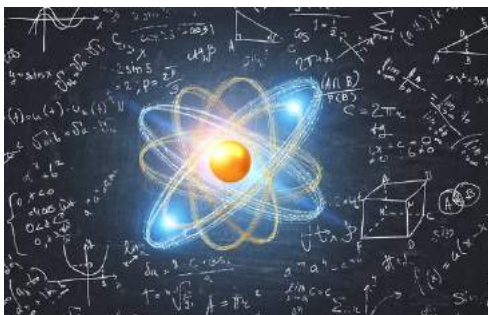


Коефіцієнти пропорційності в шкільному курсі фізики



Розглядаються характеристики коефіцієнтів пропорційності та універсальних фізичних констант, які входять до законів фізики в більшому обсязі, ніж у підручниках та методичних матеріалах. Достатньо повно висвітлюється роль цих величин як таких, що характеризують фундаментальні властивості матерії.

Ключові слова: коефіцієнт пропорційності, універсальна фізична стала, залежність між величинами.

Hnatiuk D. O. Proportionality Coefficients in the School Physics Course.

The characteristics of proportionality coefficients and universal physical constants, included in the laws of physics to a greater extent than in textbooks and methodological materials, are considered. The role of these quantities as those characterizing the fundamental properties of matter is sufficiently fully covered.

Keywords: proportionality coefficient, universal physical constant, dependence between quantities.

Постановка питання. Якість засвоєння знань, сформованість предметних компетентностей вирішальною мірою визначається тим, наскільки повно, глибоко організовується вивчення навчального матеріалу. Певну складність у роботі вчителів фізики становить засвоєння фізичного змісту коефіцієнтів пропорційності, які входять до формул, що описують фізичні процеси.

Найчастіше в шкільному курсі фізики між величинами існує прямо пропорційна залежність. Вона має бути виражена в записі закону так, щоб її можна було вивчати і застосовувати.

Виклад основного матеріалу. У кожному явищі природи ми зустрічаємося з величинами, які знаходяться в функціональній залежності, у взаємному зв'язку, де кожному значенню однієї величини відповідає певне значення іншої.

Найпростіша залежність між величинами – прямо пропорційна, тобто така, в якій відношення двох величин є незмінним ($\frac{y}{x} = \text{const}$).

Незмінне відношення пропорційних величин називається *коефіцієнтом пропорційності*. Він показує, скільки одиниць однієї величини припадає на одиницю другої.

Дві величини називаються *прямо пропорційними*, якщо при збільшенні (зменшенні) однієї з них у декілька разів друга збільшується (зменшується) в стільки ж разів. Наприклад, пройдений шлях і витрачений у прямолінійному рівномірному русі час, величина деформації пружного тіла й сила, що при цьому виникає, і т. п.

У таких випадках цю залежність перетворюють у рівність, використовуючи коефіцієнти пропорційності (наприклад: $\Phi = LI$, $Q = \lambda m$, $\varphi = \omega t$; $m = kIt$, $F = kx$, $S = v \cdot t$ і т. п.). Із введенням коефіцієнта ця залежність перетворюється на рівність, якою зручно користуватися.

Фізичні величини та їх одиниці пов'язані між собою формулами, які виражають закони фізики. Вибір одиниць вимірювання цих величин здійснюється так, щоб формули набули найбільш простого, зручного для обчислень вигляду.

Для цього спочатку встановлюють одиниці та найменування основних фізичних величин, а далі виражають решту величин і через них визначають інші одиниці та найменування. Так, у механіці достатньо обрати три основні величини (кг, с, м) і через них за допомогою формул визначають усі інші, які називаються *похідними*. Така сукупність одиниць для вимірювання фізичних величин, яка складена за певними правилами, називається *системою одиниць*.

У різних системах числові значення коефіцієнтів пропорційності, які виражають залежності між фізичними величинами, будуть мати різні числові значення. Так, наприклад, у системі СІ гравітаційна стала:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}, \text{ а в системі СГС } G = 6,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{дин} \cdot \text{см}^2}{\text{кг}^2}.$$

Густина тіла

Тіла однакових розмірів можуть мати різні маси. Це твердження приводить до необхідності введення коефіцієнта пропорційності в поняття густини тіла. Оскільки маса прямо пропорційна об'єму однорідного тіла ($m \propto V$), то при переході до рівності формула матиме такий вигляд: $m = \rho \cdot V$, де густина ρ є коефіцієнтом пропорційності, який показує залежність маси від речовини. 1 м³ заліза має масу 7800 кг, а алюмінієве тіло таких же розмірів – 2700 кг, золота – 19 300 кг і т. п. Отже: густина – це фізична величина, яка характеризує речовину тіла і чисельно дорівнює масі одиниці об'єму цього тіла, якщо $V = 1 \text{ м}^3$ (для суцільних тіл). У формулі $m = \rho \cdot V$ густина – це фізична характеристика будь-якої речовини. Для даного суцільного тіла $\rho = \text{const}$ і при розрахунках береться з таблиць.

Знаючи об'єм і речовину тіла, можна знайти його масу.

Важливо, що густина однієї і тієї ж речовини у твердому, рідкому і газоподібному станах різна. Зокрема, густина льоду $800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, води – $1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

На нашу думку, достатньо точним є таке означення густини: *це фізична величина, яка характеризує речовину, з якої виготовлено тіло, залежить від агрегатного стану цієї речовини і чисельно дорівнює масі цього тіла, якщо його об'єм $V = 1 \text{ м}^3$.*

Жорсткість у законі Гука

Сила пружності, що виникає при деформаціях розтягу і стиску, прямо пропорційна до видовження і направлена в бік, протилежний до видовження ($F = -kx$). Чим більше k , тим більш жорстка пружина, тим більшу силу треба прикласти, щоб її деформувати. Коефіцієнт пропорційності k – це фізична величина, яка характеризується здатністю тіл протидіяти деформаціям і чисельно дорівнює силі пружності, що виникає у стрижні (пружині, балці і т. п.), якщо деформація становить 1 м (якщо $x = 1 \text{ м}$, то $F = k$).

Жорсткість залежить від площі перерізу стрижня, його початкової довжини та матеріалу, з якого виготовлено тіло.

У системі СІ цей коефіцієнт вимірюється в $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$; або k – це сила, що припадає на одиницю видовження.

Закон Гука встановлює лінійну залежність між силою та деформацією. Тому графіком такої залежності є пряма лінія, а $\text{tg } \alpha = k$. Чим більший кут нахилу графіка до горизонтальної осі координат, тим більша протидія деформації. Сила пружності завжди направлена до положення рівноваги.

Кожен стрижень, пружина має свою жорсткість, яку можна визначити, вимірявши площу перерізу і початкову довжину, а знаючи матеріал, – з таблиць знайти модуль Юнга. Далі жорсткість знаходиться за формулою: $k = \frac{E \cdot S}{l_0}$.

Виходячи з особливостей будови кристалічних тіл, можна так роз'яснити сутність деформацій.

У випадку пружних деформацій виникає лише незначна зміна форми елементарних комірок кристала. При цьому дещо змінюється форма і розміри цих комірок. Зміна відстаней між вузлами кристалічної ґратки така, що вона не призводить до порушення рівноваги сил взаємодії частинок. Кожна частинка залишається в оточенні тих же «сусідів». Зміна відстаней між частинками приводить до виникнення сили пружності, яка відновлює початкову форму і розміри після зняття навантаження (припинення дії сили).

Модуль Юнга

Одне з формулювань закону Гука є таким: сила пружності, що виникає в тілі під час деформації, прямо пропорційна абсолютному видовженню: $F = kx$.

В іншій формі цей закон записується так:

$$\frac{E}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ або } \sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ де } E - \text{модуль Юнга, який встановлює зв'язок між деформацією розтягу (стиску) і}$$

механічною напругою.

Модуль Юнга характеризує пружні властивості ізотропних тіл, визначається речовиною тіла і вимірюється в паскалях. Знаючи матеріал, з якого виготовлено пружне тіло, модуль Юнга знаходять у відповідних таблицях. Так, для сталі $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па.

На відміну від жорсткості, модуль Юнга не залежить від розмірів тіла, а визначається лише його речовиною. Означення цієї величини: *модуль Юнга – це фізична величина, яка характеризує пружні властивості ізотропних речовин, з яких складається тіло, його фізичний стан, і чисельно дорівнює механічній нарузі ($\sigma = \frac{E}{S}$) в тілі, при його абсолютному видовженні (стисканні) в два рази.*

$$\text{Закон Гука записується у вигляді: } \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}; \text{ якщо } E = \frac{F}{S}, \text{ то } \frac{l-l_0}{l_0} = 1, \text{ тоді } l-l_0 = l_0, \text{ або } l = 2l_0.$$

Можна твердити, що модуль Юнга чисельно дорівнює такій нарузі, яка б мала виникнути в тілі при збільшенні його довжини в 2 рази (якби для такої деформації виконувався закон Гука).

Універсальна газова стала. Стала Больцмана

Коефіцієнти пропорційності пов'язують фізичні величини, які перебувають у прямо пропорційній залежності. Наприклад, $A = \nu R \cdot \Delta T$ – робота газу і зміна температури. Тобто R – молярна (універсальна) газова стала – чисельно дорівнює роботі ізобарного розширення ідеального газу при нагріванні на 1 кельвін. Тобто, якщо $\Delta T = 1$ К, то $A = R$ (для 1 моля газу). Це стала загальна для всіх газів, її одиниці $[R] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

значення цієї сталої таке: $R = 8,31446261815324$. Стала Больцмана: $k = \frac{R}{N_a} = \frac{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Ця константа належить до фундаментальних фізичних сталих.

В МКТ ця стала входить у формули: $P = \frac{2}{3} nE$, $p = nkT$; $E_k = \frac{3}{2} kT$ і належить до категорії фундаментальних фізичних констант. Її можна розглядати як величину роботи газу, віднесено до однієї молекули. Через цю сталу встановлено зв'язок між середньою кінетичною енергією хаотичного руху молекул і температурою газу, вираженою в кельвінах. Температура, будучи макроскопічною величиною, прямо пропорційна середній кінетичній енергії хаотичного руху молекул газу.

$$\text{Можна показати, що } T = \frac{1}{k} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{mv^2}{2}, \text{ де } m - \text{маса однієї молекули.}$$

Стала Больцмана пов'язує макроскопічні й мікроскопічні параметри системи частинок.

Температура – це фізична величина, що характеризує інтенсивність теплового руху молекул газу (в МКТ).

Гравітаційна стала

Гравітаційна стала входить до закону тяжіння, який можна формулювати так: модуль сили всесвітнього тяжіння прямо пропорційний масам двох тіл і обернено пропорційний квадрату відстані між ними $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$.

У такому вигляді закон діє для точкових мас, кулястих тіл зі сферично симетричним розподілом мас. Числове значення гравітаційної сталої залежить від вибору системи одиниць і дорівнює $G = (6,67259 \pm 0,0085)^{11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Цю величину вперше експериментально визначив Кавендіш.

Сила всесвітнього тяжіння діє між усіма тілами. В класі зручно подати її числове значення так:

$$G = \frac{1}{15000000} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

Гравітаційна стала – це не лише коефіцієнт пропорційності, а й одночасно універсальна фізична константа, яка характеризує здатність тіл до взаємного притягання. За допомогою гравітаційної сталої вперше визначено масу Землі.

Гравітаційна взаємодія здійснюється без безпосереднього контакту між тілами через матеріальне середовище, яке називається *гравітаційним полем*. У кожній точці цього поля на розміщене в ньому тіло діє сила тяжіння, яка пропорційна масі цього тіла. Таке поле поряд з іншими полями є однією з форм матерії.

Гравітаційна взаємодія є властивістю всіх тіл у Всесвіті й виявляється у їх взаємному притяганні одне до одного. Ця стала об'єднує фізичні характеристики тіл у закон тяжіння.

Стала Планка

Ця фізична величина виражає межу між макросвітом і мікросвітом. Атоми випромінюють і поглинають енергію порціями ($\epsilon = h\nu$) лише на окремих хвильових частотах.

Ейнштейн уперше пояснив явище фотоелектру на основі квантування енергії.

Стала Планка фігурує в усіх рівняннях і формулах квантової механіки і є універсальною фізичною сталою.

Закон всесвітнього тяжіння і закон Кулона

У підручнику з фізики для 10-го класу формулювання закону всесвітнього тяжіння подано так: будь-які два тіла притягуються одне до одного із силою, яка прямо пропорційна добутку мас цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними: $F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$, де G – гравітаційна стала (коефіцієнт пропорційності, однаковий для всіх тіл у Всесвіті). Інформація в підручнику про сталу величину мінімальна, сказано, що гравітаційна стала чисельно дорівнює силі гравітаційного притягання двох матеріальних точок масою по 1 кг кожна, які перебувають на відстані 1 м одна від одної.

У підручнику для 9-го класу подано таке формулювання закону Кулона: два нерухомих точкових електричних заряди q_1 і q_2 , які розташовані у вакуумі на відстані R один від одного взаємодіють із силами, напрямленими по прямій, яка з'єднує ці заряди; модулі цих сил пропорційні добутку зарядів і обернено пропорційні квадрату відстані між ними: $F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$, де k – це коефіцієнт пропорційності.

Цікаво, що записи обох законів з математичної точки зору ідентичні, однакові формою, лише один стосується зарядів, а другий – мас. Маса виступає в цьому випадку в ролі гравітаційного заряду, але вона не може бути від'ємною, на відміну від заряду. Саме тому гравітаційна сила не може бути відштовхуючою.

Які ще характеристики коефіцієнтів k і G можна розглянути на уроках, де вивчаються ці закони? До спільних характеристик можна, на нашу думку, віднести такі:

1. В обох законах сила обернено пропорційна квадрату відстані між тілами.
2. Обидва закони вписано з використанням коефіцієнтів пропорційності.
3. Форма запису обох законів однакова.
4. Взаємодія відбувається в обох випадках і передається через поле: гравітаційне й електричне.
5. Коефіцієнти пропорційності залежать від вибору систем одиниць.
6. Коефіцієнти входять у різні залежності: гравітаційна стала – у визначене прискорення вільного падіння, першої космічної швидкості і т. п. Коефіцієнт k – у ряд закономірностей, наприклад, з електростатики.

Між цими законами є суттєві відмінності:

1. Гравітаційна взаємодія виявляється в тому, що сила притягання є завжди додатною, прикладена до обох тіл, і від'ємною бути не може.

2. Коефіцієнт пропорційності в законі Кулона – це величезна величина: $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$, а

гравітаційна стала – дуже мала величина в СІ: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$.

3. Різниця законів – у природі сил, у наявності від'ємних зарядів, але від'ємні маси відсутні.

4. Коефіцієнт у законі Кулона характеризує здатність зарядів створювати електромагнітне поле, а гравітаційна стала – характеризує гравітаційну взаємодію тіл. Одне тіло створює навколо себе гравітаційне поле, і в будь-якій точці цього поля на інше тіло з боку цього тіла діє сила притягання (гравітації).

5. Гравітаційна стала є універсальною фізичною константою, однаковою для всіх тіл на Землі й у Всесвіті.

6. Ця величина є однією з основ для створення у майбутньому єдиної фізичної теорії, новітньої фізичної картини світу. Коефіцієнти пропорційності, фундаментальні фізичні сталі мають фізичний смисл. У формулювання змісту цих величин, на нашу думку, слід увести вирази:

– *гравітаційна стала – це фізична величина, яка характеризує здатність тіл створювати гравітаційне поле, і чисельно дорівнює ...* (і далі – за текстом підручника);

– *коефіцієнт k в законі Кулона – це фізична величина, яка характеризує здатність заряджених тіл створювати електромагнітне поле ...* (і далі – за текстом підручника).

Висновки. У запис законів фізики входять числові коефіцієнти. В одних випадках вони беруть участь в описі лише одного явища, в інших – входять до формул цілого ряду закономірностей. Так, коефіцієнт

пружності є в законі Гука ($F = -kx$) та у формулі періоду коливань пружного маятника ($T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$).

В інших випадках такі фізичні сталі пов'язані між собою. Наприклад, жорсткість системи двох послідовно

з'єднаних пружин: $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$; паралельно: $k = k_1 + k_2$. Коефіцієнти вступають у зв'язки не лише між

фізичними величинами, а й між собою. Наприклад, $k = \frac{R}{N_A}$.

Коефіцієнти мають фізичний зміст, різне смислове навантаження. Наприклад, жорсткість у законі Гука характерна лише для конкретних тіл, а гравітаційна стала – є універсальною фізичною сталою. Вона однакова для тіл на Землі та в Космосі.

Коефіцієнти пропорційності – це не лише числа. Кожен описує певну фізичну взаємодію, явище, закон, характеризує речовину і т. п. Фундаментальні фізичні константи входять до виразів універсальних законів фізики у вигляді коефіцієнтів пропорційності і є основою для створення в майбутньому єдиної фізичної теорії та еволюції фізичних знань.

За допомогою цих коефіцієнтів пропорційності між величинами записано як рівність. Цим отримано зручні форми запису законів фізики.

Коефіцієнти мають різні числові значення в різних системах відліку, різні розмірності. Спостереження показали, що системна робота з коефіцієнтами пропорційності, універсальними фізичними сталими сприяє формуванню специфічних умінь, навичок, підвищенню ефективності навчання, глибшому засвоєнню сутності фізичних закономірностей. Учні перестають боятися формул, вільно розкривають їх фізичний зміст. Формуються такі вміння: формулювати закони, визначати зміст констант у них, найменування їх одиниць вимірювання, розмірностей. Учні сприймають коефіцієнти як системний об'єкт, проговорюють усі етапи фізичних закономірностей, включаючи етапи побудови графіків.

Без засвоєння фізичного змісту коефіцієнтів пропорційності неможливо забезпечити необхідний рівень компетенцій, засвоїти сучасну фізичну картину світу.

Література

1. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика і астрономія (профільний рівень) : підруч. для 10 кл. закл. заг. сер. освіти. Київ : УОВЦ «Оріон», 2018. 304 с. : іл.

2. Немченко К. Е., Дудінова О. В. Фізика : практич. довід. : 2-ге вид., доп. та перероб. Харків : ФОП Співак В. Л., 2011. 282 с. + 22 с. вкл.

3. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 10 кл. закл. заг. сер. освіти / за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. Харків : Ранок, 2019. 278 с.