

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ

УДК 531.7

Віталій Цоцко, Ростислав Дрозд

(Дніпро, Україна)

ОСНОВНІ ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Анотація: Основу фізичного дослідження складає процес вимірювання. Вибір одиниць вимірювання пов'язаний з тією чи іншою системою одиниць. Метою дослідження було пояснення та обґрунтування вибору кількості основних одиниць вимірювання в системах одиниць зокрема в Міжнародній системі одиниць. Ставилось завдання знаходження можливої трансформації основних одиниць SI в контексті природних одиниць вимірювання. Одержані їх значення.

Ключові слова: система одиниць вимірювання, основні та похідні одиниці, універсальні фізичні константи, природні системи одиниць.

Summary: The basis of the physical examination is the process of measurement. The choice of measurement units associated with a particular system of units. The aim of the study was to explain and justify the choice of the number of basic units of measurement in units systems, particularly in the International System of Units. The task was to find a possible transformation of basic SI units in the context of natural units of measurement. Their values are obtained.

Key words: system of units of measurement, basic and derived units, universal physical constant, the natural system of units.

Всі природничі науки, зокрема фізика, біофізика та ін. ґрунтуються на експериментальних дослідженнях, які пронизані ідеєю елементарності, тому що лише конкретні прості якості досліджуваної матерії можуть бути точно порівняні, виміряні. Застосування фізичних приладів та методів вимірювання забезпечує і точність, і оперативність.

Еталоном вимірювання довільної якості виступає однорідна до неї характеристика, вибрана за одиницею вимірювання. Група взаємозв'язаних одиниць вимірювання складає систему одиниць. В сучасному світі серед десятків різних систем одиниць перевагу здобула **Міжнародна система (SI)** одиниць вимірювання фізичних величин.

При формуванні систем одиниць виділяються основні або первинні фізичні величини, одиниці яких (основні одиниці вимірювання) встановлюються незалежно та довільно [1, с. 229] і підпорядковані критерію зручності використання. Основні одиниці визначаються та відтворюються за допомогою зразкових (еталонних) тіл, що перебувають в заданих зовнішніх умовах або еталонних процедур вимірювання.

Наприклад, одна із основних одиниць SI - одиниця маси (кілограм) – відтворюється за платино-іридієвим прототипом, маса якого еквівалентна масі 1 дм³ води при 4 °С і 760 мм рт. ст. А одиниця часу – секунда – відтворюється за інтервалом часу, що дорівнює 9192631770 періодам електромагнітного випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атому цезію-133. Цікаво, що антропоморфним прототипом такого вибору секунди слугував інтервал часу між двома послідовними скороченнями серця середньостатистичної людини, який спочатку намагались “прив’язати” до циклічного руху Землі навколо Сонця. По суті, кожна основна одиниця має свій антропоморфний відлік.

В Міжнародній системі одиниць вимірювання основними одиницями вибрано одиницю довжини, одиницю часу, одиницю маси, одиницю температури, одиницю кількості речовини, одиницю сили струму та одиницю сили світла.

Всі інші фізичні величини виступають в ролі вторинних величин, залежних (з позиції вибору їх одиниць вимірювання) від основних одиниць. Їх одиниці називаються похідними, і вони визначаються через основні одиниці на основі заданого співвідношення (закону або визначення) між ними та первинними

величинами. Первинні величини відіграють роль базису простору вимірювань, по якому можна розкласти всі вторинні величини.

У допитливого починаючого дослідника може постати принципове питання, чому основних одиниць вимірювання та чи інша кількість (кількість похідних одиниць практично необмежена).

Існують дві протилежні точки зору на це питання. По-перше, ця кількість задається власне природою: кожній новій принциповій якості – нова основна одиниця. По-друге, вказане число – результат домовленості. Тому що різноманітних якостей матерії існує необмежено багато.

В роботі [2, с. 447] була зроблена спроба відповісти на питання, чому основних одиниць вимірювання в SI сім. Була висловлена думка, що лише перша трійка основних одиниць – метр, секунда та кілограм, які відображають первинні фізичні величини, задіяні у рівнянні руху, дійсно носять незалежний характер і передають фундаментальні властивості матерії. Інші основні одиниці зв'язувались з вказаною трійкою за допомогою фундаментальних фізичних сталих. Тобто їх незалежність умовна.

Так, моль узгоджується з сталою Авогадро. Ампер – з магнітною сталою. Кандела – з функцією видимості та коефіцієнтом світлової віддачі – $G^*=683$ лм/Вт. Кельвін – зі сталою Больцмана.

Дійсно, якщо виходити з класичного рівняння руху – другого закону Ньютона, то категорія сили (взаємодії) виступає як об'єднуючий фактор співвідношення трьох незалежних фундаментальних категорій: координат, часу, маси. Вказані величини фігурують і в рівнянні руху мікрочастинок – хвильовому рівнянні (рівнянні Шрьодінгера з часом). Де об'єднуючим фактор виступає універсальна міра фізичного руху матерії - енергія, (при цьому додається фундаментальна константа – приведена стала Планка).

Координати об'єкта інтерпретуються на платформі поняття відстані між точками простору або довжини довільної просторової лінії. Координати вимірюються шляхом порівняння прямолінійних відрізків. Хоч сам простір як тривимірний форма існування матерії постає значно глибшою і повністю не

розагаданою на сьогодні реальністю. Так тривимірність простору ототожнюють з відповідною симетрією хвильової функції мікрочастинок.

Час, як критерій причинності руху, відображує другу форму існування матерії – форму, яка не повторюється. Час виступає аргументом руху (змін матерії взагалі), що трансформує рух як однозначну функцію часу. Час може бути вимірний порівнянням з іншим рухом, що повторюється.

Вихідне визначення маси тіл (матерії у формі речовини) – це міра інертності та міра сили тяжіння. Але на сучасному витку рівня знань маса (приріст маси) матерії – це, за формулою Ланжевена-Ейнштейна, приріст її енергії. І, віддзеркалюючи вислів класика, можна стверджувати, що немає матерії без маси, як немає маси без матерії.

Звичайно про незалежність простору, часу та маси один від одного можна говорити досить умовно, наприклад у контексті релятивістських ефектів: інтервалу, зростання маси та часового проміжку, скорочення поздовжних розмірів тіл, але їх фундаментальність важко заперечити.

Подальший аналіз [3, с. 79] показав, що не все так просто.

Кожна одиниця вимірювання може бути встановлена незалежно від інших, що викликає необхідність присутності в будь-якому співвідношенні додаткового перевідного коефіцієнта біля кожної фізичної величини. В системах одиниць число узгоджувальних коефіцієнтів зменшується. Це досягається за рахунок вибору основних одиниць вимірювання та встановлення залежних від них похідних одиниць відповідно до фізичних законів або категорійних визначень. Вибір основних одиниць підпорядковується галузевому поділу природничої науки, в ідеалі відповідають фундаментальним явищам природи, і вони відтворюються протокольними дослідженнями. При цьому коефіцієнти пропорційності у вказаних співвідношеннях максимально спрощують, наприклад встановлюють рівними одиниці, як у сучасному записі другого закону Ньютона. Вибираючи константу в першій формулі зв'язку (наприклад другому законі Ньютона) максимально простою, в

іншому законі (наприклад законі тяжіння) узгоджувальна константа буде вже диктуватись природою.

Це говорить про те, що фізичний зміст мають лише відношення величин. Вибір одиниць вимірювання і містить вказане відношення. Коефіцієнти пропорційності незримо присутні скрізь, у всіх визначеннях та законах. Можна нівелювати коефіцієнти в одному місці – але вони проявляться в іншому.

При формуванні похідних одиниць стикаються з різними варіантами вибору формули зв'язку, що веде до різних розмірностей одних і тих же похідних одиниць. А зовсім різні величини можуть мати однакові розмірності. “Істині” розмірності фізичних величин, як і “істині” назви предметів, як говорив М. Планк, є умовними.

Наприклад одиниця індуктивності в системі СГСМ та одиниця ємності в системі СГСЕ співпадають між собою та з одиницею довжини. Тому, навіть вибір координат, що з погляду математики є рівнозначним симетричним процесом, з погляду законів природи може бути асиметричним, пріоритетним. В кожній матеріальній якості (формі) закладена своя сутність. Та ж маса – інертна і тяжіюча – дві різні сутності.

Тобто, в системах одиниць переходять від довільних неузгоджених коефіцієнтів адаптації даних одиниць фізичних величин у законах до систематизованих постійних коефіцієнтів, до того ж у меншій кількості, за рахунок їх спрощення у визначальних формулах похідних одиниць.

Якщо число основні одиниці вимірювання – результат **домовленості**, бо різноманітних якостей матерії існує необмежено багато. З іншого боку, можна виділити лише одну всеоб'ємну суть матерії – її єдність. В цьому протиріччі можна зробити лише наступний висновок: фізичні величини не можуть бути зведені одна до одної, але вимірювання їх може бути зведене до вимірювання інших величин, зокрема до найпростіших – механічних величин, тобто можна перевести будь-які величини у якість похідних.

Так одиницю маси можна встановити як похідну одиницю SI шляхом прийняття не тільки інерційної константи (коефіцієнт пропорційності у

другому законі Ньютона), але й гравітаційної константи (коефіцієнт пропорційності у законі тяжіння) рівними одиниці кожної з них. Іншими словами можна говорити, що незалежність одиниці маси забезпечується уведенням гравітаційної сталої.

Таким чином число основних одиниць вимірювання пов'язане з числом коефіцієнтів, присутніх в виразах фізичних законів та визначень. Ці коефіцієнти прямо визначаються вибором основних одиниць і називаються універсальними або світовими константами. Світові константи фігурують у всіх виразах фізичних законів, можна лише підбором основних та похідних одиниць звести їх до безрозмірних числових значень, зокрема до одиниці.

Скорочення основних одиниць веде до зменшення світових констант. Число основних одиниць може бути зведено до одиниці і, навіть, нуля [4, с. 31], що може бути виконано в так званих “природних системах” одиниць вимірювання [4, с. 248], в яких максимальна кількість світових констант прирівнюється одиниці.

Але всі світові константи не можуть бути вибрані одиничними, тому що між деяким з них існує внутрішній зв'язок, наприклад елементарний заряд e , приведена стала Планка \hbar та швидкість світла у вакуумі c утворюють безрозмірну комбінацію

$$\frac{ch}{e^2} = 137,$$

яка, в свою чергу, тотожна оберненій величині сталої тонкої структури α .

Одна з теорем теорії розмірностей [1, с. 436] стверджує, що всяке кількісне співвідношення між різними фізичними величинами може бути виражено у вигляді функціонального зв'язку між безрозмірними комбінаціями цих величин.

Природні системи одиниць можна розглядати як такі системи, в яких у якості основних одиниць прийняті прирівняні одиниці фундаментальні сталі, що дозволяє вибудувати систему розмірностей, у формулах якої будуть фігурувати умовні символи розмірностей цих сталих [4, с. 250].

Таким чином, основні одиниці вимірювання тісно зв'язані з фундаментальними фізичними сталими – світовими константами. За різними джерелами до фундаментальних фізичних сталих відносяться 19-37 вказаних констант [5, с. 38], [6, с. 386], [4, с. 255]. Окремим підзаголовком “універсальні константи” виділено оптимальну групу таких констант [4]. До мінімальної групи фундаментальних констант, що відповідають Міжнародній системі одиниць, можна віднести швидкість світла у вакуумі, стала Планка, гравітаційна стала, електрична або магнітна сталі, стала Больцмана, стала Авогадро (або газова стала), а також коефіцієнт світлової віддачі (або механічний еквівалент світла).

Сформуємо природну систему основних одиниць відповідних до SI. Для цього трансформуємо світові константи, задіяні у визначенні основних одиниць SI, в одиничні. При цьому основні одиниці (“квазіодиниці” SI) набудуть нових значень:

- 1) “квазікілограм” – $1''_{kg} = 5,46 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$;
- 2) “квазісекунда” – $1''_c = 1,35 \cdot 10^{-43} \text{ с}$;
- 3) “квазіметр” – $1''_m = 4,05 \cdot 10^{-35} \text{ м}$;
- 4) “квазікельвін” – $1''_K = 3,56 \cdot 10^{32} \text{ К}$;
- 5) “квазімоль” – $1''_{\text{моль}} = \text{маса молекули}$;
- 6) “квазіампер” – $1''_A = 3,49 \cdot 10^{25} \text{ А}$;
- 7) “квазікандела” – $1''_{cd} = 1,98 \cdot 10^{54} \text{ кд}$.

Проведені операції дають значення одиниць часу, довжини та маси, які практично співпадають з їх значеннями в природній системі одиниць, запропонованої Планком [5, с. 249]:

Таким чином, число основних одиниць вимірювання є результатом оптимального вибору. Між основними одиницями вимірювання фізичних величин та світовими константами існує однозначний зв'язок. Скорочення основних одиниць веде до зменшення світових констант і навпаки. Максимальна кількість світових констант, зведених до одиниці, реалізується у природних системах одиниць вимірювання. Вказані системи мають переважно

теоретичне значення, тому що їх одиниці або надзвичайно мізерні, або надзвичайно великі за масштабом. Практично значиме число основних одиниць складає від трьох до семи.

ДЖЕРЕЛА ТА ЛІТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В.. Общий курс физики. Механика. – М.: Наука, 1979. 520 с.
2. Цоцко В.И. К вопросу об единицах измерений физических величин. / Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: Збірник наукових праць. Випуск 4: В 3-х томах. – Кривий Ріг: Видавничий відділ НМетАУ, 2004. – Т. 2: Теорія та методика навчання фізики. - 462 с. (С. 447-450)
3. Цоцко В.І., Денисенко О.І. Фундаментальні фізичні сталі в контексті одиниць вимірювання. / Теоретико-методичні засади вивчення питань сучасної фізики та нанотехнологій у загальноосвітніх та вищих навчальних закладах: Матеріали I Міжрегіональної науково-методичної конференції, м. Суми, 26-27 листопада 2015 р. / за ред. О.М. Завражної – Суми СумДПУ, 2015. – 93 с.
4. Сена Л.А. Справочник по физике. - М.: Наука, 1969. 304 с.
5. Енохович А.С. Справочник по физике. - М.: Просвещение, 1978. 416 с.
6. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. / Под ред. И.В. Савельева - М.: Наука, 1990. 400 с.

Відомості про авторів

Цоцко Віталій Іванович – старший викладач кафедри вищої математики та фізики Дніпровського державного аграрно-економічного університету; тел. 0672801518; tsvitydotua@gmail.com; сертифікат: ТАК; про конференцію дізнався від колег.

Дрозд Ростислав Анатолійович – студент 2 курсу факультету ветеринарної медицини Дніпровського державного аграрно-економічного університету; тел. 0967860430; rostikdrozd@gmail.com; сертифікат: НІ; про конференцію дізнався від наукового керівника.