно проходить крива, яка зображує, який насправді вигляд має функція $y = f(x)$.

Під час фізичного практикуму звичайно обмежуються нанесенням точок, а потім за допомогою лекал креслять плавну криву так, щоб вона проходила якомога ближче до всіх експериментальних точок і щоб приблизно однакове число точок було по обидві сторони лінії. Крива повинна, як правило, лежати в межах похибок вимірювання. Чим менші ці похибки, тим краще крива збігається з експериментальними точками.

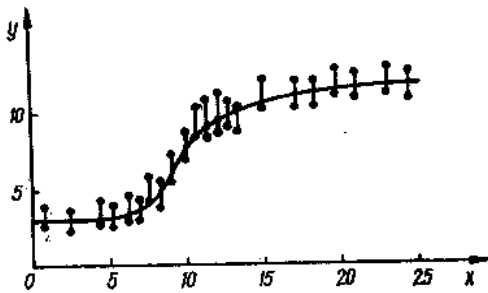


Рис. 1. Графічне подання результатів експерименту

В основному похибки значень функції більші від похибок аргументу, тому на графіках подають лише похибку функції у вигляді відрізка прямої, довжина якої дорівнює подвоєній похибці у певному масштабі. При цьому експериментальна точка міститься всередині цього відрізка, який з обох кінців обмежується рисками (рис. 1).

Точки перегину, максимуму, мінімуму на експериментальних кривих відповідають якісним змінам у системах, наприклад появи нової фази і т. д. У таких точках порушується рівномірність зміни всіх властивостей системи. В областях, близьких до цих сингулярних точок, слід проводити вимірювання значно частіше. Будуючи графіки плавних залежностей, не слід брати багато точок.

Якщо окремі точки значно відхиляються від кривої, то це може свідчити про великі похибки вимірювання або явні промахи. Це, в свою чергу, свідчить про потребу підвищення в цих областях якості вимірювання.

У деяких випадках графічного подання результатів фізичного експерименту доцільно користуватись логарифмічними та напівлогарифмічними функціональними сітками. При цьому слід використовувати друкарським способом зроблений логарифмічний та напівлогарифмічний папір. На логарифмічному папері залежності $y = ax^b$, а на напівлогарифмічному — залежності $y = a^{bx}$ зображують прямими лініями. Логарифмічний масштаб зручний при графічному зображенні величин, границі зміни яких становлять кілька порядків.

Досить часто важливим є питання про подання результатів вимірювання в аналітичній формі. Це питання виведення так званих емпіричних формул іноді можна розв'язати за допомогою

функціональних сіток, на які наносять експериментальні дані. Закон відповідності, на функціональній сітці якого ці дані зображуються практично прямою лінією, придатний для аналітичного описання експериментальної функціональної залежності між фізичними величинами.

2.3. Відомості про вимірювальні прилади

Амперметр (від ампер і metreo(грец.) – вимірюю). Прилад для вимірювання електричного струму. Прообразом сучасних амперметрів був тангенс – гальванометр, що складається із магнітної стрілки, встановленої на вістрі. Вістря розміщене в центрі колової котушки з дротом. При проходженні вздовж провідника електричного струму магнітна стрілка відхиляється на кут, тангенс якого пропорційний значенню сили струму. Амперметр вмикають послідовно з ділянкою електричного кола, на якій проводять виміри. Власний опір амперметра невеликий. Для розширення меж вимірювання паралельно з амперметром вмикають деякий опір. Такий процес називають шунтуванням.

Ампервольтметр, авометр, тестер. Комбінований електро-вимірювальний прилад, який призначений для вимірювання в широких межах постійної та змінної напруги, сили струму, а також електричного опору.

Акселерометр (від лат. accelerare – прискорювати та грец. metreo – вимірюю). Прилад, який призначений для вимірювання прискорення руху тіл. Простий акселерометр складається із маятника і стрілки, які встановлені на рухомому тілі. При прискореному русі тіла маятник відхиляється і зумовлює відхилення стрілки на кут, який пропорційний прискоренню руху тіла. Шкала приладу проградуєвана в одиницях прискорення.

Анемометр – спеціальний прилад для вимірювання швидкості вітру. Ручні анемометри бувають чашечкові та крильчасті. Приймальною частиною чашечкового анемометра є хрестовина з чотирма півкулями, які прикріплені до вертикальної осі, що легко обертається під дією вітру в одну сторону. на кінці осі є гвинт, зв'язаний з шестернями, що приводять у рух дві малих і одну велику стрілки. Стрілки рухаються вздовж циферблатів із поділками. Збоку приладу є аретир, який використовують для вмикання і вимикання лічильника анемометра.

Ареометр (від грец. araios – нещільний, рідкий і metreo – вимірюю). Прилад для вимірювання густини рідини. Найпростіший

ареометр являє собою скляну посудину з тягарцем в середині, яка має довгий відросток із вставленою в нього шкалою. Величина глибини занурення ареометра залежить обернено пропорційно від густини рідини: чим більша густина рідини, тим менше занурюється ареометр. На шкалі нанесені значення густини рідини, які відповідають зануренню ареометра до певної поділки.

Барометр (від грец. baros – вага). Прилад, який призначений для вимірювання атмосферного тиску. Перший барометр, був побудований у 1643 році італійським фізиком Еванджеліста Торічеллі. Він являв собою вертикально розміщену і запаяну з верхнього кінця скляну трубку довжиною 1 м. В трубку наливали ртуть, закривали отвір, перекидали запаяним кінцем вгору, а нижній кінець опускали у відкриту посудину з ртуттю. Отвір трубки відкривали, під дією сили тяжіння частина ртуті виливалася з трубки в посудину. У трубці встановлювався рівень ртуті, який був прямо пропорційний атмосферному тиску. За нормальний атмосферний тиск прийняли висоту рівня ртуті – 760 мм.

Барометр – анероїд (від грец. a – повне заперечення, peros – вологий, eidos – вид). Прилад для вимірювання атмосферного тиску. У більшості випадків барометр – анероїд являє собою гофровану, мембранну, круглу коробку, з якої викачане повітря. Під дією тиску зовнішнього повітря кришка коробки прогинається. Чим більший тиск, тим більше прогинається кришка. Рух кришки спеціальним механізмом передається стрілкою, що рухається над шкалою, яка проградуєвана в одиницях тиску. В приладі є також термометр, який дає можливість встановити температуру повітря.

Барометр застосовують для вимірювання висоти над рівнем моря. Для цього його градуують у метрах. Такий прилад називається альтиметром. Альтиметри встановлюють на літаках для вимірювання висоти польоту.

Батометр – це прилад для взяття глибинних проб води із морів та океанів і вимірювання температури даного шару води.

Болометр (від гр. bole – кидок)– тепловий неселективний приймач оптичного випромінювання, дія якого ґрунтується на зміні електричного опору термочутливого елемента при нагріванні його внаслідок поглинання вимірюваного потоку випромінювання. Болометр призначений для вимірювання потужності інтегрального (сумарного) електромагнітного випромінювання в оптичному діапазоні, а разом із спектрометром – для вимірювання спектрального

складу випромінювання. Прилад складається з двох тонких чорних металевих пластинок, які увімкнуті у два плеча мостової схеми, з допомогою якої фіксують зміну електричного опору. Випромінювання напрямляють на одну з пластинок, а друга використовується для компенсації зміни температури навколишнього середовища і вилучення впливу інших перешкод. Перший болометр виготовив у 1884 році американський фізик Семюель Ленглей.

Вакуумметр – прилад для вимірювання тиску розріджених газів. Для вимірювання високого вакууму часто використовується компресійний манометр Мак – Леода. Дія манометра ґрунтується на законі Бойля – Маріотта. Манометром Мак – Леода можна виміряти тиски в інтервалі 1330 Па – 1330 мкПа. Використовують також теплові манометри (інтервал вимірюваних тисків від 133 гПа до 1,33 Па). Принцип дії цього манометра, запропонованого Пірані, ґрунтується на лінійній залежності теплопровідності розріджених газів від ступеня розрідження. Поширення набув також іонізаційний манометр (інтервал вимірювання тисків 0,133 Па – 13,3 мкПа), дія якого ґрунтується на залежності іонізаційного струму спеціальної електронної лампи (тріода, в якому, порівняно із звичайним, анод і сітка помінялися місцями і конфігурацією), що з'єднується з вакуумною установкою, від ступеня розрідження.

Варметр- прилад для вимірювання реактивної потужності Q в електричних колах змінного струму: $Q = UI \sin \varphi$, де U – напруга, I – сила струму, φ – зсув фаз між змінним струмом та напругою. Використовується в основному в трифазних колах змінного струму промислової частоти (50 Гц). Схема вмикання варметра така ж, як і ватметра. Основу варметра становить електровимірювальний механізм, звичайно, електродинамічної або феродинамічної системи та електрична схема, яка забезпечує пропорційність показів варметра величині $\sin \varphi$. В якості варметра можна використати ватметр, який вмикають за спеціальною схемою.

Ватметр – прилад для вимірювання потужності в електричних колах (в колах змінного струму – для вимірювання активної потужності $P = UI \cos \varphi$). Послідовне коло ватметра повинно мати малий опір (як у амперметра), а паралельне – великий опір (як у вольтметра). При вимірюваннях на змінному струмі важливо також, щоб опір паралельного кола був чисто активним. Основною частиною ватметра є електровимірювальний механізм, як правило,

електродинамічної або феродинамічної системи, рідше – індукційної або електростатичної.

Веберметр (флюксометр) – прилад для вимірювання магнітного потоку.

Віскозиметр – прилад для вимірювання коефіцієнта в'язкості рідин і газів. Віскозиметр Освальда – Пінкевича являє собою U – подібну скляну трубку. Одне коліно її має кулясте розширення, обмежене двома позначками для відлічування об'єму досліджуваної рідини, і впаяний капіляр; друге коліно з розширенням призначене для зливання рідини, що протікає через капіляр. Вимірюють час витікання через капіляр рідини з відомою та невідомою в'язкістю. Таким порівняльним методом знаходять невідому в'язкість рідини.

Вольтметр – прилад для вимірювання електричної напруги (різниці потенціалів) в колах постійного і змінного струму. Вольтметр вмикають в коло паралельно ділянці, на якій вимірюють напругу. Опір вольтметра великий. Для розширення меж вимірювання вольтметра, послідовно з ним вмикають додатковий резистор. Вольтметри бувають демонстраційні, лабораторні, щитові. Залежно від використовуваного у приладі принципу взаємодії розрізняють такі системи електровимірювальних приладів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, електростатичну, термоелектричну, вібраційну, електронну та цифрові прилади.

Гальванометр (гальвано і метр). Електровимірювальний прилад високої чутливості для вимірювання малих струмів напруг і кількості електрики (балістичний гальванометр). Гальванометри широко використовуються в якості нульового індикатора для виявлення відсутності електричного струму в електричному колі або нульової різниці потенціалів між деякими двома точками кола. Найбільшого поширення набули гальванометри постійного струму з магнітоелектричним вимірювальним механізмом.

В колах змінного струму низької частоти (30 – 100 Гц) використовують вібраційні гальванометри.

Гігрометри (від грец. *hygros* – вологий). Прилад для вимірювання вологості повітря. Відносну вологість повітря можна вимірювати волосяним або плівковим гігрометром. Дія волосяного гігрометра ґрунтується на властивості обезжиреної людської волосини змінювати свою довжину при зміні вологості повітря. Їх використовують в основному для вимірювання вологості повітря

взимку при температурі нижче ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). На шкалі приладу нанесено 100 нерівномірних поділок від 0 до 100.

Індикатором вологості плівкового гігрометра служить мембрана з гігроскопічної тваринної плівки, якою обтягнуте металеве кільце. В покази отримані з допомогою волосяного та плівкового гігрометрів вводять поправки на вплив температури.

Вологість повітря методом точки роси визначають гігрометром Ламбрехра. Він складається з тонкого металевого відполірованого диска, на зворотному боці якого є резервуар. В нього наливають ефір і ставлять в отвір термометр. Через другий отвір за допомогою груші продувають повітря. Ефір швидко випаровується і диск при цьому охолоджується. При деякій температурі диска на ньому сконденсується волога з повітря. Ця температура і є точкою роси.

Гоніометр (від грец. *gonia* – кут) – прилад для вимірювання кутів між гранями кристалів або кутів між плоскими поверхнями, які здатні відбивати світлові промені. До відкриття рентгеноструктурного аналізу гоніометричний метод був основним для опису та ідентифікації кристалів.

Гравіметр – прилад для вимірювання прискорення вільного падіння в різних місцях земної поверхні (різновид пружинних терезів).

Динамометр (від грец. *dynamis* – сила). Прилад для вимірювання сили і моменту сили. Складається із пружного елемента і відлікового пристрою.

Дозиметр – прилад для вимірювання дози або потужності дози радіоактивного випромінювання.

Інтерферометр – це вимірювальний прилад дія якого ґрунтується на інтерференції хвиль. Оптичний інтерферометр використовують для вимірювання довжини хвилі спектральних ліній, показників заломлення прозорих середовищ, абсолютної і відносної довжини об'єктів, кутових розмірів зірок, контролю якості оптичних деталей, якості обробки поверхонь та інше. Принцип дії усіх інтерферометрів однаковий, і розрізняються вони лише методами отримання когерентних хвиль і тим, яка величина безпосередньо вимірюється.

За числом інтерферованих пучків розрізняють багатопроменеві та двоохпроменеві інтерферометри. Багатопроменеві інтерферометри використовують переважно як інтерференційні спектральні прилади для дослідження спектрального складу світла. Двоохпроменеві інтерферометри використовують і як спектральні прилади, і як

прилади для фізичних та технічних вимірювань.

Прикладом двохпроменевого інтерферометра є інтерферометр Майкельсона. З його допомогою вперше була виміряна абсолютна величина довжини світлової хвилі, доведено незалежність швидкості світла від руху джерела. Він використовується і як спектральний прилад, з допомогою якого можна аналізувати спектри випромінювання з роздільною здатністю до $0,005 \text{ см}^{-1}$.

Інтерферометр Майкельсона використовують в техніці для абсолютних та відносних вимірювань довжин еталонних пластин з точністю до $0,005 \text{ мкм}$. В поєднанні з мікроскопом він дає можливість за виглядом інтерференційної картини вимірювати величину та форму мікронерівностей металевих поверхонь. Двохпроменеві інтерферометри (наприклад, інтерферометр Жамена), які застосовують для вимірювань показників заломлення газів та рідин називають інтерференційними рефрактометрами.

Для вимірювання кутових розмірів зірок і кутових відстаней між зірками використовують зірковий інтерферометр Майкельсона.

З допомогою багатопроменевого інтерферометра Фабрі – Перо розкладають складне випромінювання у спектр і використовують його як інтерференційний спектральний прилад з високою роздільною здатністю.

Використання у вимірювальних інтерферометрах в якості джерел світла лазерів, які мають високу монохроматичність та когерентність, дозволяє значно підвищити точність вимірювань.

Калориметр (від лат. calor – тепло). Прилад, яким користуються для вимірювання теплового ефекту будь – якого процесу(фізичного, хімічного або біологічного), а також для вимірювання питомої теплоємності тіл і питомої теплоти фазових переходів. Перший калориметр виготовили в 1777 році французькі дослідники Антуан Лоран Лавуазьє(1743–1794) і П'єр Сімон Лаплас (1749–1827). Цей прилад, названий пізніше “крижаний калориметр”, являє собою дві вставлені одна в одну посудини. Простір між посудинами заповнюється сумішшю води з льодом. Досліджуваний процес відбувається у внутрішній посудині, а його тепловий ефект визначається за масою розплавленого льоду. При дослідженні процесів з від’ємним тепловим ефектом простір між посудинами заповнюють водою, яку беруть при 0°C . Тепловий ефект процесу при цьому пропорційний масі утвореного льоду.

Сучасні калориметри працюють в діапазоні температур від $0,1$

до 3500 К і дають можливість вимірювати кількість теплоти з точністю до 10^{-2} %. Конструкції калориметрів бувають різноманітними, вони визначаються характером і тривалістю досліджуваного процесу, областю температур, при яких проводять вимірювання, кількістю вимірюваної теплоти і необхідною точністю. Калориметр, який призначений для вимірювання сумарної кількості теплоти Q , що виділяється від початку процесу до його завершення, називається калориметром – інтегратором. За конструкцією калориметричної системи і методом вимірювання розрізняють рідинні та масивні калориметри, одинарні і подвійні (диференціальні).

Катетометр, призначений для вимірювання відстаней між двома точками, які розміщені по вертикалі на недоступних для безпосереднього вимірювання об'єктах. Катетометр складається з металевої колони, яка розміщується точно вертикально. На колонці розміщена вимірювальна каретка із зоровою трубою та відліковим мікроскопом. наведення зорової труби катетометра на характерні точки здійснюється у два етапи спеціальними мікрометричними гвинтами.

Куметр (вимірювач добротності). Прилад для вимірювання добротності Q елементів електричних кіл: котушок індуктивності, конденсаторів, коливальних контурів та інших.

Дія куметра ґрунтується на резонансному методі вимірювання: при резонансі напруг в коливальному контурі, який складається із послідовно з'єднаних індуктивності та ємності, напруга на індуктивності або ємності в Q разів більша від напруги, яка подається на контур.

Курвіметр (від лат. *curvus* – кривий). Прилад, який призначений для вимірювання довжини кривих ліній на картах і планах.

Логометр (від грец. *logos* – слово, тут – співвідношення) – електровимірювальний механізм, переміщення (кут повороту) рухомої частини якого пропорційне відношенню сил двох порівнювальних струмів. Логометри бувають магнітоелектричної, електродинамічної, феродинамічної, електромагнітної систем. Крім приладів для безпосереднього вимірювання відношення сил електричних струмів, логометри широко використовують в якості основної складової частини приладів для вимірювання зосереджених пасивних параметрів електричних кіл: опорів, індуктивностей, ємностей, а також в багаточисельній групі приладів для вимірювання

неелектричних величин електричними методами: рівнеміри, витратоміри.

Люксметр (від лат. *lux* – світло). Прилад для вимірювання освітленості, один із видів фотометрів. Найпростіший люксметр складається із фотоелемента, реєстратора фотоструму і джерела живлення. Чутливість такого люксметра змінюють, міняючи параметри електричного кола. Для вимірювання великих значень освітленості світловий потік, що падає на люксметр зменшують шляхом розміщення на його шляху світлофільтрів або розсіювачів світла з відомим коефіцієнтом пропускання. Для правильного вимірювання освітленості необхідно, щоб крива спектральної чутливості співпадала з кривою спектральної чутливості людського ока.

Магнітний спектрометр – прилад для вимірювання імпульсів заряджених частинок за кривизною їх траєкторій в магнітному полі. Якщо при цьому вимірюється швидкість частинки, то можна визначити її масу, тобто ідентифікувати частинку. Магнітні спектрометри використовуються для дослідження β – розпаду ядерних реакцій та інших явищ, в яких беруть участь елементарні заряджені частинки невеликих енергій. Енергетичний спектр частинок досліджують змінюючи величину магнітного поля.

Магнітометр – прилад для вимірювання характеристик магнітного поля і магнітних властивостей фізичних об'єктів. Магнітометри класифікують за призначенням, принципом дії і умовами експлуатації.

При класифікації за призначенням виділяють дві групи магнітометрів. До першої, більш поширеної, належать прилади для вимірювання основних характеристик магнітного поля: напруженості H (А/м), індукції B (Тл), магнітного потоку Φ (Вб); до другої – прилади для вимірювання магнітних властивостей матеріалів та гірських порід: магнітний момент M (А·м²), намагніченість J (А/м), магнітну сприйнятливості χ , магнітні проникність μ .

Крім загальної назви «магнітометр» деякі із цих приладів називають у відповідності з назвою одиниць вимірювання: тесламетр, веберметр, або назвою величини: каппаметр, мюметр.

За принципом дії розрізняють такі магнітометри: магнітостатичні, електричні, індукційні, квантові, гальваномагнітні. Є також магнітометри експериментального, прикладного і демонстраційного характеру, робота яких ґрунтується на зміні

довжини намагніченого стержня, на обертанні площини поляризації світла і т.д. Магнітометри кожного з вказаних типів додатково розрізняють за основними показниками: діапазону вимірювань, чутливості, точності, швидкості і способу підрахунку, а також за умовами експлуатації. Зокрема розроблені різноманітні типи магнітометрів для вимірювань магнітного поля в умовах морської та аеромагнітної зйомки, в навколосемному і міжпланетному космічному просторі.

Манометр (від грец. manos – нещільний) – прилад для вимірювання тиску газів і рідин. У гідравлічних манометрах тиск вимірюється за висотою стовпа рідини, яка його зрівноважує. Манометри бувають рідинні та механічні (пружні та поршневі). Крім того, використовують електричні манометри, за допомогою яких величина тиску газів визначається опосередковано (наприклад, за зміною опору провідників).

Манометричний термометр, складається із балона, який з'єднаний капіляром з пружинним манометром. Дія манометричного термометра ґрунтується на тепловому розширенні рідини або на температурній залежності тиску газу чи насиченої пари, яка заповнює балон. В залежності від того, чим заповнений балон, розрізняють газові (азот), рідинні (ртуть) і конденсаційні (хлористий етил) манометричні термометри. Їх використовують в якості приладів технічного призначення в діапазоні температур від – 60 до + 550 °С. При великій довжині капіляра (до 60 м) вони можуть використовуватися як дистанційні термометри.

Мас-спектрометр – прилад для розділення іонізованих молекул і атомів за їх масами, який ґрунтується на дії магнітного і електричного полів на пучки іонів, що летять у вакуумі. У мас-спектрометрах реєстрація іонів здійснюється електричними методами, а у мас-спектрографах – за потемнінням fotocутливого шару. Мас-спектрометр, як правило, містить пристрій для підготовки досліджуваної речовини, іонне джерело, де ця речовина частково іонізується і відбувається формування іонного пучка, мас-аналізатор, в якому відбувається розділення іонів за величиною $\frac{m}{q}$, приймач іонів, де іонний струм перетворюється в електричний сигнал, який підсилюється і реєструється. В реєструючий пристрій, крім інформації про кількість іонів, з аналізатора надходить також інформація про їх масу. Мас-спектрометри містять системи

електричного живлення і пристрої, які утворюють та підтримують високий вакуум в іонному джерелі та аналізаторі. Мас-спектрометри з'єднують з ЕОМ.

Мікрометр (від грец. mikros – малий) – прилад для вимірювання невеликих розмірів з точністю до 0,01 мм. Він складається із сталюї скоби, що має нерухому опорну п'яту, стебла, мікрометричного гвинта і стопорного гвинта. Мікрометричний гвинт переміщується всередині спеціальної гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі. Крок гвинта 0,5–1,0 мм. Зовні стебло охоплює барабан, який з'єднаний з мікрометричним гвинтом. При обертанні барабана обертається і гвинт; при цьому переміщується його вимірювальна поверхня. Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступальне переміщення, пропорційне куту повороту. Скошений обід барабана поділено на 50 (або 100) однакових поділок. Для відлічування показів мікрометра по шкалі стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. Для відлічування сотих часток міліметра користуються поділками на барабані.

Мікрометр використовують для точних вимірювань зовнішніх розмірів деталей: діаметрів, товщин, довжин. Різьбовий мікрометр використовують для вимірювання різьби.

Мікрометр голографічний. За основними характеристиками – точності, розмірах і роздільній здатності – він являє собою вимірювальний прилад нового покоління. Утворюючи голографічне зображення досліджуваного об'єкта, такий прилад дозволяє бачити його деталі розміром в соті долі мікрометра. Це необхідно при виготовлення напівпровідникових мікросхем, оптичних, волоконних виробів та ін. Сконструйовано голографічний мікрометр у Петербурзькому інституті ядерної фізики ім. Б.П. Константинова, в лабораторії голографії та голографічних вимірювальних систем. Його комп'ютерна версія (варіант, який призначений для роботи із персональною ЕОМ) суттєво розширює можливості мікроскопічних досліджень, дозволяючи коректувати не лише систематичну похибку вимірювань, але й неточності, які пов'язані із змінами температури досліджуваного об'єкта.

Омегатрон-мас-спектрометр, в якому розділення іонів, з різним відношенням $\frac{m}{q}$ відбувається у взаємно перпендикулярних змінному електричному і постійному магнітному полях. Роздільна здатність

омегатрона зменшується із збільшенням маси частинки. Омегатрон використовують для визначення складу та вимірювання парціальних тисків залишкових газів у вакуумних системах.

Омметр – прилад для вимірювання електричного (омічного) опору. В залежності від діапазону вимірювань розрізняють мікроомметри, мегомметри, тераомметри. В найпростіших омметрах з магнітоелектричним вимірювальним механізмом реалізується метод вольтметра – амперметра: при постійній напрузі джерела живлення сила струму, яка протікає через рухому рамку механізму, і відхилення покажчика залежать від вимірюваного опору. Широкого поширення набули цифрові омметри, вхідні кола яких являють собою вимірювальний міст.

Оптиметр – це оптико – механічний прилад для вимірювання лінійних відстаней абсолютним або відносним (порівняння з кінцевою мірою або зразковою деталлю) способами. Вимірювальний стержень при поступальному русі вздовж деталі повертає спеціальне дзеркало, в якому зображується шкала, розміщена у фокальній площині об'єктива. При переміщенні вимірювального стержня зображення шкали зміщується залежно від повороту дзеркала паралельно шкалі. Величина зміщення відраховується відносно нерухомого покажчика. За способом кріплення трубки, в якій розміщена оптична система приладу, оптиметри поділяють на вертикальні (для зовнішніх вимірювань) і горизонтальні (для зовнішніх і внутрішніх вимірювань).

Пермеаметр (буквально – вимірювач проникності, від англ. permeability – проникність) – пристрій для вимірювання магнітних характеристик зразків незамкнутої форми (прямих стержнів, стрічок, трубок та ін.). Пермеаметр складається із ярма, яке має рухомі частини, або полюсні наконечники. Досліджуваний зразок утворює з ярмом замкнуте магнітне коло. На ярмі розміщені намагнічуванні котушки і пристрої для вимірювання індукції B і напруженості H магнітного поля у зразку. Магнітну проникність μ матеріалу зразка визначають за співвідношенням $\mu = \frac{B}{H}$.

Пікнометр (від грец. Puknos – щільний) – це скляна посудина відповідного об'єму, яка використовується для визначення густини речовини за співвідношенням $\rho = \frac{m}{V}$. Об'єм досліджуваної речовини вимірюють за шкалою або за мітками на посудині.

Піргеліометр – це прилад, який дозволяє виміряти в абсолютних

енергетичних одиницях густину сонячної радіації біля поверхні Землі. Спрощену модель такого приладу і методику вимірювання з його допомогою сонячної радіації запропонував голландський астрофізик М. Міннарт. В даний час дійсне значення сонячної сталої (енергія сонячного випромінювання, яка падає за 1 с на площу 1 м^2 , що знаходиться на межі із земною атмосферою) отримують, проводячи вимірювання з допомогою космічних апаратів.

Пірометр (від грец. *pyr* – вогонь) – прилад для дистанційного вимірювання температури нагрітих тіл за інтенсивністю їх теплового випромінювання в оптичному діапазоні спектру. Тіло, температуру якого вимірюють при допомозі пірометра має перебувати в стані теплової рівноваги і його коефіцієнт поглинання повинен бути близьким до одиниці. Використовують яскравісні, кольорові та радіаційні пірометри. В найпростішому візуальному яскравісному пірометрі із зникаючою ниткою об'єктив фокусує зображення досліджуваного тіла на площину, в якій знаходиться нитка спеціальної лампи розжарювання. Нитку розміщують на фоні зображення тіла і, змінюючи струм розжарення нитки, досягають того, щоб яскравість нитки і тіла були однаковими (нитка стає непомітною на фоні тіла). Шкалу приладу, який фіксує струм розжарення, градуують у $^{\circ}\text{C}$ або K .

В радіаційних пірометрах, або ардометрах, використовують інфрачервоне випромінювання досліджуваного тіла: воно концентрується на термопарі, яка знаходиться всередині пірометра. Наводячи трубу з об'єктивом на розжарене тіло, слідкують за показами гальванометра, який з'єднаний з термопарою. Шкала гальванометра градуйована в градусах. Випромінювання тіла концентрується лінзою на спаї термопари, а термо-ЕРС, яка виникає при цьому, фіксується гальванометром.

Пірометри використовують у металургії, енергетиці, хімії та ін.

Поляриметр:

1) Прилад для вимірювання кута обертання площини поляризації монохроматичного світла оптично активними речовинами. В поляриметрах, які побудовані за схемою напівтіньових приладів вимірювання зводиться до візуального вирівнювання яскравостей двох половин поля зору приладу. Покази знімаються за шкалою обертання, яка має ноніус. Прилад використовують для визначення концентрації активної речовини в неактивному розчиннику (наприклад, концентрації розчину цукру у воді).

2) Прилад для визначення ступеня поляризації частково поляризованого світла. Найпростіший такий прилад – напівтіньовий поляриметр Корню, призначений для визначення ступеня лінійної поляризації поляризації. Основними його елементами є поляризатор (призма Волланстона) і аналізатор. Поворотом аналізатора вирівнюють яскравості полів, освітлених пучками, які при виході із призми мають неоднакову інтенсивність.

Потенціометр (від лат. *potentia* – сила) – прилад для вимірювання компенсаційним методом ЕРС, напруги, а також величин зв'язаних з ними функціонально. Розрізняють потенціометри постійного та змінного струму. В потенціометрах постійного струму вимірювана ЕРС компенсується відомою регульованою напругою. Момент рівноваги визначають за показами гальванометра (струм через гальванометр відсутній). Для вимірювання неелектричних величин використовують автоматичні потенціометри, в яких замість гальванометра вмикають підсилювач. Найбільшого поширення набули автоматичні потенціометри для вимірювання температури в комплекті з термопарами.

Психрометр (від грец. *psychiria* – холод) – прилад для вимірювання температури та відносної вологості повітря за показами сухого та зволоженого термометрів. Вперше цей прилад сконструював в 1825 році німецький фізик та винахідник Е.Ф. Август. Користуються також аспіраційним психрометром Асмана з примусовим обдуванням повітря.

П'єзометри (від грец. *piezo* – тисну) – прилад для визначення зміни об'єму речовини під гідростатичним тиском (при практично постійній температурі). Конструкція п'єзометра визначається діапазоном використовуваних тисків і температур, агрегатним станом речовини, його стисненістю. П'єзометричні вимірювання використовують для отримання даних про стисненість речовини, для дослідження діаграм стану, фазових переходів та інших фізико - хімічних процесів.

Радіометр (від лат. *radio* – випромінюю):

1) прилад для вимірювання енергії електромагнітного випромінювання, який ґрунтується на його тепловій дії. Використовують для дослідження інфрачервоного випромінювання, сонячної радіації (наприклад в актинометрі, піргеліометрі);

2) приймальний пристрій радіотелескопа, який в поєднанні з антеною дозволяє досліджувати випромінювання астрономічних об'єктів в радіодіапазоні;

3) прилад для вимірювання активності радіоактивних джерел;

Радіометр акустичний – прилад для вимірювання тиску звукової хвилі, густини звукової енергії, інтенсивності звуку та інших параметрів звукової хвилі.

Радіотермометр. Температура різних частин організму, його внутрішніх органів різна і змінюється в залежності від їх стану. Так що за температурою органу та її динаміці можна судити про те, як він функціонує і навіть ставити діагноз. Але вимірювати температуру внутрішніх органів складно. Спеціалісти фірми РЕС при Всеросійському НІІ радіотехніки розробили прилад (радіотермометр РТМ – 01), який дозволяє точно визначати температуру за інтенсивністю електромагнітного випромінювання внутрішніх тканин людини в діапазоні надвисоких частот. Прилад може фіксувати інформацію, яка поступає з глибини до 10 см, що в більшості випадків достатньо для обстеження внутрішніх органів людини.

Рефрактометр (від грец. refraktus – заломлення) – прилад для вимірювання показника заломлення світла у газоподібних, рідких і твердих речовинах. Принцип дії цих приладів ґрунтується на явищі повного внутрішнього відбивання при проходженні світлом межі поділу двох середовищ з різними показниками заломлення. Один із перших рефрактометрів сконструював М.Д. Пильчиков

Світлодальномір (дальномір оптичний) – прилад для визначення відстаней за часом їх проходження світлом. Прилад містить джерело оптичного випромінювання, пристрій керування його параметрами, передавальну та приймальну системи і пристрій вимірювання інтервалів часу. Світлодальноміри поділяються на імпульсні та фазові в залежності від методів визначення часу проходження випромінюванням шляху до об'єкта і назад.

Склерометр (від грец. sklērós – твердий) – прилад для визначення твердості різних матеріалів (металів, кристалів, покриттів та ін.) за методом подряпин або вдавлень. Твердість матеріалу визначається за навантаженням, при якому залишається подряпина або ямка.

Спектрометр – в широкому розумінні – це пристрій для вимірювання функції розподілу деякої фізичної величини f в залежності від деякого параметра x . Функцію розподілу електронів за

швидкостями вимірюють бета – спектрометром, атомів за масами – мас – спектрометром, гама квантів за енергією – гама – спектрометром, енергію світлових потоків за довжинами хвиль випромінювання – оптичний спектрометр. У вузькому розумінні спектрометрами називають спектральні прилади для дослідження оптичних спектрів з допомогою фотоелектричних приймачів випромінювання.

Спектрофотометр – спектральний прилад, з допомогою якого порівнюють вимірюваний потік випромінювання з еталонним для неперервного або дискретного ряду довжин хвиль випромінювання. Спектро-фотометр забезпечує відлік або автоматичну реєстрацію результатів порівняння у відповідній двомірній шкалі: абсциса – довжина хвилі, ордината – потік випромінювання на цій довжині хвилі. Спектрофото-метрами називають також аналітичні прилади для визначення концентрації елементів і речовин в пробі шляхом порівняння інтенсивностей спектральних ліній або смуг випромінювання чи поглинання.

Спірометр – пристрій для вимірювання об'єму повітря у легенях.

Тахометр (від грец. tachys – швидкий) – прилад для вимірювання кутової швидкості або частоти обертання твердого тіла. Кут, на який відхиляється укріплений на валу стержень, пропорційний кутовій швидкості його обертання.

Термометри (від грец. thérme – тепло) – прилади для вимірювання температури за допомогою контакту з досліджуванним середовищем. Перші термометри з'явилися в кін. 16 – поч. 17 століть (термоскоп Г. Галілея, 1597; спиртові флорентійські термометри та ін.), а сам термін «термометр» з'явився у 1636 році. Дія термометрів ґрунтується на різних фізичних явищах, які залежать від температури: на тепловому розширенні рідин, газів і твердих тіл; зміні з температурою тиску газу або насиченої пари; електричного опору; термо-ЕРС; магнітної сприйнятливості парамагнетика та ін. Найбільш поширеними є рідинні термометри, манометричні термометри, термометри опору, термоелектричні термометри. Для вимірювання низьких температур використовують, крім того, конденсаційні, газові, акустичні, магнітні термометри. Існують термометри спеціального призначення, наприклад, гіпсотермометри, метеорологічні, глибоководні. Іноді використовують: біметалеві термометри, дія яких ґрунтується на різному тепловому розширенні

речовин, з яких виготовлені пластини їх чутливих елементів; кварцові термометри, дія яких ґрунтується на температурній залежності резонансної частоти п'єзокварца; ємнісні термометри, які ґрунтуються на залежності діелектричної проникності сегнетоелектриків від температури та ін.

Тесламетр – магнітометр для вимірювання магнітної індукції або напруженості магнітного поля у неферромагнітному середовищі. Найбільш поширені індукційні тесламетри, які складаються з індукційного перетворювача (катушки) та електровимірювального приладу. При зміні потокозчеплення індукційного перетворювача з магнітним полем, індукцію якого потрібно визначити, в перетворювачі виникає ЕРС, яка вимірюється приладом. В постійних магнітних полях потокозчеплення змінюється за рахунок переміщення індукційного перетворювача, а у змінних магнітних полях – за рахунок зміни величини і напряму поля. У випадку постійних полів в якості вимірювальних приладів використовують флюксометри, а у випадку змінних – вольтметри, осцилографи.

Трибометр (від грец. *tribos* – тертя) – прилад для вимірювання сили тертя або коефіцієнта тертя. В найпростішому випадку він являє собою брусок (при вимірюванні сили і коефіцієнта тертя ковзання) або циліндр (при вимірюванні сили і коефіцієнта тертя кочення), які зроблені із досліджуваного матеріалу і з'єднані з динамометром. Прикладаючи до вільного кінця динамометра певне зусилля, змушуємо брусок ковзати, а циліндр котитися рівномірно на досліджуваній поверхні. Покази динамометра при цьому рівні силі тертя, а коефіцієнт тертя обчислюють за законом Кулона – Амонтона.

Фазометр – прилад для вимірювання різниці фаз двох електричних коливань або коефіцієнта потужності при великих значеннях сили струму в електричних колах. Використовується в енергетиці, електротехніці, радіотехніці, а як складова частина вимірювальних систем – в радіонавігації, радіотелеметрії, при контролі розмірів деталей та ін.

Фарадметр – прилад для вимірювання електричної ємності. Використовуються фарадметри з електровимірювальним механізмом і на основі вимірювального містка (для точніших вимірювань). В обох випадках вимірювання виконують методом порівняння вимірюваної ємності C_x з еталонною ємністю C_0 , яка вміщена у фарадметрі. Основною частиною фарадметра з електровимірювальним механізмом є логометр електродинамічної,

феродинамічної або іншої системи, при допомозі якого вимірюють відношення струмів у двох електричних колах, кожне з яких містить одну із ємностей C_x і C_0 .

Флуориметр – спектральний прилад, для вимірювання інтенсивності флуоресценції. Використовується в люмінесцентному аналізі. Флуориметр, до складу якого входить монохроматор, дозволяє досліджувати спектр флуоресценції і називається спектрофлуориметром.

Флюксметр (від лат. fluxus – плин, перебіг), веберметр – прилад для вимірювання магнітних потоків. Найпоширеніші флюксметри магнітоелектричної та фотоелектричної систем.

Фотометр (від грец. phōtós – світло) – прилад для вимірювання якоїсь із фотометричних величин, частіше однієї або декількох світлових величин. Фотометр винайшов в 1740 році французький фізик П. Бугер, за допомогою якого він заклав основи фотометричного методу, розробив спосіб вимірювання сили світла. Його прилад мав екран, на який проектувалися тіні від двох однакових стержнів, які знаходилися на однаковій відстані від екрану і освітлювалися порівнювальними джерелами світла також рівновіддаленими від стержнів. Пізніше англійський фізик Б. Румфорт удосконалив цей прилад, переходячи від порівняння тіней до порівняння світла від джерел. Це характерно для сучасної фотометрії, тому інколи саме Румфорта вважають винахідником фотометра. У візуальному фотометрі рівність яскравостей двох полів, які освітлюються порівнювальними потоками випромінювання, встановлюються оком. Фотометри із фізичними приймачами, які перетворюють потік випромінювання в електричний сигнал, мають у своєму складі електронні реєструючі пристрої (гальванометр, мікроамперметр, вольтметр).

Хемілюмінометр (портативний). Цей прилад створений для потреб медицини. Його дія ґрунтується на явищі хемілюмінесценції, тобто свіченні, яке виникає в організмі при біологічних реакціях. Інтенсивність світіння дуже мала, тому його важко реєструвати. Для цього фотодетектор з'єднаний з фотопомножувачем, а той з комп'ютером, який реєструє і обробляє отримані сигнали. В залежності від стану організму інтенсивність і тривалість світіння його біологічної рідини змінюється, і можна зробити висновок про правильність лікування, виявляти патологію, коли вона ще не дала клінічних наслідків, проводити інші дослідження. Хемілюмінометр,

використовуючи 1 см³ біологічної рідини, не більше ніж за 20 хв дає відповідь про стан здоров'я і можливу патологію. Прилад має невеликі розміри, може працювати автономно, а також у поєднанні з комп'ютером.

Частотомір – прилад для вимірювання частоти періодичних процесів (головним чином частоти електричних сигналів). Розрізняють частотоміри з електровимірювальними механізмами, електронні аналогові та цифрові частотоміри. Найпростішими є частотоміри з вібраційним електровимірювальним механізмом. Більшість стрілочних частотомірів з електровимірювальним механізмом виготовляються на основі логометра.

Шумомір – прилад для об'єктивного вимірювання рівня гучності звуку (шуму). Шумомір містить ненапрявлений вимірювальний мікрофон, підсилювач, коректуючі фільтри, детектор і стрілочний індикатор. Будова шумоміра вибрана так, щоб його властивості наближалися до властивостей людського вуха. Чутливість вуха залежить від частоти звуку, а вигляд цієї залежності змінюється із зміною інтенсивності вимірюваного шуму (звуку). Тому шумоміри мають три комплекти фільтрів, які забезпечують потрібну форму частотної характеристики на трьох рівнях гучності. Шкала А відповідає характеристиці при малій гучності (20 – 55 фон), В – середній гучності (55 – 85 фон) і С – великій гучності (85 – 140 фон). Шкала А використовується також для вимірювання рівня гучності звуку в децибелах. Великою величиною рівня гучності звуку в дБ (А) користуються для контролю гучності шуму в промисловості, житлових будинках і на транспорті.

Яскравомір – фотометричний прилад для вимірювання яскравості (фотометр). Промисловість виготовляє фотометри, з допомогою яких вимірюють яскравість постійних та імпульсних джерел світла. Візуальний фотометр для вимірювання так званої еквівалентної яскравості вбудований у фотоапарати, експонетри, яскравісні пірометри та ін.

2.4. Поняття про похибки вимірювань. Класифікація похибок вимірювання в залежності від причин їх виникнення

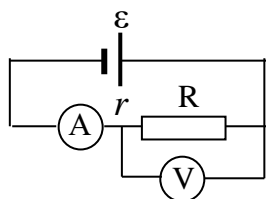
Для практики важливе значення має точність вимірювань. Однак через недосконалість методів і засобів вимірювання, вплив сторонніх факторів, обмежені можливості наших органів чуття результати кожного окремого вимірювання фізичної величини не

співпадають з її істинним значенням. Різницю між результатом вимірювання та істинним значенням вимірюваної величини називають похибкою вимірювання. Оскільки істинне значення фізичної величини одержати неможливо, тому в практиці вимірювань оперують з дійсним значенням, яке є продуктом нашого пізнання, наближеною оцінкою істинного значення.

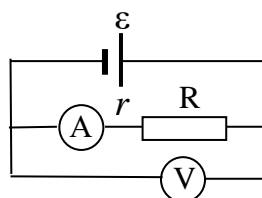
Похибки вимірювання, залежно від причини їх виникнення ділять на: похибки методу вимірювання; інструментальні похибки; похибки, які виникають внаслідок зовнішнього впливу на засоби об'єкти вимірювання; суб'єктивні похибки; похибки відліку.

1. Похибки методу вимірювання. Похибки, які виникають внаслідок недосконалості використовуваного методу вимірювання або через наявність спрощень у застосовуваних емпіричних формулах, називаються похибками методу вимірювань. Так, при вимірюванні діаметра кульки лінійкою допускається більша похибка, ніж при використанні штангенциркуля навіть без врахування ноніусної шкали. Але якщо при допомозі штангенциркуля вимірювати відстань між двома точками на папері, то таке вимірювання не дасть більшої точності ніж вимірювання лінійкою.

Для визначення опору з допомогою вольтметра та амперметра допускають похибки внаслідок того, що не враховують струм у вольтметрі (а) чи опір амперметра (б).



а)



б)

2. Інструментальні похибки. Похибки, які виникають при виготовленні міри або вимірювального приладу, називаються інструментальними або основними.

Всі міри та вимірювальні прилади поділяють на зразкові та робочі. Зразкові міри та вимірювальні прилади служать для відтворення і зберігання одиниць фізичних величин, а також для перевірки та градування інших мір та вимірювальних приладів. Вони дають значення величини, яке приймається за дійсне. Робочі міри та вимірювальні прилади використовують для практичних вимірювань; їх порівнюють із зразковими мірами та вимірювальними

приладами. Вони дають номінальне значення величин. Похибкою міри називають різницю між номінальним та дійсним її значенням. Похибкою вимірювального приладу називають різницю між показами приладу і дійсним значенням вимірюваної величини (визначеним з допомогою більш досконалих методів та засобів вимірювання). Інструментальну похибку, взятую із протилежним знаком, називають поправкою. Поправки, як правило, вказують у технічному паспорті приладу. Якщо засіб вимірювання дає занижене значення, то поправка має знак плюс. При виявленні похибки від несправності приладу потрібно внести поправку до його показів. Наприклад, внаслідок зігнутої стрілки. Якщо термометри при вимірюванні температури танучого льоду показує $+1^{\circ}\text{C}$, то потрібно ввести поправку -1°C . Похибки, які виникають в результаті неправильної установки приладу. Вимірювальні прилади вимагають попередньої перевірки та певної установки. Наприклад, ненавантажені терези повинні бути зрівноважені, перевірено коливання чашок, терези потрібно встановити за рівнем та виском, амперметри, вольтметри потрібно встановлювати в залежності від вказівки на приладі (вертикально чи горизонтально). Похибки, які виникають внаслідок зовнішніх впливів на засоби вимірювання чи об'єкти вимірювання. Розглянемо приклади: Вплив температури. Більшість навчальних вимірювальних приладів дають правильні покази при температурі $+20^{\circ}\text{C}$. При відхиленні від цієї температури результати вимірювань спотворюються. Вплив магнітного поля Землі та магнітних полів струмів усувають екрануванням. У електричних вимірювальних приладах екранування передбачено в їх конструкції, але воно не завжди є повним. Вплив шкідливих вібрацій та струсів усувається шляхом використання пружин, гумових подушок.

Суб'єктивні похибки. До таких похибок належать похибки, які зумовлені індивідуальними властивостями експериментатора. Наприклад, запізнення реакції людини на світловий сигнал лежить у межах $0,15-0,225$ с; на звуковий – $0,082-0,195$ с. Суб'єктивна похибка може бути виявлена при проведенні однакових вимірювань декількома експериментаторами.

Похибки відліку. Похибки, які з'являються внаслідок заокруглення показів вимірювальних приладів до заданого ступеня точності, називаються похибками відліку.

У навчальних вимірюваннях для більш раціонального проведення роботи потрібно до початку вимірювань, в міру

можливого, ліквідувати джерела похибок, які зумовлені зовнішнім впливом на об'єкти та засоби вимірювань, а також неправильною установкою приладу.

Похибки поділяють також на грубі, систематичні та випадкові. Грубі похибки або промахи не беруть до уваги, а замість них проводять повторні вимірювання. Промахи виникають, як правило, через неуважне ставлення до вимірювання або є проявом раптової зміни умов вимірювання (зміна напруги в мережі, зміна температури чи інших параметрів).

Систематичні похибки можуть бути пов'язані з однотипною хибою (наприклад, систематичне заниження якоїсь величини внаслідок зміщення шкали вимірювального приладу). Систематичні похибки зумовлені дією незмінних за величиною і напрямом факторів. Вони сталі за розміром або змінюються за відомими законами. До постійних систематичних похибок належать похибки гир, кінцевих мір довжини, котушок опору. Систематичні похибки включають в себе інструментальні та методичні.

Вся історія розвитку вимірювань показує, що такого роду похибки мають місце навіть у найбільш ретельно проведених вимірюваннях. Свідченням цього є основні фізичні константи, значення яких неодноразово уточнювалося.

У випадку, якщо проводиться одноразове вимірювання якоїсь величини і методичною похибкою можна знехтувати, то інструментальна похибка є визначальною. Її величина вказується в паспорті приладу або знаходиться за його класом точності.

Випадкові похибки – це випадкові відхилення між значеннями окремих вимірювань. Вони обумовлені сукупною дією багатьох причин, кожна з яких вносить незначний вклад в загальну похибку і не може бути врахована наперед. Зокрема вони можуть бути зумовлені як об'єктивними так і суб'єктивними причинами:

а) дією навколишнього середовища (освітленням приладів, зміною температури в процесі вимірювання, змінами напруги в мережі, повітряними течіями);

б) недосконалістю наших органів чуттів (недостатньою гостротою зору та слуху), реакцією на спостереження, психологічним настроєм на вимірювання (увага).

Випадкові похибки не є сталими за абсолютним значенням та за знаком і через це їх не можна усунути введенням спеціальних поправок. Випадкові похибки підлягають статистичним

закономірностям і тому їх значення можна оцінити і тим точніше, чим більше виконано самих вимірювань.

2.5. Оцінка похибок при обробці результатів вимірювань

Як відмічено вище (С.72), вимірювання поділяють на прямі і непрямі або посередні.

При прямих вимірюваннях фізичних величин враховують в основному два види похибок: систематичні та випадкові. Систематичні похибки обумовлені постійно діючими причинами, які односторонньо впливають на результат вимірювання. Ці похибки поділяють на декілька груп:

1) похибки, для яких відомі природа і величина, наприклад, відхилення рівноважного положення покажчика приладу від нульової позначки шкали. Такі похибки враховують введення відповідних поправок;

2) похибки відомого походження, але невідомої величини.

До таких належать неминучі похибки засобів вимірювання або інструментальні похибки. Заводи-виготовлювачі визначають максимальну похибку для всіх приладів певного типу. Її позначають δ . В лабораторіях за інструментальну абсолютну похибку $\Delta x_{\text{ін}}$ беруть значення δ . Точність електровимірювальних приладів, манометрів, деяких мір характеризують класом точності k .

Клас точності – це число, рівне вираженому у відсотках відношенню абсолютної похибки приладу δ до максимального значення вимірювальної ним величини x_{max} :

$$k = \frac{\delta}{x_{\text{max}}} 100 \% \quad (1).$$

Похибки, зумовлені недосконалістю методик вимірювання фізичних величин.

Зменшити систематичні похибки за допомогою повторних вимірювань неможливо. Цього можна досягти лише удосконаленням вимірювальної техніки. уточненням і зміною методик вимірювання.

У фізичних лабораторіях інколи використовують не досить точні прилади, більше того, з невідомим класом точності. На практиці можуть мати місце випадки, коли при повторних вимірюваннях цими приладами отримують однакові результати. В таких випадках абсолютну похибку оцінюють за методом ціни поділки шкали приладу. Приймають, що похибка Δx чисельно рівна ціні поділки

приладу у наступних трьох випадках:

1) коли стрілка приладу коливається біля будь-якої поділки, або між двома сусідніми поділками;

2) коли стрілка зупинилась між поділками шкали і відлік заокруглюють до найближчої цілої поділки;

3) коли стрілка приладу рухається стрибками.

В усіх інших випадках абсолютну похибку Δx беруть рівною половині ціни поділки.

При вимірюванні відлічені покази приладів часто заокруглюються. В результаті виникають похибки відліку або відлічування.

Кожен експериментатор намагається якомога точніше виконати вимірювання. Проте слід чітко усвідомлювати, що відлік «на око» десятих часток поділки навіть при оптимальних умовах не гарантує достатньої надійності. Тому в навчальних лабораторіях рекомендується проводити відлік з точністю не більшою ніж до половини поділки шкали приладу.

Градування шкал вимірювальних приладів проводять так, щоб ціна поділки лежала в інтервалі $[\Delta x_{ін}; 2\Delta x_{ін}]$. Тоді при заокругленні – до половини поділки шкали – абсолютна похибка відлічування Δx_v буде, принаймні, вдвічі меншою інструментальної похибки $\Delta x_{ін}$. Звідки витікає практичне правило: якщо невідома похибка вимірювального приладу, то її можна оціночно вважати рівною половині ціни поділки шкали приладу.

Якщо при повторних вимірюваннях, проведених в однакових контрольованих експериментатором умовах, одержують значення вимірювальної величини, які відрізняються одне від одного, то це означає, що проявляться випадкові похибки.

Випадкові похибки виникають внаслідок дії різних причин, вплив яких важко врахувати. Ці причини призводять до того, що результати повторних вимірювань за тих самих умов трохи відрізняються один від одного.

Правила визначення випадкових похибок вивчаються в теорії похибок – математичній дисципліні, яка базується на законах теорії ймовірностей. Ми наведемо лише деякі висновки з теорії похибок, які необхідні для математичної обробки результатів вимірювання.

Випадкові похибки підпорядковуються нормальному розподілу (розподілу Гаусса).

Для оцінки точності результатів вимірювання частіше всього

користуються стандартною (середньоквадратичною) похибкою, яку знаходять із закону розподілу випадкових похибок.

Оцінкою середньої квадратичної похибки $\sigma_{\bar{x}}$ є величина $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$, яку обчислюють за формулою:

$$\frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2),$$

де \bar{x} - середнє арифметичне значення вимірювальної величини, x_i - результат i -го вимірювання.

Остаточний результат вимірювання записують у вигляді нерівності:

$$\bar{x} - \frac{S_n}{\sqrt{n}} \leq x_0 \leq \bar{x} + \frac{S_n}{\sqrt{n}} \quad (3),$$

або в інтервальній формі:

$$x_0 = \bar{x} \pm \frac{S_n}{\sqrt{n}} \quad (4),$$

де x_0 - дійсне значення вимірювальної величини, яке близьке до істинного значення X і є його найкращою числовою оцінкою.

Проміжок $[\bar{x} - \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + \frac{S_n}{\sqrt{n}}]$, називають надійним або довірчим інтервалом. Підрахунки показують, що цей інтервал, який визначається середньою квадратичною похибкою $\sigma_{\bar{x}}$, містить дійсне значення вимірюваної величини з надійною або довірчою ймовірністю $\alpha = 0,68$; подвоєній середній квадратичній похибці ($2\sigma_{\bar{x}}$) відповідає надійна ймовірність - 0,95, потроєній ($3\sigma_{\bar{x}}$) - 0,997. Можна сформулювати питання інакше: який надійний інтервал слід вибрати, щоб приблизно 81% результатів попали в нього? З таблиці (в додатку) знаходимо, що значенню надійної ймовірності $\alpha = 0,81$ відповідає доля середньої квадратичної похибки $\frac{\Delta x}{\sigma_{\bar{x}}} = 1,3$.

Таким чином, вибраному $\alpha = 0,81$ відповідає надійний інтервал $[\bar{x} - 1,3 \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + 1,3 \frac{S_n}{\sqrt{n}}]$. Отже, для характеристики величини випадкової похибки потрібне знання двох чисел: значення самої похибки (або надійного інтервалу) та значення надійної ймовірності.

Однак користуватись формулами нормального розподілу випадкових похибок для визначення надійного інтервалу при заданій

надійній ймовірності або навпаки можна лише для великої кількості вимірювань (практично при $n \geq 10$). Насправді ж число вимірювань у переважній більшості невелике і часто в лабораторних роботах наукових дослідженнях користуються результатами, які дістали з двох-трьох вимірювань. При малій кількості вимірювань користуються розподілом Стюдента, який дає змогу обчислити значення коефіцієнтів $t_{\alpha,n}$ для будь-якого значення надійної ймовірності α та числа вимірювань n . Значення коефіцієнтів Стюдента $t_{\alpha,n}$ для різних значень α і n наведено в додатку. У цьому разі надійний інтервал випадкової похибки задається аналогічно попередньому: $[\bar{x} - t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}}]$.

Для оцінки точності вимірювань користуються відносною похибкою E , яка визначається таким відношенням:

$$E = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (5).$$

Для оцінки максимально можливих, граничних похибок користуються правилом трьох сигма. Згідно цього правила значення

$3S_n = 3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$ є межею випадкового відхилення спостереження.

Значення відхилення окремого спостереження більше $3S_n$ вважають промахом і при обробці результатів таке вимірювання не враховують.

Інколи на практиці для оцінки випадкової похибки користуються середньою арифметичною похибкою. Хоча вона легше обчислюється, ніж $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$, середню арифметичну похибку використовують рідко, бо для

неї не обчислені відповідні значення надійної ймовірності. Згідно з теорією випадкових похибок, тільки при виконанні десяти і більше дослідів випадкова похибка не перевищує середньої арифметичної похибки:

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad (6).$$

Якщо проведено 7...8 дослідів, то $\Delta \bar{x}$ треба збільшити у два рази, щоб гарантувати належність дійсного значення вимірювальної величини інтервалу $[\bar{x} \pm 2\Delta \bar{x}]$. Якщо буде зроблено п'ять вимірювань, то $\Delta \bar{x}$ доводиться збільшувати в три рази. Потроєну середню арифметичну похибку $3\Delta \bar{x}$ ще називають межею випадкової похибки.

При числі вимірювань $n < 5$ оцінити надійність одержаних результатів за допомогою середньої арифметичної похибки неможливо.

Природно постає питання про кількість повторних вимірювань. Дати відповідь на нього можна лише в ході самого експерименту на основі аналізу одержаних результатів, порівняння випадкової та інструментальної похибок. Ситуація проясняється при двох-трьох повторних вимірюваннях. Якщо результати вимірювань співпадають (випадкові похибки не проявились: вони менші інструментальної), то продовжувати вимірювання немає сенсу. Якщо ж проявляються випадкові похибки (має місце розкид даних), то проводять серію із п'яти-десяти повторних вимірювань.

Одноразові вимірювання не можуть дати достовірних і надійних результатів. Крім того, одиничний результат може бути промахом. В той же час слід зауважити, що в ряді лабораторних робіт з фізики повторні вимірювання за час відведений на виконання роботи провести не вдається (тривале охолодження системи до початкового стану, швидка зміна температури і т.п.). У таких випадках доводиться обмежуватись інструментальними похибками або звертатись до графічного методу обробки результатів вимірювання. Цей метод дозволяє швидко знаходити функціональні залежності між величинами, розраховувати значення різних параметрів, графіки дозволяють легко і швидко виявляти грубі похибки. Для цього первинну графічну обробку даних слід виконувати безпосередньо під час експерименту, тоді передбачуваний хибний результат негайно перевіряється.

Більшість фізичних величин не можна визначити в лабораторних умовах прямими вимірюваннями. У цих випадках використовують непрямі або посередні вимірювання.

Похибки посередніх вимірювань визначаються за похибками безпосередньо виміряних величин. Безпосередньо вимірювані величини вважатимемо аргументами, а посередньо вимірювані – функціями. Якщо посередньо вимірювана величина є функцією багатьох аргументів $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, (7)

то середня квадратична похибка обчислюється за диференціальною формулою

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (8),$$

де Δx_i – величини малі та мають однакове значення надійної ймовірності α .

Відносна середня квадратична похибка посереднього вимірювання

$$E = \pm \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (9)$$

Оскільки $\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = \pm \frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \cdot \Delta x_i$, то

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \cdot \Delta x_i \right)^2} \quad (10)$$

Отже, на практиці для знаходження E треба спочатку функцію прологарифмувати, а потім знайти частинні диференціали натуральних логарифмів кожного з n аргументів.

Як видно, формула (10) значно простіша за формулу (8), тому у випадку, коли залежність (7) виражена формулою, зручною для логарифмування, простіше спочатку визначити відносну похибку за (10), потім з виразу $E = \pm \frac{\Delta y}{y}$ знайти абсолютну похибку. У виразах, які

не піддаються логарифмуванню, простіше відразу обчислити абсолютну, а потім відносну похибки.

При оцінці похибки результату під час непрямих вимірюваннях треба звертати увагу також на те, яка буде внесена систематична похибка внаслідок заокруглення табличних величин, фізичних констант, що входять у робочу формулу.

Числові значення фізичних величин, що містяться у довідкових таблицях, заокруглюють за основними правилами в них наведені лише правильні цифри. Звідси слідує, що різниця між записами в таблиці і незаокругленим значенням будь-якої величини не перевищує половини одиниці останнього розряду заокругленого значення. Наприклад, якщо в таблиці вказано, що густина ртуті $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, то абсолютна похибка $\Delta \rho = 0,605 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Якщо в таблиці значення атмосферного тиску записано у вигляді $p = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, то $\Delta p = 0,005 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Числа, які заносяться в таблицю, часто містять спільний множник виду 10^n , де n – ціле додатне або від'ємне число. Для того, щоб кожного разу не повторювати відповідний множник, в таблицю зручно записувати не саму величину, а зменшену (при $n > 0$) або збільшену (при $n < 0$) в 10^n разів. Наприклад, замість поверхневого натягу $\sigma = 72,8 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ в таблицю заносять величину в 10^{+3} разів більшу,

тобто $\sigma \cdot 10^{+3} = 72,8 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

В таблицях можуть бути наведені і точні значення фізичних величин. Тоді їх похибки, звичайно, рівні нулю. Наприклад, температура танення льоду при нормальному атмосферному тиску рівна 0 °С, значення синуса кута в 30° рівне 0,5.

2.6. Основні методи наближених обчислень

2.6.1. Метод меж

При цьому методі кожне обчислення, пов'язане з розв'язком задачі, необхідно проводити двічі: перший раз для знаходження числа, меншого від шуканого точного результату – нижньої межі (НМ), другий раз – числа, більшого за шукане – верхньої межі (ВМ).

В кінцевому результаті беруть півсуму меж: $a = \frac{(\text{НМ} + \text{ВМ})}{2}$. При цьому межа абсолютної похибки рівна піврізниці меж: $h = \frac{(\text{ВМ} - \text{НМ})}{2}$.

Наведемо правила обчислень НМ і ВМ для чотирьох арифметичних дій:

$\text{НМ}(x+y) = \text{НМ}x + \text{НМ}y$; $\text{ВМ}(x+y) = \text{ВМ}x + \text{ВМ}y$; $\text{НМ}(x-y) = \text{НМ}x - \text{ВМ}y$;
 $\text{ВМ}(x-y) = \text{ВМ}x - \text{НМ}y$;

$$\text{НМ}(x/y) = \frac{\text{НМ}}{\text{ВМ}}; \quad \text{ВМ}(x/y) = \frac{\text{ВМ}}{\text{НМ}}; \quad \text{НМ}(x \cdot y) = \text{НМ}x \cdot \text{НМ}y;$$

$$\text{ВМ}(x \cdot y) = \text{ВМ}x \cdot \text{ВМ}y;$$

Розглянемо приклад обчислень за методом меж.

Приклад. Батарея складається з трьох паралельно з'єднаних конденсаторів ємністю: $C_1 = 10 \pm 1 \text{ мкФ}$, $C_2 = 2 \pm 0,2 \text{ мкФ}$, $C_3 = 2 \pm 0,2 \text{ мкФ}$. Знайдіть електроємність батареї C .

Так, як $C_1 = 10 \pm 1 \text{ мкФ}$, то $9 < C_1 < 11$, $\text{НМ}C_1 = 9$; $\text{ВМ}C_1 = 11$;
 $\text{НМ}C_2 = \text{НМ}C_3 = 1,8$; $\text{ВМ}C_2 = \text{ВМ}C_3 = 2,2$.

Для зручності обчислення меж складають таблицю:

| | НМ | ВМ |
|-------|------|------|
| C_1 | 9 | 11 |
| C_2 | 1,8 | 2,2 |
| C_3 | 1,8 | 2,2 |
| C_4 | 12,6 | 15,4 |

$$C = \frac{12,6 + 15,4}{2} = \frac{28}{2} = 14 \text{ мкФ}; \quad h_c = \frac{15,4 - 12,6}{2} = \frac{2,8}{2} = 1,4 \approx 2 \text{ мкФ}; \quad C = 14 \pm 2 \text{ мкФ}.$$

Метод меж використовується для оцінки похибок результату при розв'язуванні задач і при виконанні лабораторних робіт.

Розглянутий метод меж належить до методу строгого врахування похибок, тобто дозволяє знайти межу абсолютної і відносної похибки результату, що на практиці далеко не завжди обов'язково. В багатьох випадках достатньо визначити число значущих без спеціального обчислення похибок, що значно спрощує хід обчислення.

2.6.2. Метод підрахунку цифр

Метод наближених обчислень, який дозволяє оцінити точність результату за кількістю цифр в компонентах носить назву методу підрахунку цифр.

Застосування цього методу ґрунтується на тому, що кількість правильних значущих цифр наближеного значення числа визначає відносну похибку: чим більше правильних значущих цифр в числі, тим менша його відносна похибка.

Метод підрахунку цифр являє собою систему, в якій операції над наближеними значеннями чисел виконуються загальновідомими способами і лише результат заокруглюють за спеціальними правилами – правилами підрахунку цифр.

Цей метод можна застосовувати тоді, коли якість приладів або метод проведення лабораторних робіт не дає можливості достовірно оцінити похибки вимірювань.

Метод підрахунку цифр полягає в наступному: результати вимірювань вираховують так, щоб в наближеному числі всі цифри були правильними і тільки остання – сумнівна; всі обчислення виконуємо за правилами наближених обчислень; кінцеву похибку обчислень оцінюють двома – трьома одиницями останнього розряду; зняті з мір і вимірювальних приладів результати вимірювань повинні мати не менше двох цифр.

Приклад. Лабораторна робота: «Вимірювання об'єму тіла».

Необхідно виміряти об'єм бруска за його довжиною, шириною і висотою. Нехай шляхом вимірювання штангенциркулем отримані наступні дані:

| | |
|---------|--------------|
| Довжина | $a = 6,2$ мм |
| Ширина | $b = 4,4$ мм |
| Висота | $c = 1,2$ мм |

Обчислюємо площу основи і об'єм тіла, застосовуючи правила дії над наближеними числами: $S = 6,2 \text{ мм} \times 4,4 \text{ мм} = 27,28 \text{ мм}^2 = 27,3 \text{ мм}^2$,
 $V = 27,3 \text{ мм}^2 \times 1,2 \text{ мм} = 32,76 \text{ мм}^3$.

2.6.3. Додавання і віднімання наближених значень чисел

Правило 1. При додаванні і відніманні наближених значень чисел, в записі яких всі цифри правильні, залишають стільки десяткових знаків, скільки їх має наближене дане з найменшим числом десяткових знаків.

Приклад. $6,28+13,1+5,462=24,862\approx 24,9$.

В результаті зберегли один десятковий знак (за правилом заокруглення).

Хоча абсолютна похибка суми невідома, ми можемо зробити висновок: цифри 2 і 4 правильні, цифра 9 сумнівна. Як бачимо отримана сума 24,9 записана в повній відповідності з правилом запису наближених чисел.

Фактично всі рівності в обчисленнях з наближеними значеннями мають наближений характер. Однак для зручності знак наближеної рівності (\approx) будемо використовувати тільки в тих випадках, коли проводиться заокруглення. Тоді коли дія виконується формально точно, будемо умовно використовувати знак точна рівність ($=$).

Задача 1. Знайдіть рівнодійну шести сил, що діють на одну точку вздовж однієї прямої і в одному напрямку, якщо $F_1=2,81$ Н, $F_2=3,35$ Н, $F_3=4,48$ Н, $F_4=5,04$ Н, $F_5=6,50$ Н, $F_6=7,34$ Н.

Розв'язування: $R=2,81+3,35+4,48+5,04+6,50+7,34=29,52$ (Н)

Правило 1 можна застосовувати тоді, коли число доданків порівняно невелика (не більше 12). У фізичних задачах маємо справу з невеликим числом доданків, і тому це правило завжди застосовне.

Задача 2. Електричне коло складається з лампи опором 305 Ом і з'єднувальних проводів опором 0,37 Ом. Знайдіть загальний опір кола.

Розв'язування. $R=305+0,37=305,37$ Ом ≈ 305 Ом.

Правила наближених обчислень показали, що при визначенні загального опору подібного кола опір проводів можна не враховувати. Вчителю фізики необхідно звернути увагу учнів на це, підкреслити, що правила наближених обчислень допомагають в деяких випадках вирішити питання чисто фізичного змісту.

Деякі труднощі можуть виникнути при додаванні цілих чисел, які задані з різною точністю. Розглянемо приклад: знайдіть суму наближених значень чисел, записаних у стандартній формі:

$$x = 2,740 \cdot 10^5 + 2,14 \cdot 10^4 + 8,6 \cdot 10^6.$$

Найпростіше це зробити так: винести множник 10 в найбільшому степені (в даному випадку 10^6) за дужки:

$$x = 10^6 \cdot (0,2740 + 0,0214 + 8,6) = 10^6 \cdot 8,8954 \approx 8,9 \cdot 10^6.$$

При додаванні і відніманні наближених значень чисел, число значущих цифр результату може деколи відрізнятись від числа значущих цифр вихідних даних. Розглянемо це на прикладі задачі.

Задача 3. Дві сили 0,860 і 0,855 Н, прикладені до однієї точки тіла, діють на одній прямій. Знайдіть рівнодійну, якщо сили напрямлені в одну сторону; в протилежні сторони.

Розв'язування: $R_1 = 0,860 + 0,855 = 1,715$ Н, $R_2 = 0,860 - 0,855 = 0,005$ Н.

В першому випадку по числу значущих цифр відповідь точніша вихідних даних, тобто отримали «підвищення точності»; в другому випадку відповідь менш точна ніж вихідні дані, тобто відбулось «зниження точності».

При різниці близьких чисел відбувається «зменшення точності». Це явище у фізичних задачах зустрічається при застосуванні формул, які містять різницю величин, наприклад: $R = F_1 - F_2$, $a = \frac{v - v_0}{t}$,

$$Q = cm(t_2 - t_1) \text{ і ін.}$$

Крім того, зі «зниженням точності» ми зустрічаємось при вимірюваннях в лабораторних роботах.

Щоб цього не було, необхідно вибирати компоненти різниці так, щоб вони не були числами, близькими один до одного. В окремих випадках можна уникнути «зменшення точності» шляхом алгебраїчних перетворень.

2.6.4. Множення і ділення наближених значень чисел

При множенні і діленні часто намагаються отримати як можна більше цифр, розраховуючи цим підвищити точність результату. В дійсності похибка обчислень повинна відповідати похибкам вимірювань, так як неточність вимірювань не можна подолати підвищенням точності обчислень.

Правило 2. При множенні і діленні наближених значень чисел потрібно зберігати в результаті стільки значущих цифр, скільки має наближене дане з найменшим числом значущих цифр.

Задача 4. Сила струму у провіднику рівна 1,5 А. Яка кількість електричного заряду протече через поперечний переріз провідника за 25 с?

Розв'язування. $q = 1,5 \cdot 25 = 37,5$ Кл ≈ 38 Кл.

Так, як наближені множники мають по дві значущі цифри, то в

відповідності з правилом 2 зберігаємо у відповіді дві значущих цифри, застосовуючи заокруглення.

Можна показати, границя абсолютної похибки числа 37,5 біля двох одиниць. Звідси слідує, що друга значуща цифра цього числа сумнівна, тому третя цифра повинна бути відкинута, що і було зроблено при розв'язуванні задачі.

Задача 5. ЕРС лужного акумулятора рівна 1,25 В. Яка ЕРС батареї, яка складається з трьох послідовно з'єднаних акумуляторів?

Розв'язування. Особливість цього прикладу полягає в тому, що другий множник точний. В подібних випадках точність добутого результату визначається виключно точністю наближеного множника.

Задача 6. За який час світло пройде відстань від Сонця до Землі, яка рівна $1,50 \cdot 10^8$ км, якщо швидкість світла $3,00 \cdot 10^5$ км/с?

Розв'язування.
$$t = \frac{1,50 \cdot 10^8}{3,00 \cdot 10^5} = 500 \text{ с.}$$

Так, як задані числа, а, отже, і відповідь мають по три значущих цифри, то обидва нулі справа в числі 500 значущі, тобто відповідь отримана з точністю до секунди, при цьому цифра одиниць може бути сумнівною.

Задача 7. Шість ламп з'єднано паралельно. Чому рівний опір цього з'єднання, якщо опір кожної лампи 30 Ом?

Розв'язування.
$$R = \frac{30}{6} = 5,0 \text{ Ом.}$$

Число 30 Ом має дві значущі цифри, число 6 точне, відповідно, відповідь повинна мати дві значущих цифри, тому вона записана у вигляді 5,0 Ом, а не 5 Ом.

Цікавим застосуванням цього правила виявляється визначення кількості значущих цифр при переході від одних величин до інших.

Задача 8. Скільки секунд в наближеному значенні проміжку часу 27 хв?

Розв'язування.
$$t = 27 \cdot 60 = 1620 \approx 1600 \text{ с} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

Так, як число 60 точне, а число 27 має дві значущі цифри, то у відповідності з правилом 2 відповідь також повинна мати дві значущі цифри.

2.6.5. Піднесення до степеня і добування кореня

З піднесенням до степеня і добування кореня при більш високих показниках ми маємо справу порівняно рідко. Тому правила підрахунку цифр для цих дій формулюються лише для піднесення до квадрата і куба, а також для добування квадратного і кубічного кореня.

Правило 3. При піднесенні до квадрата і куба потрібно зберігати в результаті стільки значущих цифр, скільки правильних значущих цифр має наближене значення числа, що підноситься до степеня.

Наприклад, $1,6^2=2,56\approx 2,6$. Так як число 1,6 має дві значущі цифри, то і степінь повинен мати дві значущі цифри.

Розглянемо задачу, в якій застосовується піднесення до квадрата наближеного значення числа.

Задача 9. У скільки разів збільшиться кількість теплоти, що виділяється електронагрівачем, при збільшенні сили струму в 1,5 рази? В 2,0 рази? В 4 рази?

Розв'язування. Так, як кількість теплоти прямо пропорційна квадрату сили струму, то:

$$n_1=1,5^2=2,25\approx 2,3 \text{ рази}; n_2=2,0^2=4,0 \text{ рази}; n_3=4^2=16\approx 20 \text{ раз.}$$

В останньому приладі нуль в кінці числа незначуща цифра. Тому в даному випадку відповідь краще сформулювати так: кількість теплоти збільшиться приблизно в 20 раз (а не в 16 раз, як це було б при точному значенні 4).

Аналогічно застосовується правило 3 для піднесення наближеного значення числа в куб. Наприклад: $2,1^3=9,261\approx 9,3$.

Потрібно мати на увазі, що при обчисленні куба похибка перевищує похибку квадрата, тому остання цифра результату є менш надійною.

Розглянемо добування кореня із наближеного значення.

Правило 4. При добуванні квадратного і кубічного кореня потрібно брати в результаті стільки значущих цифр, скільки їх має підкореневе наближене значення числа.

Задача 10. В скільки разів збільшиться період коливань маятника, якщо його довжину збільшити в 3,2 рази? 4,3 рази? 8,0 рази? 16 раз? Задані значення вважати наближеними.

Розв'язування. Період коливань маятника пропорційний квадратному кореню із довжини маятника, тому: $n=\sqrt{3,2}\approx 1,8$ рази; $n=\sqrt{4,3}\approx 2,1$ рази; $n=\sqrt{8,0}\approx 2,8$ рази; $n=\sqrt{16}\approx 4,0$ рази.

Останній результат пояснимо. Так, як число 16 має дві значущі цифри, то і $\sqrt{16}$ повинен за правилом 4 мати дві значущі цифри, тому $\sqrt{16}=4,0$, а не 4.

Результати, отримані за правилом 4, виявляються більш надійними, ніж результати піднесення до степеня. Більш того, остання цифра квадратного і кубічного кореня більш надійна, ніж остання цифра заданого підкореневого числа.

2.7. Додаткові правила підрахунку цифр

Вище були розглянуті основні правила підрахунку цифр для чотирьох арифметичних дій, а також для піднесення до степеня і добування кореня, при цьому в кожній задачі виконувалась одна дія. В більш складних задачах розв'язок зводиться до послідовного виконання декількох дій.

При розв'язуванні задач в декілька дій, крім основних правил, застосовують додаткові правила підрахунку цифр, які дозволяють зменшити похибку кінцевого результату.

2.7.1. Правило запасної цифри

Правило 5. При обчисленні проміжних результатів слід брати на одну цифру більше, ніж рекомендують попередні правила (1 – 4).

Якщо всяке заокруглення погіршує картину розподілу похибок в результаті якої – небудь дії, то збереження (згідно правила 5) однієї зайвої цифри в результатах проміжних обчислень і буде тим розумним компромісом в обчисленнях. В кінцевому результаті ця зайва цифра повинна бути відкинута, так як її збереження здійснювало би ілюзію підвищення точності.

Розглянемо приклад використання правила запасної цифри.

Задача 1. Вагонетка скочується похилою гіркою з початковою швидкістю 2,6 м/с і прискоренням 0,65 м/с². Обчислити шлях пройдений вагонеткою за 4,8 с?

Розв'язування.

$$S = V_0 t + \frac{at^2}{2},$$
$$S = 2,6 \cdot 4,8 + \frac{0,64 \cdot 4,8^2}{2}.$$

Перша проміжна дія: $2,6 \cdot 4,8 = 12,48 \approx 12,5$ м.

В результаті ми зберегли запасну цифру.

Дещо складніше обчислюється другий доданок:

$$\frac{0,65 \cdot 4,8^2}{2} \approx 0,325 \cdot 23,0 \approx 7,48 \text{ м.}$$

В цьому випадку правило запасної цифри застосовано три рази: при діленні на 2, при піднесенні до квадрата і при множенні. Отже, $S = 12,5 + 7,48 = 19,98 \approx 20$ м.

При обчисленні суми застосовано правило 1. Так, як цифра десятих в першому доданку запасна, то кінцевий результат був заокруглений до цілих.

2.7.2. Правило попереднього заокруглення більш точних даних

При розв'язуванні задач зустрічається немало наближених і точних значень, що являють собою багатозначні числа. Наприклад:

| | |
|-----------------------------------|----------------------------|
| електрохімічний еквівалент срібла | 1,118 мг/Кл |
| маса протона | $1,6724 \cdot 10^{-27}$ Кл |
| нормальний атмосферний тиск | 101,325 кПа |

З такими числами досить складно проводити обчислення і раціоналізувати їх можна, застосувавши правило попереднього заокруглення.

Правило 6. Якщо деякі дані мають більше десяткових знаків (при дії першого ступеня) або більше значущих цифр (при діях 2 і 3 ступенів), ніж інші, то їх попередньо слід заокруглити, зберігаючи лише одну зайву цифру.

Розглянемо приклад цього правила при розв'язуванні такої задачі.

Задача 1. Густина ртуті при температурі 0°C рівна $13,5955 \text{ г/см}^3$. Визначити масу ртуті об'ємом 25 см^3 .

Розв'язування. $m = V\rho$

$$m = 13,5955 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 25 \text{ см}^3 .$$

В відповідності з правилом 6 зберігаємо в першому множнику три значущі цифри. Тоді $m = 13,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 25 \text{ см}^3 = 340 \text{ г} = 0,34 \text{ кг}$.

Обчислення без застосування цього правила складніше, але дає той же результат: $m = 13,5955 \cdot 25 = 339,8875 \approx 340 \text{ (г)} = 0,34 \text{ кг}$.

Якщо заокруглити більш точне число без зайвої цифри, результат буде менш точним: $m = 14 \cdot 25 = 350 \text{ (г)} = 0,35 \text{ кг}$.

Правило попереднього заокруглення застосовують і тоді, коли використовують дані із таблиць.

2.7.3. Правило обчислень з наперед заданою точністю

В усіх раніше розглянутих правилах підрахунку цифр було встановлено, яку точність результату можна отримати, маючи вихідні дані з деякою точністю.

Не менш цікавою, особливо для фізики, є зворотна задача: з якою точністю потрібно взяти вихідні дані, щоб отримати результат з наперед заданою точністю? Відповідь на це питання дає наступне правило.

Правило 7. Якщо кінцевий результат потрібно отримати з деякою наперед заданою точністю, а дані можна брати з довільною точністю, то в цих даних слід брати по стільки цифр, скільки потрібно для отримання результату з однією зайвою цифрою. В кінцевому результаті ця зайва цифра округлюється.

Іншими словами, щоб при додаванні і відніманні наближених значень чисел отримати результат з точністю до одиниці деякого розряду, потрібно компоненти цих дій взяти з точністю на один розряд більше.

Що стосується інших дій, то для отримання результату з n значущими цифрами компоненти потрібно взяти з $n+1$ значущою цифрою. В кінцевому результаті зайву цифру відкидають за правилом заокруглення.

Розглянемо застосування правила 7 на прикладі.

Приклад. Обчислити суму чисел $S = \frac{2}{3} + \frac{1}{5} + \frac{2}{7} + \frac{7}{9} + \frac{2}{11}$ з точністю до сотих.

Щоб отримати в сумі два десяткових знаки, беремо в кожному доданку три знаки після коми

$$S = 0,667 + 0,200 + 0,286 + 0,778 + 0,182 = 2,113 \approx 2,11.$$

Легко перевірити, що, взявши доданки з двома десятковими знаками, ми отримаємо інший, менш точний результат.

2.8. Наближені обчислення зі значеннями тригонометричних функцій

Кількість значущих цифр в значенні тригонометричних функцій кута залежить від того, з якою точністю заданий кут. В процесі вимірювання кута його значення може бути отримане з точністю до градуса або хвилини, секунди або іще точніше. Однак в шкільному курсі фізики значення кута зазвичай задано з точністю до градуса. Тому при розв'язуванні задач, в яких застосовуються тригонометричні функції, можна користуватись наступним правилом підрахунку цифр.

Правило 8. Якщо значення кута задано з точністю до градуса, то в значенні тригонометричної функції слід зберігати дві значущі цифри.

Наприклад: $\sin 15^\circ \approx 0,26$, $\cos 73^\circ \approx 0,29$, $\operatorname{tg} 18^\circ \approx 0,32$, $\operatorname{ctg} 20^\circ \approx 2,7$, $\operatorname{tg} 52^\circ \approx 1,3$.

Розглянемо приклад застосування правила 8 у фізичних задачах.

Задача 1. Обчисліть роботу сили 1 Н (точно) на шляху 24,98 м, якщо кут між напрямком сили і напрямком переміщення рівний 55° .

Розв'язування. $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha = 1 \cdot 24,98 \cdot \cos 55^\circ$.

За умовою $F = 1$ Н (точно), в числі $s = 24,98$ м чотири значущі цифри, а за правилом 8, застосовуючи запасну цифру, можна записати: $\cos 55^\circ = 0,574$. Тоді $A = 1 \cdot 24,98 \cdot 0,574$.

Так, як число 0,574 має тільки дві значущі цифри, можна для спрощення обчислень попередньо заокруглити число 24,98 до трьох значущих цифр: $A \approx 25,0 \cdot 0,574 = 14,35 \approx 14$ Дж.

В фізичних задачах буває необхідно знайти значення кута за відомим значенням тригонометричної функції. Найбільш точно значення кута визначається за тангенсом або котангенсом.

Сформулюємо правило підрахунку цифр, що дозволяє знаходити значення кута з точністю до градуса. В більшості випадків це правило виявляється достатнім для розв'язування задач з шкільного курсу фізики.

Правило 9. Якщо значення тригонометричної функції має не менше двох правильних значущих цифр, то значення відповідного кута записують з точністю до градуса.

Приклади.

| | |
|----------------------|----------------------------|
| $\sin \alpha = 0,12$ | $\alpha \approx 7^\circ$ |
| $\cos \beta = 0,084$ | $\beta \approx 85^\circ$ |
| $tg \gamma = 1,8$ | $\gamma \approx 61^\circ$ |
| $tg \varphi = 0,716$ | $\varphi \approx 36^\circ$ |

Розглянемо задачу, в якій застосовуються правила 8 і 9.

Задача 2. Знайдіть кут заломлення сонячних променів, які падають на поверхню води під кутом 65° до горизонту.

Розв'язування. Значення показника заломлення береться з трьома значущими цифрами (правило 6): $n = 1,33$. Тому:

$$\sin \gamma = \frac{\sin(90^\circ - 65^\circ)}{1,33} = \frac{\sin 25^\circ}{1,33} \approx \frac{0,423}{1,33} \approx 0,318.$$

В значенні $\sin 25^\circ = 0,423$ остання цифра запасна. Результат $\sin \gamma \approx 0,318$ є проміжним тому запасну цифру поки що зберігаємо. Так, як $\sin \gamma$ має дві значущі цифри, то у відповідності з правилом 9 значення кута беремо з таблиці з точністю до градуса: $\gamma \approx 19^\circ$.

Правило 8 застосовується в тому випадку, коли значення кута

задано з точністю до градуса. У випадку більшої точності задання кута потрібно мати на увазі таке доповнення до правила 8:

Доповнення. В тих випадках, коли значення кута задано з точністю до десятків хвилин, в значенні тригонометричної функції потрібно зберігати на одну або дві значущі цифри більше ніж рекомендується правилом 8.

Приклад. $\sin 54^\circ 24' \approx 0,8131$, $\cos 17^\circ 30' \approx 0,954$, $tg 18^\circ 10' \approx 0,328$, $tg 50^\circ 12' \approx 1,200$.

При обчисленні із значеннями тригонометричних функцій можна користуватись і методом меж. Застосування цього методу ґрунтується на, тому, що за межами зміни значення кута легко знайти нижню і верхню межі значень кожної тригонометричної функції.

2.9. Наближене обчислення з допомогою мікрокалькуляторів

Існують різні типи мікрокалькуляторів, наприклад, мікрокалькулятори, які виконують арифметичні дії над цілими числами і десятковими дробами, також виконують дії піднесення до степеня і добування кореня, операції з процентами.

Для більш складних обчислень застосовують мікрокалькулятори, з допомогою яких можна не тільки виконувати дії, перераховані вище, але й отримувати значення логарифмів. Він також дозволяє швидко знаходити значення показникової, тригонометричних і обернених тригонометричних функцій, переводити градусну міру кута в радіанну і навпаки, та ін.

Мікрокалькулятори можуть бути використані в школі не тільки при вивченні методів обчислень, але і при розв'язуванні задач на уроках фізики і математики, а також при обробці результатів лабораторних робіт.

Всі операції мікрокалькулятори виконують дуже швидко. Тому тут немає значення невелика раціоналізація обчислювальної роботи, яка досягається застосуванням правила підрахунку цифр при звичайних обчисленнях. За цією причиною повністю відпадає необхідність попереднього заокруглення більш точних даних.

Виникає питання, чи потрібне взагалі правило підрахунку цифр при обчисленнях на мікрокалькуляторах? Так, потрібні, так як правила підрахунку цифр крім функції раціоналізації обчислень, виконують ще одну, більш важливу функцію: дозволяють отримувати результат з точністю, що відповідає точності вихідних даних. Мікрокалькулятори дають результат або точний, або з точністю у 8

знаків, яка може і не відповідати точності вихідних даних. Наприклад, мікрокалькулятор при добуванні квадратного кореня з наближеного значення 2,93 дає: $\sqrt{2,93} \approx 1,7117242$.

Так, як корінь добувають з наближеного значення числа, то результат потрібно заокруглити (за правилом 4) до трьох значущих цифр: $\sqrt{2,93} \approx 1,71$.

Застосування правил підрахунку цифр при обчисленнях на мікрокалькуляторах нічим не відрізняється від звичайних обчислень: спочатку машина обчислює результат, а потім його заокруглюють у відповідності з точністю вихідних даних за правилом підрахунку цифр.

Розглянемо приклади обчислення на мікрокалькуляторі із застосуванням правил 1 і 2.

Приклад 1. Обчисліть суму: $S = 25,375 + 5,68 - 12,45 + 23,6473$.

З допомогою мікрокалькулятора отримуємо результат: $S = 42,2523$, який заокруглюємо до сотих (за правилом 1): $S \approx 42,25$.

Приклад 2. Обчисліть $x = \frac{12,37 \cdot 0,624}{24,052}$.

На мікрокалькуляторі ці дії виконуються без записування проміжного результату: $x = 0,3209246$.

Так, як найменша кількість значущих цифр в компонентах три, то за правилом 2: $x \approx 0,321$.

Як вже відмічалось, на мікрокалькуляторах деяких типів можна обчислювати значення функцій, що вивчаються в школі на уроках математика і застосовуються на уроках фізики. Для правильного заокруглення знайдених значень функцій можна користуватись правилами підрахунку цифр, розглянутими в параграфі 2.7. Наведемо приклади.

Приклад 3. Обчислити $\sin 28^\circ$. Маємо: $\sin 28^\circ \approx 0,469471 \approx 0,47$ (за правилом 8).

Приклад 4. $\cos \alpha = 0,26$. Знайдіть α .

На мікрокалькуляторі отримаємо: $\alpha = 74,92994^\circ$. За правилом 9 результат потрібно заокруглити до градуса: $\alpha = 75^\circ$.

Навчитись працювати з мікрокалькулятором неважко. Більшість учнів та студентів мають мікрокалькулятори і перестали витрачати багато часу на обчислювальну роботу при розв'язуванні задач і виконанні лабораторних робіт.

ДОДАТКИ

Довірчі імовірності α для довірчого інтервалу вираженого у частинах середньої квадратичної похибки $\varepsilon = \frac{\Delta x}{\sigma}$.

Функція Лапласа: $\alpha = 2\theta(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\varepsilon} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2}} d\varepsilon$

| ε | α | ε | α | ε | α |
|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 1,2 | 0,77 | 2,6 | 0,990 |
| 0,05 | 0,04 | 1,3 | 0,80 | 2,7 | 0,993 |
| 0,1 | 0,08 | 1,4 | 0,84 | 2,8 | 0,995 |
| 0,15 | 0,12 | 1,5 | 0,87 | 2,9 | 0,996 |
| 0,2 | 0,16 | 1,6 | 0,89 | 3,0 | 0,997 |
| 0,3 | 0,24 | 1,7 | 0,91 | 3,1 | 0,9981 |
| 0,4 | 0,31 | 1,8 | 0,93 | 3,2 | 0,9986 |
| 0,5 | 0,38 | 1,9 | 0,94 | 3,3 | 0,9990 |
| 0,6 | 0,45 | 2,0 | 0,95 | 3,4 | 0,9993 |
| 0,7 | 0,51 | 2,1 | 0,964 | 3,5 | 0,9995 |
| 0,8 | 0,57 | 2,2 | 0,972 | 3,6 | 0,9997 |
| 0,9 | 0,63 | 2,3 | 0,978 | 3,7 | 0,9998 |
| 1,0 | 0,68 | 2,4 | 0,984 | 3,8 | 0,99986 |
| 1,1 | 0,73 | 2,5 | 0,988 | 3,9 | 0,99990 |
| | | | | 4,0 | 0,99993 |

Значення $t_{\alpha,n}$ для різних значень довірчої імовірності та числа вимірювань (розподіл Стьюдента)

| $\alpha \backslash n$ | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,95 | 0,98 | 0,99 | 0,999 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 2 | 1,000 | 1,376 | 1,963 | 3,08 | 6,31 | 12,71 | 31,8 | 63,7 | 636,6 |
| 3 | 0,816 | 1,061 | 1,336 | 1,886 | 2,92 | 4,30 | 6,96 | 9,92 | 31,6 |
| 4 | 0,765 | 0,978 | 1,250 | 1,638 | 2,35 | 3,18 | 4,54 | 5,84 | 12,94 |
| 5 | 0,741 | 0,941 | 1,190 | 1,533 | 2,13 | 2,77 | 3,75 | 4,60 | 8,61 |
| 6 | 0,727 | 0,920 | 1,156 | 1,476 | 2,02 | 2,57 | 3,36 | 4,03 | 6,86 |
| 7 | 0,718 | 0,906 | 1,134 | 1,440 | 1,943 | 2,45 | 3,14 | 4,71 | 5,96 |
| 8 | 0,711 | 0,896 | 1,119 | 1,415 | 1,895 | 2,36 | 3,00 | 3,50 | 5,40 |
| 9 | 0,706 | 0,889 | 1,108 | 1,397 | 1,860 | 2,31 | 2,90 | 3,36 | 5,04 |
| 10 | 0,703 | 0,883 | 1,110 | 1,383 | 1,833 | 2,26 | 2,82 | 3,25 | 4,78 |
| 11 | 0,700 | 0,879 | 1,093 | 1,372 | 1,812 | 2,23 | 2,76 | 3,17 | 4,59 |
| 12 | 0,697 | 0,876 | 1,088 | 1,363 | 1,796 | 2,20 | 2,72 | 3,11 | 4,49 |

| | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 13 | 0,695 | 0,873 | 1,083 | 1,356 | 1,782 | 2,18 | 2,68 | 3,06 | 4,32 |
| 14 | 0,694 | 0,870 | 1,079 | 1,350 | 1,771 | 2,16 | 2,65 | 3,01 | 4,22 |
| 15 | 0,692 | 0,868 | 1,076 | 1,345 | 1,761 | 2,14 | 2,62 | 2,98 | 4,14 |
| 16 | 0,691 | 0,866 | 1,074 | 1,341 | 1,753 | 2,13 | 2,60 | 2,95 | 4,07 |
| 17 | 0,690 | 0,865 | 1,071 | 1,337 | 1,746 | 2,12 | 2,58 | 2,92 | 4,02 |
| 18 | 0,689 | 0,863 | 1,069 | 1,333 | 1,740 | 2,11 | 2,57 | 2,90 | 3,96 |
| 19 | 0,688 | 0,862 | 1,067 | 1,330 | 1,734 | 2,10 | 2,55 | 2,88 | 3,92 |
| 20 | 0,688 | 0,861 | 1,066 | 1,328 | 1,729 | 2,09 | 2,54 | 2,86 | 3,88 |
| ∞ | 0,674 | 0,842 | 1,036 | 1,282 | 1,645 | 1,960 | 2,33 | 2,58 | 3,29 |

Значення довірчої імовірності α для різних значень $t_{\alpha,n}$ та числа вимірювань n

| n | $t_{\alpha,n}$ | | | |
|----------|----------------|-------|-------|--------|
| | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 |
| 2 | 0,705 | 0,758 | 0,795 | 0,823 |
| 3 | 0,816 | 0,870 | 0,905 | 0,928 |
| 4 | 0,861 | 0,912 | 0,942 | 0,961 |
| 5 | 0,884 | 0,933 | 0,960 | 0,975 |
| 6 | 0,898 | 0,946 | 0,970 | 0,983 |
| 7 | 0,908 | 0,953 | 0,976 | 0,987 |
| 8 | 0,914 | 0,959 | 0,980 | 0,990 |
| 9 | 0,919 | 0,963 | 0,983 | 0,992 |
| 10 | 0,923 | 0,966 | 0,985 | 0,993 |
| 11 | 0,927 | 0,969 | 0,987 | 0,994 |
| 12 | 0,929 | 0,970 | 0,988 | 0,995 |
| 13 | 0,931 | 0,972 | 0,989 | 0,996 |
| 14 | 0,933 | 0,974 | 0,990 | 0,996 |
| 15 | 0,935 | 0,974 | 0,990 | 0,996 |
| 16 | 0,936 | 0,975 | 0,991 | 0,997 |
| 17 | 0,937 | 0,976 | 0,992 | 0,997 |
| 18 | 0,938 | 0,977 | 0,992 | 0,997 |
| 19 | 0,939 | 0,978 | 0,992 | 0,997 |
| 20 | 0,940 | 0,978 | 0,993 | 0,997 |
| ∞ | 0,955 | 0,988 | 0,997 | 0,9995 |

**Кількість вимірювань, що потрібна для того, щоб мати
випадкову похибку $\gamma = \frac{\Delta x}{S}$ з надійністю α**

| $\gamma = \frac{\Delta x}{S}$ | α | | | | |
|-------------------------------|----------|-----|-----|------|------|
| | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 0,95 | 0,99 |
| 1,0 | 2 | 3 | 5 | 7 | 11 |
| 0,5 | 3 | 6 | 13 | 18 | 31 |
| 0,4 | 4 | 8 | 19 | 27 | 46 |
| 0,3 | 6 | 13 | 32 | 46 | 78 |
| 0,2 | 13 | 29 | 70 | 99 | 171 |
| 0,1 | 47 | 100 | 273 | 387 | 668 |

**Надійні ймовірності α для надійного інтервалу,
вираженого в долях середньої квадратичної похибки $\frac{\Delta x}{\sigma}$.**

| α | $\frac{\Delta x}{\sigma}$ | α | $\frac{\Delta x}{\sigma}$ | α | $\frac{\Delta x}{\sigma}$ | α | $\frac{\Delta x}{\sigma}$ | α | $\frac{\Delta x}{\sigma}$ |
|----------|---------------------------|----------|---------------------------|----------|---------------------------|----------|---------------------------|----------|---------------------------|
| 0 | 0 | 0,52 | 0,7 | 0,89 | 1,6 | 0,988 | 2,5 | 0,9993 | 3,4 |
| 0,04 | 0,05 | 0,58 | 0,8 | 0,91 | 1,7 | 0,991 | 2,6 | 0,9995 | 3,5 |
| 0,08 | 0,1 | 0,63 | 0,9 | 0,93 | 1,8 | 0,993 | 2,7 | 0,9997 | 3,6 |
| 0,12 | 0,15 | 0,68 | 1,0 | 0,94 | 1,9 | 0,995 | 2,8 | 0,9998 | 3,7 |
| 0,16 | 0,2 | 0,73 | 1,1 | 0,95 | 2,0 | 0,996 | 2,9 | 0,99986 | 3,8 |
| 0,24 | 0,3 | 0,77 | 1,2 | 0,964 | 2,1 | 0,997 | 3,0 | 0,99990 | 3,9 |
| 0,31 | 0,4 | 0,81 | 1,3 | 0,972 | 2,2 | 0,9981 | 3,1 | | |
| 0,38 | 0,5 | 0,84 | 1,4 | 0,979 | 2,3 | 0,9986 | 3,2 | | |
| 0,45 | 0,6 | 0,87 | 1,5 | 0,984 | 2,4 | 0,9990 | 3,3 | | |

Граничні абсолютні похибки деяких мір

| № з/п | Назва міри | Значення міри, діапазон вимірювання | Ціна поділки шкали | Межа похибки засобу вимірювання або гранична абс. похибка |
|-------|--|---|----------------------------------|---|
| 1 | Лінійки: а) металеві; б) дерев'яні; в) пласт. з накатаними под. шкали | 500, 1000 мм 300, 400, 500, 750 мм 250, 300 мм | 1 мм 1 мм 1 мм | 0,2 мм 0,5 мм 1 мм |
| 2 | Рулетки й міри кравецькі (Рулетки вимір. неметалеві, ГОСТ 11900-66). | 1 м 1,5 м; 2 м | 5 мм 5 мм | 1 мм 3 мм |
| 3 | Комплект гир ГОСТ 7328 | 10 мг 20 мг 50 мг 100 мг 200 мг 500 мг 1 г 2 г 5 г 10 г 20 г 50 г 100 г | | 0,25 мг 0,3 мг 0,4 мг 0,5 мг 0,6 мг 0,8 мг 1,0 мг 1,2 мг 1,5 мг 2,0 мг 2,5 мг 3,0 мг 5,0 мг |
| 4 | Набір тягарців із двома гачками | 100 г | - | 2 г |
| 5 | Мензурки 2-го класу, ГОСТ 1770-64 | 100, 250, 500, 1000 мл | 10 мл 25 мл 25 мл 50 мл | 5,00 мл 5,00 мл 12,50 мл 25,00 мл |
| 6 | Циліндри мірні (наливні) 2-го класу, ГОСТ 1770-64 | 100 мл 250 мл 500 мл 1000 мл | 1 мл 5 мл 5 мл 10 мл | 0,25 мл 1,25 мл 2,50 мл 5, 00 мл |
| 7 | Набір резисторів (шкільний) | 1, 2, 5 Ом | - | 3 % номінального значення |
| 8 | Магазин опорів штепсельний (шкільний) | 10, 20, 50 Ом | - | 1,5 % номінального значення |

Граничні абсолютні похибки деяких вимірювальних приладів

| № з/п | Назва вимірювального приладу | Діапазон вимірювання | Ціна поділки шкали | Межа похибки засобу вимірювання або гранична абсолютна похибка |
|-------|---|--|--|--|
| 1 | Штангенциркулі, ГОСТ 166-63 | 0 ...125, 0...200, 0...320 мм | 0,1 мм або 0,05 мм (за ноніусом) | Одне значення ціни поділки по ноніусу |
| 2 | Терези рівноплечі, ручні, ГОСТ 359-54 | 1,00 ...20 г 5,00...100 г | - | 20 мг при 20 г (6 мг при 2 г) 50 мг при 100 г (10 мг при 10 г) |
| 3 | Терези шкільні | 10...200 г | - | 50 мг при 10 г (20 мг при 200 г) |
| 4 | Термометри скляні рідинні (не ртутні) ГОСТ 9177-74 | -20 °С 100 °С -35 °С 100 °С | 0,2 °С; 0,5 °С; 1 °С, 2 °С, 5 °С | 1 ціна поділки шкали, якщо вона рівна 1 °С, 2 °С, 5 °С і 2 ціни поділки, якщо вона дорівнює 0,2 °С; 0,5 °С. |
| 5 | Термометри ртутні скляні, ГОСТ 2045-71 | -35 °С 0 °С 0 °С 100°С 100 °С 200 °С -35 °С 200 °С -35 °С 100 °С 100 °С 200 °С -35°С 200 °С -35 °С 200 °С | 0,1 °С; 0,2 °С 0,2 °С 0,2 °С 0,5 °С 1 °С 1 °С 1 °С 2 °С 2 °С 5 і 10 °С | 0,3 °С, 0,3 °С 0,2 °С 0,4 °С 1 °С 1 °С 1 °С 2 °С 2 °С 5 °С |
| 6 | Динамометр навчальний | 0...4 Н | 0,1 Н | 0,05 Н |
| 7 | Секундоміри механічні | 30... 60 с | - | 1,5 ціни поділки шкали за один оберт секундної стрілки |
| 8 | Секундоміри електричні | 30 с | - | 0,5 ціни поділки шкали за один оберт секундної стрілки |
| 9 | Амперметр шкільний | 0...2 А | 0,1 А | 0,05 А |
| 10 | Вольтметр шкільний | 0...6 В | 0,2 В | 0,15 В |

Латинський і грецький алфавіти

| Латинський алфавіт | | | | Грецький алфавіт | | | |
|--------------------|---------|-------|--------------|------------------|-------------|-------|---------|
| Буква | Назва | Буква | Назва | Буква | Назва | Буква | Назва |
| A a | а | N n | ен | A α | альфа | Ξ ξ | ксі |
| B b | бе | O o | о | B β | бета | Ο ο | омікрон |
| C c | це | P p | пе | Γ γ | гамма | Π π | пі |
| D d | де | Q q | ку | Δ δ | дельта | Ρ ρ | ро |
| E e | е | R r | ер | Ε ε | епсило н | Σ σ | сигма |
| F f | еф | S s | ес | Z ζ | дзета | Τ τ | тау |
| G g | ге(же) | T t | те | Η η | ета | Υ υ | іпсилон |
| H h | ха(аш) | U u | у | Θ θ (θ) | тета | Φ φ | фі |
| I i | і | V v | ве | Ι ι | йота | Χ χ | хі |
| J j | йот(жі) | W w | дубль- ве | Κ κ | каппа | Ψ ψ | псі |
| K k | ка | X x | ікс | Λ λ | ламбда | Ω ω | омега |
| L l | ель | Y y | ігрек | Μ μ | мі(мю) | | |
| M m | ем | Z z | зет | Ν ν | ні(ню) | | |

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Базакуца В.А. Международная система единиц/ В.А. Базакуца. Х.: 1966. 176 с.
2. Беклемишев А.В. Меры и единицы физических величин: Учебное пособие. –2-е издание. .М.: Государственное издание физико-математической литературы., 1963.296с.
3. Біленко І. І. Фізичний словник.– К.: 1979.- 336 с.
4. Бондаренко Г.В. Спеціальні (допоміжні) історичні дисципліни. - Луцьк: Ред.-вид. відд. Волин. ун-ту, 1997. 222 с.
5. Брюханов А. В., Пустовалов Г. Е., Рыдник В. И. Толковый физический словарь: Основные термины. М.: 1988. 233 с.
6. Бурдун Г. Д., Базакуца В. А. Единицы физических величин. Х.: 1984. 208 с.
7. Васильев А. С. Основы метрологии и технические измерения: Уч. пособие. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
8. ДСТУ 3120-95. Електротехніка: Літерні позначення основних величин. К.: 1996. 40 с.
9. ДСТУ 2681—94. Метрологія: Терміни та визначення. К.: 1994. 66 с.
10. Енохович А. С. Справочник по физике. М.: 1978. 416 с.
11. Земельман М. А. Метрологические основы технических измерений.-М.: Издательство стандартов, 1991. 228 с.
12. Кобель Г.П. Основы метрології: курс лекцій для студентів факультету інформаційних систем, фізики та математики. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 124 с.
13. Коган Б.Ю. Размерность физической величины. М.: Наука, 1968. 72 с.
14. Кордун Г. Г. Біографічний довідник видатних фізиків. К.: 1985. 280с.
15. Маликов М. Ф. Основы метрологии. М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов при совете министров СССР, 1969. 477 с.
16. Марио Льюци История физики. М.: Мир, 1970. 464 с.
17. Мітюров В. К. Міжнародна система одиниць та її вивчення в школі. К.: 1963. 176с.
18. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М.: 1988. 430 с.
19. Фізичні величини та їх одиниці: Основні поняття, співвідношення /Авт.-упоряд. Є.П.Чорний, О.Є.Шадріна.К.:Либідь, 1997. 112с.

20. Физический энциклопедический словарь /Гл. ред А.М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.
21. Храмов Ю. А. Физики: Биографический справочник. К.: 1977. 512с.
22. Цицюра В.Д., Цицюра С.В. Метрологія та основи вимірювань: Навч. посіб. К.: Знання-Прес, 2003. 180 с.
23. Чертов А. Г. Единицы физических величин. М.: 1977.334 с.
24. Чертов А. Г. Физические величины. М.: 1990. 287 с.
25. Широков К. П., Богуславский М. Г. Международная система единиц. М.: 1984. 112с.

**Кобель Григорій Петрович
Головіна Ніна Анатоліївна
Шаварова Ганна Петрівна**

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

Навчальний посібник

Підп. до друку. Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір офс. Гарн. Таймс. Друк цифровий. Обсяг 7,21 ум. друк. арк., 7,14 обл.-вид. арк. Наклад 50 пр. Зам. .
Видавець і виготовлювач – Вежа-Друк (м. Луцьк, вул.. Бойка,1, тел.. 29-90-65).

Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України.
ДК № 4039 від 08.04.2011 р.