

*Канд. техн. наук В.А. Борщов (УкрДАЗТ),
викладачі Т.Є. Богданова (Чугуївський
професійний аграрний ліцей),
І.М. Гришина (Харківський коледж
транспортних технологій),
д-р фіз.-мат. наук А.М. Ніколенко (УкрДАЗТ)*

*V.A. Borschov, T.E. Bogdanova,
I.M. Gryshyna, A.M. Nikolenko*

МІРИ ДІЇ СИЛИ В МЕХАНІЦІ

MEASURES OF FORCE ACTION IN MECHANICS

Вступ. Класичні розділи фізики є найбільш розробленими на сьогодні як у плані теоретичних обґрунтувань, так і стосовно поглиблень теорії з орієнтацією на практичні потреби. Особливо сказане стосується класичної механіки, досить згадати класичні підручники Г. Голдстейна [1] та М.М. Нікітіна [2]. Те саме можна сказати й про викладання основ класичної механіки в курсі загальної фізики.

Проте, як не дивно, навіть як розділ загальної фізики, класична механіка не позбавлена моделей, що призводять до парадоксів за умови неадекватного застосування цих моделей (досить нагадати таку, здавалося б просту модель, як «матеріальна точка»), і дивних узагальнень при визначенні фізичних величин.

Тому слід звернути увагу не тільки на необхідність прозорості та доступності викладу основних понять, але насамперед на відповідність цих понять їхньому глибинному фізичному змісту.

Постановка задачі. Мета даної статті полягає в тому, щоб послідовно проаналізувати визначення міри дії сил у механіці (мається на увазі імпульс сили та механічна робота), проте хоча зазначені фізичні величини відіграють важливу роль у цьому розділі фізики, їх визначення є, на наш погляд, далекими від дійсно

адекватних. У першу чергу це стосується механічної роботи.

Виклад основного матеріалу. Сила \vec{F} в механіці є векторною фізичною величиною, що являє собою міру механічної дії на дане матеріальне тіло інших тіл. Ця дія викликає зміну швидкостей точок тіла або деформацію його й може бути реалізована як за умов безпосереднього контакту тіл, так і за умов їх польових взаємодій.

У динаміці сила є однією з основних фізичних величин. Зауважимо, проте, що можливою є побудова такої механіки, яка взагалі не містить такої фізичної величини, як сила [3].

Отже, якщо сила описує механічні дії одних фізичних систем на інші, то повинна бути й відповідна міра, як фізична величина. Але таких мір не одна, а дві. Щоб розібратися в ситуації, зробимо дуже короткий екскурс в історію механіки.

У 1686 р. Г. Лейбніц дійшов висновку, що динамічні властивості тіл визначаються величиною, пропорційною добутку маси m тіла на квадрат його швидкості \vec{V} (тобто mV^2). Ця величина була названа ним живою силою. При цьому Г. Лейбніц вважав, що кількість руху $\vec{P} = m\vec{V}$, як міра механічного руху,

запропонована Р. Декартом у 1644 р., може бути лише мірою статичних взаємодій, які він назвав «мертвими силами». Дещо пізніше до виразу «живої сили» було

додано множник $\frac{1}{2}$. Впродовж XVII-XIX ст. продовжувалася полеміка з цього приводу, основний аргумент якої полягав у тім, що не може існувати двох різних мір руху ($m\vec{V}$ та $\frac{mV^2}{2}$). Лише на початку

XX ст. зі створенням релятивістської механіки було остаточно з'ясовано, що існує дійсно дві міри механічного руху: кількість руху та кінетична енергія, які є компонентами однієї міри руху – тензора енергії – імпульсу. А це у свою чергу означає, що повинні існувати і дві міри дії сили. Так воно і є, йдеться про імпульс сили \vec{I} та роботу сили W .

Імпульс сили \vec{I} є векторною фізичною величиною, що являє собою часову міру дії сили і визначається через елементарний імпульс сили $d\vec{I}$:

$$d\vec{I} = \vec{F}dt, \quad (1a)$$

Отже,

$$W = \int_{\eta}^{\eta_2} \vec{F}d\vec{r} = \int_{\eta}^{\eta_2} m \frac{d\vec{V}}{dt} d\vec{r} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2}. \quad (4)$$

Тут і починаються невідповідності з трактуванням механічної роботи. З самого визначення елементарної роботи (3a) випливає, що вона, як скалярний добуток двох векторів \vec{F} та $d\vec{r}$ ($dW = \vec{F}d\vec{r} \cdot \cos\Theta$, де Θ кут між векторами \vec{F} та $d\vec{r}$), може дорівнювати нулю в трьох випадках:

$$\vec{F} = 0 \Rightarrow dW = 0, \quad (5a)$$

$$\vec{I} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt. \quad (1б)$$

Між іншим, величина \vec{I} та імпульс тіла як міра руху пов'язані між собою:

$$\vec{I} = \int_{t_1}^{t_2} m \frac{d\vec{V}}{dt} dt = m\vec{V}_2 - m\vec{V}_1. \quad (2)$$

Робота сили W є скалярною фізичною величиною, що являє собою просторову міру дії сили і визначається через елементарну роботу dW сили \vec{F} при елементарному лінійному переміщенні тіла $d\vec{r}$:

$$dW = \vec{F}d\vec{r}, \quad (3a)$$

Отже,

$$W = \int_{\eta}^{\eta_2} \vec{F}d\vec{r}. \quad (3б)$$

Робота сили W та кінетична енергія тіла $T = \frac{1}{2}mV^2$ теж пов'язані між собою:

$$d\vec{r} = 0 \Rightarrow dW = 0, \quad (5б)$$

$$\Theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow dW = 0, \quad (5в)$$

а може бути і від'ємною:

$$\Theta > \frac{\pi}{2} \Rightarrow dW < 0. \quad (6)$$

Що стосується формул (5а) та (5б), то тут все зрозуміло: немає сили чи переміщення, то немає і роботи. Випадок (5в) більш складний: він може бути реалізований, коли діє гіроскопічна сила. Проте автори стандартних підручників запевняють, що така реалізація можлива, коли діє, наприклад, нормальна реакція опори. Попри все випадок (6) можна формально реалізувати, коли діє сила тертя. Тобто робиться нічим не обґрунтований висновок, що механічна робота систем сил, які діють на тіло, дорівнює сумі окремих робіт окремих сил. З формальної математичної позиції з цим можна було б погодитися, якби не глибоке розуміння того, що механічну роботу виконує рівнодійна сила. Що ж стосується реакцій (сила тертя, нормальна реакція опори тощо), то вони окремих робіт не виконують і не можуть виконувати.

Щоб обґрунтувати цей висновок, слід звернутися до термодинаміки. Перший принцип термодинаміки стверджує, що внутрішня енергія термодинамічної

системи dU змінюється за рахунок теплопередачі dQ та за рахунок виконання роботи dW :

$$dU = dQ - dW. \quad (7)$$

Дисипативні сили, такі як сила тертя, не виконують роботи: у даному разі відбувається розсіювання енергії.

Отже, слід все-таки поставити крапку в питанні щодо визначення механічної роботи, а саме: механічну роботу слід визначати як роботу рівнодійної сили. Додамо, що робота, як і теплота, є, по суті, різними формами передачі енергії.

Висновки. Аналіз визначення механічної роботи дозволяє зробити висновок, що цю роботу виконує рівнодійна сила і лише вона одна. Твердження про механічну роботу як про суму робіт всіх сил, що діють на систему, заперечується першим принципом термодинаміки.

Список літератури

1. Голдстейн, Г. Классическая механика [Текст] / Г. Голдстейн. – М.: Наука, 1975. – 416 с.
2. Никитин, Н.Н. Курс теоретической механики [Текст] / Н.Н. Никитин. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.
3. Герц, Г. Принципы механики, изложенные в новой связи [Текст] / Г. Герц. – М.: АН СССР, 1959. – 386 с.

Ключові слова: сила, імпульс сили, механічна робота, робота рівнодійної сили, перший принцип термодинаміки.

Анотації

Проблему визначення механічної роботи, як міри просторової дії сили, проаналізовано з позиції фізичного змісту цієї величини. Показано, що механічну роботу системи сил, які діють на тіло, не можна розглядати як суму робіт окремих сил, бо вона є роботою рівнодійної сили. Саме цей висновок відповідає першому принципу термодинаміки.

Проблему определения механической работы, как меры пространственного действия силы, проанализировано с позиции физического содержания этой величины. Показано, что механическую работу системы сил, действующих на тело, нельзя рассматривать как сумму

работ отдельных сил, поскольку она является работой равнодействующей силы. Именно этот вывод соответствует первому принципу термодинамики.

The problem of the determination of the mechanical work as of spatial action measure of force is analysed from position of the physical connotation of this value. It is indicated that the mechanical work of the forces system, which acting on body, it is impossible to consider as amount of the work of separate forces since it is a resultant force work. Exactly this conclusion corresponds with the first principle of the thermodynamics.