

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА**

**КУДІН Анатолій Петрович** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри програмної інженерії Національного педагогічного університету імені М. Драгоманова.

**Наукові інтереси:** інформаційні технології навчання фізики в університеті.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**KUDIN Anatoliy Petrovych** – doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the department of software engineering of the national pedagogical university named after M. Drahomanov.

**Circle of research interests:** information technology of teaching physics at the university.

*Стаття надійшла до редакції 21.04.2021 р.*

УДК [52+53]–378

DOI: 10.36550/2415-7988-2021-1-198-40-44

**КУЗЬМЕНКОВ Сергій Георгійович** –

доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук, професор, в.о. завідувача кафедри фізики та методики її навчання

Херсонського державного університету

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5257-9523>

e-mail: ksg3.14159@gmail.com

**ЯКІ ФІЗИЧНІ КОНСТАНТИ МОЖНА ВВАЖАТИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИМИ?**

**Постановка та обґрунтування актуальності проблеми.** Відкриття фундаментальних констант можна вважати одним із видатних досягнень сучасної фізики. Цілком можна погодитись з К.О. Томлініним, що фундаментальні фізичні константи – один із найважливіших елементів сучасної фізичної картини світу. «Еволюція цього поняття безпосередньо пов'язана з еволюцією фізики і відображає головну закономірність розвитку фізичного знання – перехід від класичної фізики, що не містила сталих, які мали фундаментальний статус, до сучасної фізики, в якій центральну роль грають фундаментальні сталі» [12, с. 8].

Історія появи фізичних сталих у науці не однозначна і не лінійна. Першою була вимірjana швидкість світла у вакуумі (О. Рьомер, 1676 р.), але ніхто в ті часи не усвідомлював її як фізичну константу. Тому можна вважати, що першу фізичну сталу ввів І. Ньютон і це була гравітаційна стала  $G$  (1687 р.) у законі всесвітнього тяжіння.

Формально до ХХ століття у фізиці з'явилися ще кілька фізичних сталих [11]: швидкість поширення електромагнітних хвиль  $c$  (1864 р.), яку Дж. Максвелл ототожнив зі швидкістю світла, заряд (1891 р.) і маса електрона (1897 р.), стала Планка (14 грудня 1900 р.), проте фундаментальний статус усіх їх було з'ясовано пізніше. Сюди ж можна віднести здогадку І. Канта (1747 р.) про тривимірність простору, але фундаментальність розмірності простору вперше обґрунтував П. Еренфест (1917 р. [2]). Усі інші фундаментальні фізичні константи були введені у фізику вже у ХХ ст.

Одним з головних завдань, які мають ставитись під час підготовки вчителя фізики та астрономії, є формування єдиної астрофізичної картини світу як синтез фізичної та астрономічної картин світу. Водночас ця астрофізична картина має бути органічною складовою загальнонаукової картини світу. Наукова картина світу за А.Й. Єремеевою – це *внутрішньо узгоджена система уявлень про навколишній світ* (або його аспект, наприклад,

астрономічний – курсив мій), абсолютизація, «твердий зліпок» науки сучасної епохи, тимчасова модель дійсності [4].

З іншого боку, фізика в університетах традиційно викладається окремими розділами (які склалися історично) і, зазвичай, різними викладачами. Це відповідає принципу наступності і послідовності навчання, логічно і методично виправдано. Проте наслідком цього є фрагментарність фізичної картини, що формується в голові студента, окремі фрагменти часто не з'єднуються в єдиний пазл. Не завжди очевидним для студента є синтез астрономічної та фізичної картин світу. До того ж студенти часто сприймають усі фізичні константи просто як коефіцієнти пропорційності між фізичними величинами, не усвідомлюючи глибокий зміст деяких з них.

Виявляється, що з визначенням поняття «фундаментальна фізична константа» існує велика проблема. До того ж остаточного, узгодженого списку фундаментальних фізичних констант досі не існує – різні автори обґрунтовують різні (за деякими очевидними виключеннями) списки. Тому розв'язання цієї проблеми у сучасній фізиці, на нашу думку, є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Найбільш ґрунтовно проблемою фундаментальних констант фізики займалися П. Девіс [3], Й. Розенталь [8-10], Л. Окунь [7], О. Спірідонов [11], К. Томлін [12].

За твердженням К.О. Томліна [12, с. 173] на сучасному етапі розвитку фізики домінує дескриптивний підхід до визначення фундаментальних констант – їм не дається визначення, а просто перелічується низка деяких фізичних сталих, яким за визначенням надається статус фундаментальних.

Водночас деякі автори під час визначення фіксують певні властивості фундаментальних констант. Підсумуємо ці визначення услід за

Томілінім. Отже, фундаментальні константи [12, с. 173]:

1) є *універсальними параметрами*, тобто такими, що не залежать від специфічних умов і зберігають своє значення для усього Всесвіту;

2) описують *властивості елементарних частинок*;

3) присутні у фундаментальних фізичних законах як *коефіцієнти пропорційності*;

4) є *фундаментальними природними масштабами* відповідних фізичних величин;

5) пов'язані з різними фізичними теоріями, що описують різні явища, і *визначають область застосовності теорії*;

6) є коефіцієнтами, що встановлюють *зв'язок між поняттями різних теорій*, які описують один й той самий клас явищ;

7) пов'язані з *еволюцією фізичних теорій*, їх узагальненням, і відображають *принцип відповідності* і співвідношення граничного переходу між класичними і некласичними теоріями.

В решті решт Томілін не наводить єдиного, універсального визначення поняття «фундаментальна фізична константа».

У своїй книзі «Фундаментальні фізичні сталі: Від започаткування фізики до космології» О.П. Спірідонов детально аналізує існуючі визначення поняття «фундаментальні сталі» і приходиться до невтішного висновку: у науковій і навчальній літературі відсутнє єдине й чітке визначення цього поняття [11, с. 43].

Зрештою, здійснений Спірідоновим аналіз, дав йому можливість сформулювати таке визначення: «фундаментальними фізичними сталими слід вважати константи, що надають інформацію про найбільш загальні, основоположні властивості матерії» [11, с. 43]. Проте ці слова про «найбільш загальні, основоположні властивості матерії», які відображають фундаментальні константи, очевидно, потребують уточнення і конкретизації. Потрібні чіткі критерії, за якими певні фізичні константи можна відносити до фундаментальних, а інші – ні.

Відсутність таких критеріїв фундаментальності спричиняє появу у списках фундаментальних констант деяких авторів таких фізичних сталих, які на це не заслуговують. Наприклад, той самий Спірідонов наполягає на включенні до нього сталої Больцмана  $k$ . Його аргументи такі: «Стала Больцмана пов'язує макрохарактеристики системи частинок – її температуру – з мікрохарактеристиками руху складових її мікрочастинок – їх середньою кінетичною енергією  $E$ . Наприклад, середня кінетична енергія руху частинки, що припадає на одну ступінь свободи, дорівнює  $E = kT/2$ . Константа  $k$  зв'язує разом макро- і мікросвіти і тому грає у фізиці фундаментальну роль. Вона ж входить в отриманий Л. Больцманом фундаментальний фізичний закон, що пов'язує ентропію системи  $S$  і термодинамічну ймовірність  $W$ :  $S = k \ln W$ . Цей закон вперше виразив у математичній формі

фундаментальну властивість природи – спрямованість фізичних процесів від нерівноваги до рівноваги, від менш імовірних станів фізичних систем до більш імовірних» [11, с. 22].

З цим важко не погодитись. Слід зазначити, що приблизно ті самі аргументи на користь фундаментальності сталої Больцмана  $k$  наводить і К.О. Томілін [12]. Проте, якщо варіювати сталу Больцмана, то, як неважко переконатись, це не призведе до зміни властивостей нашого Всесвіту. Зміна  $k$  спричинить лише зміну температурних шкал, які мають суб'єктивний характер. Щодо ентропії, то можна, наприклад, згадати, що має значення не абсолютне значення ентропії, а її зміна. Отже, хоча стала Больцмана дійсно грає у фізиці величезну роль, її, на нашу думку, не доцільно надавати статус фундаментальної.

Дивує також включення Спірідоновим до списку фундаментальних фізичних констант сталої Авогадро  $N_A$ . Адже згадаємо визначення цієї сталої. За одиницю кількості речовини приймається моль (СІ), який визначається як кількість речовини, що містить стільки ж атомів, молекул, скільки атомів міститься у 0,012 кг ізотопу Карбону  $^{12}\text{C}$  [11, с. 16]. Відношення молярної маси речовини  $M$  до маси молекули  $m_0$  цієї самої речовини однаково для усіх речовин і дорівнює сталій Авогадро.

Відтак виявляється, що стала Авогадро асоціюється з молем, а моль асоціюється з певною масою Карбону  $^{12}\text{C}$ . Тобто все це – просто результат домовленості («людський фактор»). У такому разі ця стала не може об'єктивно характеризувати наш Всесвіт. До того ж із співвідношення  $kN_A = R$ , де  $R$  – універсальна газова стала, випливає, що добуток двох фундаментальних (за Спірідоновим) сталих дорівнює зовсім не фундаментальній константі.

Спірідонов вводить ще штучно сконструйовану ним величину, яку пропонує вважати фундаментальною сталою, а саме *квант простору-часу* [11, с. 41]:

$$st = \frac{\hbar^2 G^2}{c^7} \approx 10^{-148} \text{ м}^3 \text{ с}.$$

Проте серйозною вадою цієї величини, на нашу думку, є те, що вона виражається через відомі фундаментальні константи (але не є безрозмірною, як у випадку безрозмірних констант фундаментальних взаємодій).

Отже, **метою статті** є визначення: чітких критеріїв фундаментальності фізичних сталих, а також повної групи фундаментальних фізичних констант, які є необхідними й достатніми для характеристики нашого Всесвіту.

**Методи дослідження.** Систематизація, порівняльний аналіз і теоретичне осмислення наукових публікацій, аналіз навчальної літератури, розкриття основних дефініцій досліджуваної проблеми, узагальнення й уточнення ідей науковців, уявний експеримент.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Проаналізуємо пропозиції, що стосуються визначення поняття «фундаментальна фізична константа» представлені К.О. Томіліним.

Щодо «універсальності» (пункт 1), то, з одного боку, характеристика деяких сталих як універсальних була первісно пов'язана з універсальністю фізичних законів, в яких вони фігурували (наприклад, закон всесвітнього тяжіння). Проте згодом виявилось, що усі класичні закони не універсальні, а мають певну область застосування. При цьому межі справедливості класичних теорій іноді визначають саме фундаментальні константи (наприклад, стала Планка або швидкість світла). З іншого боку, розуміння універсальності пов'язано з незалежністю від природи і параметрів об'єктів і зовнішнього середовища.

Пункт 2 породжує багато запитань. Чи всі характеристики мікрооб'єктів фундаментальні? Наприклад, борівська енергія або борівський радіус? Або, як справедливо зазначає О.П. Спірідонов [11, с. 18], характеристикою якого мікрооб'єкта є магнетон Бора? І взагалі, мікрооб'єктів відомо надто багато. Які з них вважати більш важливими, щоб їх характеристикам надати статус фундаментальних?

Пункт 3 також сумнівний, адже які фізичні закони слід відносити до фундаментальних? Мабуть, до фундаментальності закону всесвітнього тяжіння (в межах застосовності – див. пункт 1) або закону Кулона питань немає. Проте, чи можна вважати фундаментальними закони електролізу Фарадея або закон зміщення Віна? Мало того, що відсутні критерії фундаментальності законів, так ще й виходить, що одне поняття визначається через інше – не менш невизначене.

Що стосується пункту 4, то так, дійсно швидкість світла в вакуумі  $c$  можна вважати природною одиницею швидкості – жоден матеріальний об'єкт не може перевищити цю швидкість. Заряд електрона  $e$  можна вважати природною одиницею електричного заряду, оскільки будь-який заряд є цілим кратним  $e$  (заряди кварків є дробовими, але вони у вільному стані не трапляються). Стала Планка  $\hbar$  також можна вважати природною одиницею для моменту імпульса і спіна мікрочастинок. Проте як бути з гравітаційною сталою  $G$  і, наприклад, сталою Габбла  $H_0$  – питання відкрите.

Згідно з пунктом 5 відповідність між фундаментальною константою і фізичною теорією спричиняє її появу в рівняннях цієї теорії [12] (пункт 3). Однак даним пунктом встановлюється більш жорстка відповідність: одна константа – одна теорія, що, на нашу думку, є певною вадою (згадайте, наприклад, ЗТВ). Ключовим же у пункті 5 є те, що фундаментальні константи визначають *межі застосовності цих теорій*. Проте кількість виключень з цього правила надто велика.

Як приклад, що ілюструє пункт 6, можна навести сталу Планка, яка постає коефіцієнтом пропорційності між головними поняттями

корпускулярної теорії світла з одного боку – енергією та імпульсом, та головними поняттями хвильової теорії з іншого боку – відповідно частотою і хвильовим вектором:  $E = \hbar\omega$ ,  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ .

Гравітаційну сталу також можна розглядати як коефіцієнт пропорційності між двома різними фізичними поняттями – інертною та гравітаційною масами. Щоправда, на сьогодні немає фізичних підстав розрізняти ці фізичні поняття, тому їх, за ньютонівською традицією, вважають еквівалентними (принцип еквівалентності). Як наслідок цього гравітаційна стала з'являється в законі всесвітнього тяжіння.

Проте такі приклади поодинокі, до того ж свого часу прийшло усвідомлення (починаючи з Луї де-Бройля), що корпускулярний і хвильовий підходи описують одні й ті самі об'єкти – мікрочастинки (корпускулярно-хвильовий дуалізм).

Щодо пункту 7, то, як було зазначено раніше, фундаментальні константи фізики відображають еволюцію фізичних теорій. «Фізика являє собою не просто деякий набір ніяк непов'язаних теорій, вона зазнає своєрідну еволюцію у ході нашого пізнання законів природи і ця еволюція, яка прямує, очевидно, до єдиної фізичної теорії, визначається існуванням у Природі фундаментальних сталих» [12, с. 178].

Так, первісно у класичній фізиці не було жодної фізичної сталої, яка б мала статус фундаментальної. Але потім у першій третині ХХ ст. були створені спеціальна теорія відносності (СТВ, 1905 р.) і квантова механіка (1925–1927 рр.). Обидві ці теорії ґрунтувались на сприйнятті констант  $c$  і  $\hbar$  (відповідно для кожної теорії) як фундаментальних. Ми погоджуємося з Томіліним, що у ході цієї квантово-релятивістської революції було з'ясовано, що найважливішим принципом, що регулює «взаємовідносини» між фізичними теоріями, є *принцип відповідності*. Як з'ясувалось, нові фізичні теорії не спростовують попередні, а так звані класичні теорії зберігають свою цінність як граничні випадки більш загальних теорій. І саме фундаментальні константи обмежують область застосовності класичних теорій (див. пункт 5 і коментарі до нього).

Згодом, після СТВ, була створена релятивістська теорія тяжіння – загальна теорія відносності (ЗТВ, 1915), яка ґрунтувалась вже на двох фундаментальних константах  $c$  і  $G$ . Потім була розвинута релятивістська квантова механіка (починаючи з 1928 р.), побудована також за допомогою двох фундаментальних констант, але  $c$  і  $\hbar$ . Подальший розвиток фізики нині пов'язується із залученням більшої кількості фундаментальних констант, наприклад,  $c$ ,  $G$ ,  $\hbar$ . Тут можна згадати відомий «куб фізичних теорій» А.Л. Зельманова, побудований саме в цих координатах  $c$ ,  $G$ ,  $\hbar$  (див., наприклад, [7]). Проте знову перелік фундаментальних фізичних констант обмежується цими трьома.

У зв'язку з цим ми пропонуємо нові критерії фундаментальності фізичних констант. Враховуючи вище сказане, фундаментальними, на нашу думку, слід вважати константи, які, по-перше, не можна виразити через інші константи (незалежність – для розмірних констант); а, по-друге (і це, на нашу думку, є ключовим), варіації (уявні) числових значень цих констант спричиняють значні (кардинальні і навіть катастрофічні) зміни у нашому Всесвіті.

З цього погляду фундаментальними слід вважати наступні константи:  $c$ ,  $G$ ,  $\hbar$ ,  $e$ ,  $m_p$  (маса протона),  $m_n$  (маса нейтрона) і  $m_e$  (маса електрона),  $H_0$ , розмірність простору.

Швидкість поширення світла  $c$  у вакуумі – константа, яка статут фундаментальної отримала після створення А. Ейнштейном спеціальної теорії відносності, в якій є інваріантом. Фундаментальність її також полягає в тому, що це є максимальна швидкість поширення взаємодій у спостережуваному Всесвіті. Гравітаційна стала  $G$  характеризує інтенсивність гравітаційної взаємодії тіл. Елементарний заряд  $e$  (строго кажучи, з відкриттям кварків його некоректно називати елементарним, але це найменший заряд, що трапляється у вільному стані) – відіграє роль константи зв'язку, що показує, як сильно елементарна частинка (заряджена) взаємодіє з подібною до себе. Стала Планка  $\hbar$  – мінімальний квант дії (інакше, квант кутового моменту). Фундаментальність мас електрона, протона й нейтрона полягає в тому, що це маси частинок, з яких складається речовина Всесвіту (на сьогодні протон і нейтрон вже не вважаються елементарними, оскільки складаються з кварків, проте кварки у вільному стані не спостерігаються). Фундаментальність розмірності простору вперше обґрунтував П. Еренфест [2], продемонструвавши, як сильно фізика залежить від цієї величини.

Константа, значення якої впливає на еволюцію метричних властивостей Всесвіту, є стала Габбла  $H_0$ . Ця стала є одним з основних параметрів сучасної космології. Вона визначає: темп розширення Всесвіту; критичну густину Всесвіту, від якої залежить її еволюція; вік Всесвіту. Проте включення сталої Габбла до списку фундаментальних констант досі лишається дискусійним [3; 11; 12]. Справа в тому, що стала Габбла входить у закон Габбла-Леметра як коефіцієнт пропорційності [1]:

$$v = H_0 r,$$

де  $r$  – відстань до якоїсь галактики, а  $v$  – середня (за ансамблем галактик) швидкість її віддалення. Водночас стала Габбла  $H_0$  є параметром Габбла в сучасну епоху, причому цей параметр за визначенням дорівнює:

$$H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt},$$

де  $R(t)$  – так званий масштабний фактор, величина з розмірністю довжини, яка описує зміну просторових відстаней у просторі, що однорідно

розширюється [1]. Очевидно, що параметр Габбла явно залежить від часу.

Слід зазначити, що ми наводимо список фундаментальних фізичних констант, який дещо відрізняється від списків інших авторів.

Під кінець XX століття завдяки дослідженням цієї проблеми передусім Й.Л. Розенталем, П. Девісом, Л.Б. Окунем та іншими [8–10; 3; 7] вдалося з'ясувати, що характерні параметри і стійкість основних структурних елементів Всесвіту – ядер, атомів, планет, зір, галактик – надзвичайно чутливі до числових значень фундаментальних констант. Порівняно невелике уявне «ворушіння» числових значень фундаментальних констант спричиняє катастрофічні наслідки для нашого Всесвіту. Стало зрозуміло, що за трохи іншого набору фундаментальних констант наш світ буде зовсім іншим, наприклад, без звичайних для нас зір або без складних хімічних елементів, без відомого нам життя. Більше того, значення констант мають не просто перебувати в певних межах, а мають бути відповідним чином *збалансовані між собою*. Проблема фундаментальних констант набуває таким чином глобального значення.

**Висновки з дослідження і перспективи подальших розробок.** Отже, ми пропонуємо нові критерії фундаментальності фізичних констант. Фундаментальними, на нашу думку, слід вважати константи, які, по-перше, не можна виразити через інші константи (незалежність – для розмірних констант); а, по-друге, варіації (уявні) числових значень цих констант спричиняють кардинальні зміни у нашому Всесвіті.

З цього погляду повною (на сьогодні) групою фундаментальних констант, які є необхідними й достатніми для характеристики нашого Всесвіту, слід вважати наступні константи:  $c$ ,  $G$ ,  $\hbar$ ,  $e$ ,  $m_p$ ,  $m_n$  і  $m_e$ ,  $H_0$ , розмірність простору. Уявні варіації числових значень саме цих констант кардинально змінюють наш Всесвіт.

Аналіз проблеми фундаментальних констант дає змогу з єдиних позицій підійти до розгляду практично всіх основних розділів фізики та астрофізики. Фундаментальні константи ніби зв'язують їх в одне ціле, являючись невід'ємними характеристичними параметрами всіх найважливіших фізичних і астрофізичних теорій. Розуміння суті проблеми фундаментальних констант неможливе без синтезу досягнень усієї фізики, її сучасних теорій взаємодій, астрофізики. В процесі такого аналізу виникають питання загальнонаукового, методологічного, світоглядного характеру [6].

Щодо перспектив подальших досліджень, то передбачається проаналізувати на відповідність запропонованим критеріям фундаментальності космологічну сталу  $\Lambda$ , що характеризує так звану «темну енергію», яка відповідає за прискорене розширення Всесвіту.

**СПИСОК ДЖЕРЕЛ**

1. Андрієвський С.М., Кузьменков С.Г., Захожай В.А., Климишин І.А. Загальна астрономія: підручник. Харків: ПромАрт., 2019. 524 с.
2. Горелик Г.Е. Почему пространство трехмерно? М.: Наука, 1982. 168 с.
3. Девис П. Случайная Вселенная. М. : Мир, 1985. 160 с.
4. Еремеева А.И. Астрономическая картина мира и научные революции. *Вселенная, астрономия, философия*. М. : Изд-во МГУ, 1988. С. 169–180.
5. Зельманов А.Л. Проблема экстраполябельности, антропологический принцип и идея множественности вселенных. *Вселенная, астрономия, философия*. М. : Изд-во МГУ, 1988. С. 77–79.
6. Кузьменков, С. Г. Спецкурс «Фундаментальні фізичні та математичні константи» як крок до фундаменталізації фізичної та астрономічної освіти. *Збірник наукових праць. Педагогічні науки*. Випуск 66. Херсон: ХДУ, 2014. С. 207–213.
7. Окунь Л.Б. Фундаментальные константы физики. *УФН*, 1991. Т. 161. № 9. С. 177–194.
8. Розенталь И.Л. Вселенная и частицы. М. : Знание, 1990. 64 с.
9. Розенталь И.Л. Физические закономерности и численные значения фундаментальных постоянных. *УФН*. 1980. Т. 131. Вып. 2. С. 239–256.
10. Розенталь И.Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. М. : Наука, 1984. 112 с.
11. Спиридонов О.П. Фундаментальные физические постоянные: От начал физики до космологии: Учебное пособие. М. : ЛЕНАНД, 2015. 304 с.
12. Томилин К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 368 с.

**REFERENCES**

1. Andriievskiy, S.M., Kuzmenkov, S.H., Zakhzhai, V.A., Klymyshyn, I.A. (2019). *Zahalna astronomiia: pidruchnyk*. [General astronomy: a textbook]. Kharkiv.
2. Horelyk, H.E. (1982). *Pochemu prostranstvo trekhmerno?* [Why is space three-dimensional?]. Moskva.
3. Devys, P. (1985). *Sluchainaiia Vselennaia* [Random Universe]. Moskva.
4. Eremeeva, A.Y. *Astronomicheskaja kartina mira i nauchnye revoljucii* [Astronomical world view and scientific revolutions]. Moskva.

5. Zelmanov, A.L. (1988). *Problema jekstrapoljabel'nosti, antropologicheskij princip i ideja mnozhestvennosti vseennyh* [The problem of extrapolability, the anthropological principle, and the idea of a plurality of universes]. Moskva.
6. Kuzmenkov, S.H. (2014). *Spetskurs «Fundamentalni fizychni ta matematychni konstanty» yak krok do fundamentalizatsii fizychnoi ta astronomichnoi osvity* [Special course «Fundamental physical and mathematical constants» as a step towards the fundamentalization of physical and astronomical education]. Kherson.
7. Okun, L.B. (1991). *Fundamental'nye konstanty fiziki* [Fundamental constants of physics].
8. Rozental, Y.L. (1990). *Vselennaja i chasticy* [Universe and particles]. Moskva.
9. Rozental, Y.L. (1980). *Fizicheskie zakonomernosti i chislennye znachenija fundamental'nyh postojannyh* [Physical laws and numerical values of fundamental constants]
10. Rozental, Y.L. (1984). *Jelementarnye chasticy i struktura Vselennoj* [Elementary particles and structure of the Universe]. Moskva.
11. Spirydonov, O.P. (2015). *Fundamental'nye fizicheskie postojannye: Ot nachal fiziki do kosmologii* [Fundamental physical constants: From the beginnings of physics to cosmology]. Moskva.
12. Tomyl'n, K.A. (2006). *Fundamental'nye fizicheskie postojannye v istoricheskom i metodologicheskom aspektah* [Fundamental physical constants in historical and methodological aspects]. Moskva.

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА**

**КУЗЬМЕНКОВ Сергій Георгійович** – доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук, професор, в.о. завідувача кафедри фізики та методики її навчання Херсонського державного університету.

**Наукові інтереси:** дидактика астрономії, фундаментальні фізичні та математичні константи.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**KUZMENKOV Serhiy Heorhiyovych** – Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Acting Head of the Department of Physics and Methods of Teaching Kherson State University.

**Circle of research interests:** didactics of astronomy, fundamental physical and mathematical constants.

*Стаття надійшла до редакції 16.04.2021 р.*