

УДК 006.91 + 531.7

Пожидает С. П.

## КЛЮЧ ДО ВИРІШЕННЯ РАДІАННОЇ ПРОБЛЕМИ МІСТИТЬСЯ В МЕХАНІЦІ

*Радіанна проблема полягає в труднощах тлумачення розмірностей фізичних величин механіки обертального руху й суперечностях між ними. Це неприпустимо, бо метрологія повинна забезпечувати методи й засоби єдності вимірювань. Встановлено, що причиною радіанної проблеми є неточність формул доцентрового прискорення й помилковість одиниці радіуса кривизни, якою повинен бути метр на радіан, а не метр. Виправлення цих помилок усуває радіанну проблему.*

**Ключові слова:** Міжнародна система одиниць СІ, кутові величини, плоский кут, радіан, радіус кривизни, моменти.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Спеціалістам відома проблема, яка полягає в труднощах тлумачення розмірностей фізичних величин, що застосовують для опису явищ механіки обертального руху, й суперечностях між ними. Наприклад, «... якщо в результаті розв'язання будь-якої задачі отримуємо кількісне значення величини, яку вимірюють у  $s^{-1}$ , то як визначити, що це оберти за секунду, коливання за секунду чи радіан за секунду. Відповіді на це запитання Міжнародна система одиниць (СІ) <...> і міжнародні та державні стандарти, що ґрунтуються на ній, нам не дадуть. Більше того, згадані нормативні документи можуть ввести нас в пряму оману залежно від того, яким документом ми скористаємося і яку сторінку зазначених документів відкриємо. <...> І для правильного тлумачення даних необхідно ретельно <...> вивчити, що ж врешті-решт отримано ... » [1].

Жорсткість валів на кручення вимірюють то в  $H \cdot m$ , то в  $H \cdot m/рад$  – «і ця принципова розбіжність <...> проявляється під час розв'язання конкретних прикладних задач у зв'язку з наявними суперечностями розмірнісного аналізу, від яких нині не позбавлена жодна з розмірнісних систем фізичних величин, зокрема й СІ. Невдоволеність з приводу ньютон-метра висловлюють і метрологи, коли помічають, що розмірності роботи (енергії) й моменту сили збігаються, оскільки в обох випадках застосовують одиницю виміру, яка називається «ньютон-метр». <...> Аналіз виявлених неузгодженостей можна продовжити й далі, однак з розглянутого вище матеріалу вже чітко видно недоліки СІ й серед них чіткі обриси набуває «радіанна проблема» [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Уже на самому початковому рівні в формулюванні визначення одиниці кута повороту спостерігається маніпулювання, тоді як у формулюванні визначень одиниць інших фізичних величин цього немає. Наприклад, зміна положення об'єктів у просторі характеризується двома елементарними формами руху – кутом повороту й прямолінійним переміщенням. Ці дві форми руху вважатимемо рівноцінними, хоча поворот є більш загальною формою: прямолінійний рух – це окремий випадок обертального, що спостерігається за нескінченно великого радіуса повороту тіла відносно деякої осі або точки.

Первісне визначення одиниці довжини «метр» сформульовано просто – як одна десятиміліонна частина чверті довжини земного меридіана. Тобто одиниця довжини «метр» не є штучною, вона ґрунтується на одиниці довжини, наданій Природою.

Радіан, прийнятий наразі в СІ одиницею плоского кута, теж міг бути визначений так само просто як  $1/2\pi$  частина повного оберту, який є одиницею кута, даною Природою. Тим паче, що аналогічно чинив ще давньогрецький вчений Птолемей – за одиницю кута він брав

1/360 частину повного оберту, тобто градус.

Проте кут повороту в СІ розглядають не як частину оберту, а як абстрактне математичне поняття, яке можна вважати штучним. Воно не пов'язане з будь-яким явищем чи об'єктом Природи, а являє собою формальне відношення довжини дуги, вирізаної з кола, до довжини її радіуса. Це відношення, як і всі відношення однойменних величин (енергетичний ККД, відносне подовження, коефіцієнт тертя, коефіцієнт підсилення чи ослаблення тощо), не є фізичною величиною [2; 3]. Воно є безрозмірною математичною величиною і вказує на те, в якому співвідношенні перебувають два різних значення однієї й тієї самої фізичної величини, у цьому випадку довжини.

Формально-математично це визначення правильне, проте не кожне правильне визначення може бути придатним для вирішення того чи іншого фізичного завдання. Наприклад, визначення плоского кута можна було побудувати й на прикладі дуги, вирізаної з кола не довільного, а одиничного радіуса [4]. В такому разі мірою кута була б безпосередньо довжина дуги, що має розмірність довжини. Спираючись на таке визначення (абсолютно коректне математично, але неприйнятне для механіки), ми могли б стверджувати, що фізична величина «плоский кут» має розмірність довжини, а одиницею плоского кута є метр. Це приклад дурниці, отриманої внаслідок бездумного застосування математики, за допомогою якої, за словами А. Ейнштейна, можна довести все, що завгодно [5].

Поняття «безрозмірна величина», якою є кут, не стосується значущості величини. Воно означає лише те, що ця величина функційно не пов'язана з величинами, прийнятими в цій системі величин за основні. А оскільки вибір основних величин є майже довільним, то такою само довільною (випадковою) є й можливість будь-якої величини виявитися безрозмірною. Більшість спеціалістів-прикладників плутають поняття «безрозмірність» з відсутністю одиниці виміру. Безрозмірність кута вони сприймають як ознаку неповноцінності кута як фізичної величини й фіктивності його одиниці радіан, яка нібито є всього лише умовною назвою неіснуючої одиниці виміру. І тому, мовляв, 30 м/рад, 30 м · рад чи 30 м – це одне й те саме, внаслідок чого одиницю радіан не варто згадувати, можна писати просто 30 м.

До таких хибних уявлень спонукає й нормативна література. Довідковий посібник А. Г. Чертова [6, с. 45] не зобов'язує, а всього лише дозволяє «... коли це зручно, користуватися спеціальними назвами «радіан» і «стерадіан». А міждержавний стандарт ГОСТ 8.417–2002 «ГСИ» приписує, що кутові одиниці «... може бути використано або не використано у виразах для інших похідних одиниць СІ (за потреби)» [7]. Тобто стандарт узаконює індивідуально-маніпулятивний підхід у цьому питанні. Про яку єдність результатів може йтися, якщо кожний окремий суб'єкт має право чинити так, як особисто він вважає за потрібне у тій чи іншій конкретній ситуації? Проте метрологи, відповідаючи на нарікання практиків щодо недосконалості СІ в цій частині, запевняють: «Заява, що така багатозначність (невизначеність) призводить до плутанини, цілком на совісті автора. <...> всі прекрасно розуміють один одного» [8]. Але якщо дійсно всі прекрасно розуміють один одного без слів, то навіщо тоді написані стандарти?

Оскільки плоский кут визначають через іншу фізичну величину (довжину), то його не може бути прийнято як основну величину, бо остання повинна бути незалежною від усіх інших величин. Кут також не може бути віднесено й до похідних величин, оскільки він не залежить від основних величин СІ [9]. Щоб розірвати це замкнене коло, плоский і просторовий кути директивно віднесено до похідних величин, хоча формально вони не підпадають під визначення цих величин.

Отже, фізичні величини «кут» (плоский і просторовий) виявилися нібито як нелегітимними, «безрідними сиротами», лише в окремих випадках («за потреби») допущеними до застосування поряд з іншими «повноцінними» величинами.

Директивно плоский кут може належати й до основних величин, завдяки чому його вважали б розмірною величиною, а його одиниця радіан була б обов'язковою до вживання

у виразах для інших похідних одиниць. Проте А. А. Лабутін застерігав, що кутові величини «... не може бути введено в основні, бо це спричинило б труднощі в тлумаченні розмірностей величин, пов'язаних з обертанням» [10].

Це повідомлення – момент істини, визнання метрологів у неможливості забезпечити єдність вимірювань у частині кутових розмірів. Стає зрозумілим, що існуючий недолугий статус кутових одиниць склався не випадково. Його створили навмисне, щоб отримати можливість приховувати розмірнісні суперечності між кутовими величинами.

Проте причина може критися й не в них. Можливо, кутові одиниці, як електрична лампочка в оповіданні М. Зоценка «Бедность», просто висвітлюють недоладності в наявному наразі описі явищ механіки обертального руху?

**Метою** є вирішення описаної вище «радіанної проблеми».

**Викладення основного матеріалу.** Пошук відповідей на запитання почнемо з того, що чинний ГОСТ 8.417–2002 «ГСИ» дозволяє користуватися кутовими одиницями радіан і стерадіан. Отже, маємо законне право користуватися ними. Проте користуватимемось не маніпулятивно (коли й кому потрібно в тій чи іншій ситуації), а так само, як і всіма іншими одиницями СІ – строго послідовно й без будь-яких винятків. Як того вимагає методика науки.

Перевіримо, які ж труднощі з трактуванням розмірностей виникають у цьому разі. У колонці 2 таблиці 1 подано перелік деяких величин, пов'язаних з явищами обертального руху; в колонці 3 – відповідні розрахункові формули; в колонці 4 – одиниці виміру цих величин згідно з СІ, виражені через її кутові й основні одиниці.

Перш за все у стовпчику 4 звернемо увагу на відомий ще зі шкільного курсу фізики збіг одиниць двох різних фізичних величин – механічної роботи й моменту сили (рядки 11–12 і 13–14). Він ніколи нікого не цікавив і не був предметом спеціального наукового дослідження. Метрологи байдуже відмахнулися від нього, бо механічна робота, мовляв, є скалярною величиною, а момент сили – векторною [11, с. 155]. Хоча їм же відомо, що «... належність величини до розряду векторних не має значення в разі визначення її розмірності» [6, с. 54]. Проте, насправді, одиниці виміру будь-яких величин – це їх ідентифікатори, й збіг одиниць неоднорідних фізичних величин має спричинити таку саму підозру щодо його законності, як і однакові номерні знаки на двох різних автомобілях. Зокрема, спеціальне вивчення згаданого збігу, виконане у праці [12], привело до встановлення факту, що сформульоване ще за доісторичних часів і канонізоване нині емпіричне визначення моменту сили неточне. За уточненого визначення збіг одиниць механічної роботи й моменту сили зникає.

У колонці 5 таблиці подано одиниці фізичних величин, отримані за відповідними формулами колонки 3 за умови застосування в них кутових одиниць «радіан». Аналізуючи їх, натрапимо на три види розбіжностей:

- розбіжність з одиницями величин СІ. Її причиною може бути як хибність уявлень про механіку обертального руху, так і недосконалість наявної СІ. Тому ніяких категоричних висновків з такої розбіжності робити не слід ;

- розбіжність з одиницями величин механіки, що характеризують прямолінійний рух. Наприклад, одиниця доцентрового прискорення не повинна відрізнятися від одиниці прискорення за прямолінійного руху, вагаться в якій у нас немає жодних підстав. Будь-яка розбіжність з одиницею  $\text{м/с}^2$  буде неспростовною ознакою **неприпустимої** хибності одиниці доцентрового прискорення;

- розбіжності між одиницями величин, отриманими з різних, але еквівалентних між собою формул. Такі формули описують один і той самий закон природи, тому з них повинні впливати лише однакові одиниці величин. Пазл Природи повинен мати лише один варіант складання. Розбіжності між одиницями **неприпустимі**, як не повинні бути різними номерні знаки – передній і задній – одного й того самого автомобіля.

Таблиця 1

## Деякі фізичні величини механіки обертального руху та їх одиниці

№ пор.	Величина	Формула	Одиниця величини, виражена через кутові й основні одиниці СІ		
			прийнята в СІ	визначена за формулою	
				без додаткових умов	за одиниці радіуса кривизни, м/рад
1	2	3	4	5	6
1	Кут повороту	$\varphi = s/r$	рад	рад	рад
2	Довжина дуги	$s = \varphi r$	м	рад·м	м
3	Радіус кривизни	$r = s/\varphi$	м	м/рад	м/рад
4	Кутова швидкість	$\omega = d\varphi/dt$	рад/с	рад/с	рад/с
5	Колова швидкість	$v = \omega r$	м/с	м·рад/с	м/с
6	Кутове прискорення	$\varepsilon = d\omega/dt$	рад/с <sup>2</sup>	рад/с <sup>2</sup>	рад/с <sup>2</sup>
7	Дотичне прискорення	$a_{\text{дт}} = \varepsilon r$	м/с <sup>2</sup>	м·рад/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>
8	Доцентрове прискорення	$a_{\text{дц}} = V^2/r$	м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>	а) м·рад/с <sup>2</sup> б) м/с <sup>2</sup>
9		$a_{\text{дц}} = V\omega$		м·рад/с <sup>2</sup>	
10		$a_{\text{дц}} = \omega^2 r$		м·рад <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	
11	Механічна робота моменту сили	$W = Fr\varphi = Fs$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
12		$W = Fr\varphi = M\varphi$		кг·м <sup>2</sup> ·рад/с <sup>2</sup>	
13	Момент сили (крутний момент)	$M = Fr$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> /(рад·с <sup>2</sup> )
14		$M = W/\varphi$		кг·м <sup>2</sup> /(рад·с <sup>2</sup> )	
15	Потужність, яку розвиває момент сили	$N = W/t$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>3</sup>	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>3</sup>	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>3</sup>
16		$N = M\omega = Fr\omega$		кг·м <sup>2</sup> ·рад/с <sup>3</sup>	
17	Момент інерції матеріальної точки	$J = mr^2$	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> /рад <sup>2</sup>
18		$J = M/\varepsilon$		кг·м <sup>2</sup> /рад	
19	Кінетична енергія	$T = J\omega^2/2$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> ·рад/с <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
20	Момент кількості руху	$mvr$	кг·м <sup>2</sup> /с	кг·м <sup>2</sup> /с	кг·м <sup>2</sup> /(рад·с)
21		$m\omega r^2$		кг·м <sup>2</sup> ·рад/с	
22	Імпульс моменту	$Mt$	кг·м <sup>2</sup> /с	кг·м <sup>2</sup> /(рад·с)	кг·м <sup>2</sup> /(рад·с)

Проаналізуємо отримані результати.

Рядок 2 таблиці: довжина дуги нібито повинна вимірюватися в рад · м. Це не збігається з одиницею виміру довжини в СІ.

Рядок 3: радіус кривизни нібито повинен вимірюватися в м/рад. Ця одиниця теж не узгоджується з СІ, але її можна пояснити. Так, Й. Ш. Коган показав, що фізичний зміст радіуса кривизни траєкторії руху точки – це не відрізок завдовжки  $r$ , а співвідношення між розмірами взаємопов'язаних лінійного  $s$  і кутового  $\varphi$  переміщень точки:  $r = s/\varphi$ . Чисельно це співвідношення дорівнює довжині відрізка  $r$ , але його одиницею є м/рад, а не метр [15].

Такий самий результат, але в більш загальному вигляді, отримано і в результаті аналізування енергетичних співвідношень у праці [12]: за криволінійного руху точки визначальним є числове значення співвідношення, що являє собою ніби як кінематичне передавальне число, яке характеризує взаємозв'язок між лінійним  $s$  і кутовим  $\varphi$

переміщеннями (узагальненими координатами прямолінійного й обертального рухів). Його вимірюють у м/рад, і, в окремих випадках, воно чисельно може дорівнювати плечу (радіусу) прикладення сили відносно деякої точки чи осі.

Рядок 5: колову швидкість нібито потрібно вимірювати в м · рад/с – це розбіжність з СІ і з механікою прямолінійного руху, в яких швидкість вимірюють у м/с.

Рядок 7: дотичне прискорення нібито треба вимірювати в м · рад/с<sup>2</sup> – це теж не відповідає СІ і механіці прямолінійного руху, в якій прискорення вимірюють у м/с<sup>2</sup>.

Рядки 8–10: залежно від вигляду формули доцентрового прискорення воно нібито може мати аж три різні одиниці – м/с<sup>2</sup>, м · рад/с<sup>2</sup> або м · рад<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>. Це неприпустимо, одиниця доцентрового прискорення не повинна залежати від вигляду формули й має бути такою само, як за прямолінійного руху – м/с<sup>2</sup>.

Аналогічні розбіжності спостерігаються попарно і з одиницями всіх інших величин, наведених у таблиці, – механічної роботи (рядки 11–12), моменту сили (рядки 13–14), потужності (рядки 15–16), моменту інерції (рядки 17–18) і моменту кількості руху (рядки 20–21).

Суперечності виникають також і між одиницями фізичних величин у механіці Ньютона (їх подано в СІ) й одиницями таких самих величин, отриманих з рівнянь Лагранжа для обертального руху. Після диференціювання виразу для кінетичної енергії  $I\omega^2/2$  узагальнена сила (у цьому разі вона уособлює момент сили) отримує одиницю виміру, якої немає в механіці Ньютона. Наприклад, якщо одиницю моменту інерції  $I$  брати згідно з СІ (кг · м<sup>2</sup>), то одиниця узагальненої сили повинна виявитися такою, як одиниця моменту в СІ – Н · м, або, що те саме, кг · м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>. Проте отримуємо її у вигляді кг · м<sup>2</sup> · рад/с<sup>2</sup>.

Цей факт давно відомий, проте теж нікого не насторожував і не цікавив як наукова проблема. Автори підручників або байдуже констатували його [13, с. 540], або викладали механіку без згадування будь-яких одиниць виміру [14]. В останньому випадку маємо повну аналогію з описаною в оповіданні М. Зоценка відмовою мешканців квартири від електрики, яка висвітлювала небажані речі.

У пошуках причин суперечливості одиниць, що виникає під час опису явищ обертального руху, звернемося до згаданого вище факту, що одиницею радіуса кривизни повинен бути м/рад, а не метр. Висунемо гіпотезу, що саме ця неточність є причиною недоладностей з розмірностями, пов'язаними з обертанням. Для її підтвердження перевіримо, чи зникнуть труднощі в разі заміни (у рядку 3 таблиці) одиниці радіуса кривизни метр на м/рад. Якщо зникнуть – гіпотезу буде підтверджено.

Результати перевірки подано в колонці 6 таблиці:

- рядок 2: довжина дуги вимірюється в метрах, що збігається з одиницею виміру довжини в СІ;

- рядок 5: одиниця колової швидкості – м/с. Це узгоджується з СІ і з механікою прямолінійного руху, у якій застосовують таку само одиницю;

- рядок 7: одиниця дотичного прискорення – м/с<sup>2</sup>. Це узгоджується з СІ і з механікою прямолінійного руху;

- рядки 8–10 – одиниця доцентрового прискорення у всіх трьох рядках однакова – м·рад/с<sup>2</sup> – див. пункт а) відповідної комірки таблиці. Тобто розбіжностей між результатами застосування різних формул немає. Але така одиниця не узгоджується з СІ і, що більш суттєво, з одиницею прискорення прямолінійного руху, в якій одиницею є м/с<sup>2</sup>. Це неприпустима суперечність, до неї ми ще повернемося;

- рядки 11–12 – одиниці виміру механічної роботи не мають розбіжностей, вони узгоджуються як з СІ, так і з механікою прямолінійного руху;

- рядки 13–14 – наявний раніше збіг одиниць виміру моменту сили з одиницями механічної роботи (рядки 11–12) зник. Це підтверджує результати праці [12]: збіг є не проявом якоїсь закономірності Природи, а всього лише наслідком некоректного опису явищ обертального руху. Немає також розбіжностей між одиницями в рядку 13 і рядку 14.

Одиницею моменту сили отримано  $\text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{рад} \cdot \text{с}^2)$ , що не відповідає СІ. Проте в праці [12] показано, що момент сили повинен мати саме таку одиницю, а не прийняту в нинішній СІ (одиниця  $\text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{рад} \cdot \text{с}^2)$ , наведена в таблиці, тотожну наведеній у праці [12] одиниці  $\text{Н} \cdot \text{м}/\text{рад}$ );

- рядки 15–16 – одиниці виміру потужності не мають розбіжностей, вони узгоджуються як з СІ, так і з механікою прямолінійного руху;

- рядки 17–18 – одиниці виміру моменту інерції не мають розбіжностей, але не такі, як у СІ;

- рядок 19 – одиниця виміру кінетичної енергії така сама, як і в СІ, вона збігається з одиницею однорідної для неї фізичної величини – механічної роботи (рядки 11–12);

- рядки 20–21 – одиниці виміру моменту кількості руху не мають розбіжностей, але не такі, як у СІ;

- рядок 22 – одиниця імпульсу моменту сили не збігається з СІ, але така сама, як і в одиниці однорідної з нею фізичної величини – моменту кількості руху (рядки 20–21).

Зникла також і суперечність між одиницями фізичних величин у механіці Ньютона й одиницями таких само величин, отриманих з рівнянь Лагранжа для обертового руху. Якщо в останньому застосовуємо уточнену одиницю моменту інерції  $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{рад}^2$ , взяту з рядків 18–19 таблиці, то диференціювання виразу для кінетичної енергії  $I\omega^2/2$  приводить до одиниці узагальненої сили  $\text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{рад} \cdot \text{с}^2)$ , що збігається з одиницею моменту сили в рядках 13–14.

Отже, з висунутою гіпотезою не узгоджується лише один результат (у рядках 8–10 таблиці) з усіх наявних у колонці шести результатів, але для відхилення гіпотези цього достатньо. Ми отримали право песимістично констатувати, що пазл Природи не складається, радіанну проблему не вирішено, бо вона, вочевидь, зумовлена якимись не пізнаваними для людини об'єктивними обставинами.

Проте такий висновок є капітуляційним. Пазл Природи не може не складатися. Це той випадок, про який можна сказати: «Цього не може бути, бо цього не може бути ніколи». Природа пізнавана, вона не потребує маніпулювання. Проте відомості про Природу не лежать на поверхні і їх не виявляють під час простого споглядання на неї. Вони відкриваються лише в результаті прискіпливого незаангажованого аналізування природних явищ та суперечностей у їх описах, незважаючи на будь-які авторитети.

Наприклад, з висунутою гіпотезою не узгоджується лише один-єдиний результат, отриманий у рядках 8–10. Всі інші результати узгоджуються. Це дає право припустити, що висунута гіпотеза все-таки правильна, а причиною некоректності результату, отриманого в рядках 8–10, може бути неточність формул доцентрового прискорення, наведених у згаданих рядках. Безумовно, ці формули відомі сотні років, їх безліч разів без будь-яких змін переписували з одних підручників у інші й ні в кого вони не викликали сумнівів. Проте в нас такі сумніви з'явилися, бо отримані з формул результати не узгоджуються з усіма іншими результатами, наведеними в колонці 6 таблиці.

Для перевірки цього припущення (гіпотези) розглянемо процедуру виведення формули доцентрового прискорення [13, с. 26–267]. У ній був співмножник  $\lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \{[\sin(\Delta\varphi/2)]/(\Delta\varphi/2)\}$ , який чисельно дорівнював одиниці, внаслідок чого ним знехтували.

Але ця дія призвела до розмірнісної некоректності формули. Адже співмножник, яким знехтували, є носієм одиниці кута «рад<sup>-1</sup>», що зникла з формули разом зі співмножником. Раніше ця помилка була непомітна, бо відсутність одиниці «рад<sup>-1</sup>» нейтралізувалася відсутністю такої самої одиниці в радіусі кривизни, який теж є у формулі, завдяки чому результат розрахунку зберігав правильну одиницю  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Щоб виправити помилку, в формули доцентрового прискорення треба ввести співмножник у вигляді коефіцієнта «1» з одиницею виміру «рад<sup>-1</sup>». Це забезпечуватиме отримання коректної одиниці доцентрового прискорення  $\text{м}/\text{с}^2$  – див. пункт б) відповідної

комірки таблиці.

Отже, у колонці 6 таблиці усунуто останню суперечність між одиницями виміру величин, що характеризують механіку обертового руху. Пазл природи склався. Обидві гіпотези справдилися. Це дає право привести всі одиниці виміру, наведені в колонці 4, до вигляду, поданого в колонці 6.

З огляду на це в механіці необхідно прийняти одиницю радіуса кривизни такою, що дорівнює м/рад, і виправити формули для доцентрового прискорення, а в СІ ввести фізичну величину «кут» в основні величини, одиниці яких обов'язкові для використання у виразах для похідних одиниць. За цих умов зазнають змін одиниці похідних величин, пов'язаних з моментами, – в них буде одиниця «радіан» у тому чи іншому степені.

Наприклад, з курсу опору матеріалів відоме співвідношення для обчислення нормальних напружень за чистого згину, Па:

$$\sigma = \frac{M_x y}{I_x}, \quad (1)$$

де  $M_x$  – згинальний момент, його одиницею, як ми встановили, є Н · м/рад;

$y$  – відстань (радіус) елементарної ділянки перетину до осі  $x$ , м/рад;

$I_x$  – осьовий момент інерції, в нинішній редакції СІ його одиницею є м<sup>4</sup>.

Розв'язавши співвідношення (1) відносно осьового моменту інерції  $I_x$ , отримуємо, що в удосконаленій СІ його одиницею буде м<sup>4</sup>/рад<sup>2</sup>. Це відповідає фізичній суті даної величини, бо в її формулі відстань  $y$  міститься у другому степені.

Крім того, під час перегляду СІ потрібно буде врахувати й рекомендації Й. Ш. Когана щодо уточнення одиниць с<sup>-1</sup> і м<sup>-1</sup>, обов'язково вказуючи в них одиниці «оберт», «цикл» чи «період».

**Висновки.** Ключ до вирішення «радіанної проблеми» міститься не в метрології, а в механіці, в якій застосовують помилкову одиницю радіуса кривизни й некоректні формули для визначення доцентрового прискорення.

Виправлення цих помилок усуває радіанну проблему. Завдяки цьому фізичну величину «кут» може бути введено в основні величини СІ, одиниці яких обов'язкові для використання у виразах для похідних одиниць. За цих умов зазнають змін одиниці похідних величин, пов'язаних з моментами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Митрохин А. Н. Математика и ее роль в анализе размерностей и образовании единиц измерений // Законодательная и прикладная метрология. – 2000. – № 5. – С. 39– 47.
2. Широков К. П. О статусе угловых единиц // Измерительная техника. – 1978. – № 9. – С. 30 – 33.
3. Васенков Л. В. Является ли ослабление физической величиной? // Измерительная техника. – 1987. – № 2. – С. 14.
4. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. – М. : Мир, 1980. – 208 с.
5. Зелиг К. Альберт Эйнштейн. Пер. с нем. – М. : Атомиздат, 1966. – 232 с.
6. Чертов А. Г. Физические величины. – М. : Высшая школа, 1990. – 335 с.
7. ГОСТ 8.417–2002 ГСИ. Единицы величин. Введен 01.09.2003. – 29 с.
8. Брянский Л. Н., Дойников А. С., Крупин Б. Н. О «размерности» безразмерных единиц // Законодательная и прикладная метрология. – 1999. – № 4. – С. 4 – 50.
9. Широков К. П. Рационализация угловых единиц // Измерительная техника. – 1972. – С. 23 – 28.
10. Лабутин А. А. Краткие сведения о международной системе единиц измерений (СИ). – К.: Вища школа, 1975. – 89 с.
11. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1988. – 432 с.
12. Пожидаєв С. П. Уточнення поняття моменту сили в механіці // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2018. – № 2. – С. 73 – 81.

13. Воронков И. М. Курс теоретической механики. – М. : Наука, 1966. – 596 с.
14. Иродов И. Е. Основные законы механики. – М. : Высшая школа, 1978. – 240 с.
15. Коган И. Ш. Физическая величина не должна иметь единицу  $m^{-1}$  или  $s^{-1}$  // Законодательная и прикладная метрология. – 2011. – №5. – С. 43 – 49.

**Пожидаев С. П.**

### **КЛЮЧ К РЕШЕНИЮ РАДИАННОЙ ПРОБЛЕМЫ НАХОДИТСЯ В МЕХАНИКЕ**

*Радианная проблема заключается в трудностях толкования размерностей физических величин механики вращательного движения и противоречиях между ними. Это недопустимо, так как метрология должна обеспечивать методы и средства единства измерений. Установлено, что причиной радианной проблемы являются неточности формул центростремительного ускорения и ошибочность единицы радиуса кривизны, которой должен быть метр на радиан, а не метр. Исправление упомянутых ошибок устраняет радианную проблему.*

**Ключевые слова:** Международная система единиц СИ, угловые величины, плоский угол, радиан, радиус кривизны, моменты.

**S. Pozhydaiev**

### **THE KEY TO SOLVING THE RADIAN PROBLEM IS IN THE MECHANICS**

*The radian problem lies in the difficulty of interpretation the dimensions of a quantities of the mechanics of rotational movement and the contradictions between them. This is unacceptable, since metrology should provide methods and means of measurement uniformity. It has been established that the cause of the radial problem is the inaccuracy of the formulas centripetal acceleration and the error of the unit of radius of curvature, which should be a meter per radian, and not a meter. Correction of the mentioned errors eliminates the radian problem.*

**Key words:** International System of Units (SI), angular values, plane angle, radian, radius of curvature, moments.

Рецензент: Литвинюк Л. К., канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, ННЦ «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН, смт. Глеваха-1

УДК 621.882.6:658.516.1

**Івченко О. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. І., Гуль Ю. П., Чмельова В. С.**

### **ДО ПИТАННЯ ПРО НОРМУВАННЯ МІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРИЖНЕВИХ КРІПІЛЬНИХ ВИРОБІВ ЗАЛЕЖНО ВІД ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ**

*Встановлено, що застосування кріпильних виробів обумовлено рівнем напруги в нарізевих з'єднаннях від затягування, яке дорівнює певній частці нормованих межі плинності або напруги від пробного навантаження, та ніяк не пов'язано з нормованою межею тимчасового опору болтів або шпильок. Зниження значення останньої характеристики відносно вимог стандарту в разі задовільних значень межі плинності*